

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E CLIMÁTICA PARA ESTIMATIVA DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO
COMO SUBSÍDIO PARA A GESTÃO AMBIENTAL**

Recife
2021

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E CLIMÁTICA PARA ESTIMATIVA DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO
COMO SUBSÍDIO PARA A GESTÃO AMBIENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. **Área de concentração:** Gestão e Políticas Ambientais.

Orientador (a): Profa. Dr.^a Weronica Meira de Souza

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves Silva, CRB4-1260

F383m Ferreira, Pedro dos Santos.

Modelagem hidrológica e climática para estimativa da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas do semiárido como subsídio para a gestão ambiental / Pedro dos Santos Ferreira. – 2021.

100. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr. Weronica Meira de Souza.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.

Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (Prodema), Recife, 2021.

Inclui referências

1. Gestão ambiental. 2. SWAT. 3. Função Indireta. 4. Previsão social. I. Souza, Weronica Meira de (Orientadora). II. Título

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2021-152)

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E CLIMÁTICA PARA ESTIMATIVA DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO
COMO SUBSÍDIO PARA A GESTÃO AMBIENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambientes da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. **Área de concentração:** Gestão e Políticas Ambientais.

Aprovada em: 01/06/2021

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr. Weronica Meira de Souza (orientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa Dr. Renata Maria Caminha Mendes de Oliveira Carvalho
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr^o. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Ranyere Silva Nóbrega
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr^o. Inajá Francisco de Sousa
Universidade Federal de Sergipe

Dedico este trabalho à minha família, assim como às pessoas que de alguma forma contribuíram com minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças para cumprir, até aqui, com o meu propósito nesta vida. Por ter colocado em meu caminho pessoas que, de alguma maneira, fizeram a diferença para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

À minha família, que sempre me incentivou e fez de tudo para que eu pudesse alcançar os meus sonhos e objetivos, mesmo quando eu ainda ignorava minhas possibilidades. Em especial, ao meu irmão Henrique Ferreira e aos meus pais, Ascendino Ferreira e Zélia Maria. Espero ter correspondido ao esforço que fizeram por mim, quando me foi oferecido muito do que a vocês foi negado.

Aos meus professores, todos, desde a educação básica até a superior. Todos, sem exceção, fizeram a diferença de alguma maneira. Um agradecimento especial à minha orientadora Weronica Souza. Minha eterna gratidão e admiração pelo respeito às minhas ideias, aos meus trabalhos e, sobretudo, por ter feito com que eu pudesse desenvolver meus estudos de forma saudável durante toda a pós-graduação. Vi alguns amigos adoecerem durante essa jornada. Isso só me fez enxergar o quanto é importante trabalhar com profissionais humanos, empáticos.

Aos meus colegas e amigos de vida e trabalho, em especial aos meus grandes amigos Carlos Eduardo e João Rodrigues. Um agradecimento póstumo a Eliésio Souza. Ele não se encontra mais entre nós, mas jamais esquecerei o que fez por mim. Agradeço, também, a minha querida amiga Viviane Gomes, parte importante do que me tornei enquanto pessoa e profissional.

Agradeço à minha amiga, Vitória Régia. Desenvolver uma tese de doutorado é, por vezes, um trabalho árduo, cheio de percalços e instabilidades emocionais. Foi na reta final, dentro de um dos piores momentos das nossas vidas, que você não me deixou desistir. Me cobrou e também me apoiou em um momento (pandemia) em que todos nós precisávamos de força e cuidado, inclusive você.

Em tempos tão difíceis, não poderia deixar de registrar, homenagear e agradecer a todos que compõem a comunidade científica nacional e internacional. A humanidade enfrenta hoje, talvez, um dos seus piores momentos. Mas foi e é na ciência, presente Divino, que depositamos nossa fé e esperança. Por essa razão, não poderia deixar de citar de forma destacada uma das célebres frases de Albert Einstein: **“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”**.

Agradeço a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela bolsa de doutorado concedida durante esses quatro anos e ao Projeto de Pesquisa Projeto APQ-0300- 5.03/17-CONSÓRCIO UNIVERSITAS.

RESUMO

A distribuição da água é condicionada a partir da atuação de diferentes fatores ambientais, políticos e culturais, que atuam em escalas geográficas variadas. Ainda assim, o clima é considerado determinante para a disponibilidade espacial e temporal desse recurso. Diante do exposto, o objetivo da presente tese consistiu em determinar e analisar a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas de clima semiárido, frente a cenários de mudanças climáticas e demográficas, como subsídio para a gestão ambiental. Inicialmente, foi realizado um mapeamento espaço-temporal do uso e cobertura da terra, entre os anos de 1985 e 2018. Em seguida, empregou-se o modelo hidrológico SWAT para simulação da vazão das bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú. Por fim, foram projetados cenários de mudanças climáticas, crescimento populacional e disponibilidade hídrica. Os resultados obtidos para o uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas estudadas revelaram que houve significativa perda das áreas de vegetação nativa e crescimento dos perímetros agrícolas. Na bacia hidrográfica do rio Brígida, por exemplo, a Savana Estépica Arborizada sofreu importante redução quando comparado ao ano de 2018, passando de 73,5% para 58,7%, enquanto as áreas voltadas para a Agricultura de Sequeiro cresceram 12%. Em relação a bacia hidrográfica do rio Pajeú, a taxa de desmatamento foi a mesma observada para a bacia do rio Brígida, porém, as áreas agrícolas cresceram 14,8%. Quanto à calibração do modelo hidrológico SWAT, para o trecho simulado no rio Pajeú, obteve-se valores e Nash-Sutcliffe acima de 0,80, enquanto que para as estações de validação o intervalo de variação foi de -0,05 e 0,71. A extrapolação dos parâmetros físicos da bacia do rio Pajeú para a do rio Brígida se mostrou um procedimento promissor. Quando considerados os mesmos parâmetros e intervalos de incertezas, o Nash-Sutcliffe variou entre 0,88 e 0,91. Como em outros estudos, a maior dificuldade para realizar novos testes recaiu sobre a ausência de dados de vazão observada e melhor qualidade daqueles relacionados à precipitação pluviométrica. Por outro lado, concluiu-se que a calibração do modelo foi bem sucedida e esse pode ser utilizado para fins de planejamento e monitoramento ambiental. As projeções climáticas indicaram tímido aumento da temperatura em meses pontuais, e redução para a maior parte, o que reflete, de certa forma, o comportamento do *baseline* do modelo. Porém, em relação à precipitação pluviométrica, houve redução sistemática do volume de chuvas, principalmente para o período considerado úmido na região. Quanto à evolução demográfica, o método utilizado para estimativa mostrou-se consistente, com valores de $R^2 = 0,99$ e Nash-Sutcliffe $\geq 0,9$. As projeções revelam cenários de significativo crescimento populacional. Nas duas bacias hidrográficas

analisadas, o contingente populacional quase que triplicará até o ano de 2060. Para a disponibilidade hídrica per capita, verificou-se nível de estresse hidrológico para todos os cenários analisados. O crescimento populacional e redução da precipitação tendem a agravar ainda mais o problema. Com isso, constatou-se que o estudo conseguiu confirmar a hipótese norteadora: as bacias hidrográficas do semiárido pernambucano possuem características físico-naturais comuns entre elas que permitem a calibração e validação de modelos hidrológicos de forma indireta, possibilitando o desenvolvimento de estudos sobre previsões hidroclimáticas. Por fim, conclui-se que o presente estudo trouxe novas contribuições no campo metodológico e para a gestão dos recursos hídricos em regiões de clima semiárido. As respostas aqui alcançadas preencheram algumas das lacunas observadas no ensaio inicial, ainda dentro de um projeto de dissertação. Embora, outras análises possam e devam ser desenvolvidas, no sentido de testar novas hipóteses e procedimentos, com vistas a contribuir com a gestão ambiental.

Palavras-chave: SWAT. Validação indireta. Projeção Demográfica.

ABSTRACT

The distribution of water is conditioned by the action of different environmental, political and cultural factors, which act at different geographic scales. Even so, the climate is considered determinant for the spatial and temporal availability of this resource. Given the above, the objective of this thesis was to determine and analyze water availability in hydrographic basins in semi-arid areas, in view of climate and demographic change scenarios, as a subsidy for environmental management. Initially, a spatial-temporal mapping of land use was carried out between 1985 and 2018. Then, the SWAT hydrological model was used to simulate the flow of the hydrographic basins of the Brígida and Pajeú rivers. Finally, climate change, population growth and water availability scenarios were projected. The results obtained for the use and land cover of the studied hydrographic basins revealed that there was a significant loss of areas of native vegetation and growth of agricultural perimeters. In the hydrographic basin of the River Brígida, for example, the Estépica Arborizada Savannah suffered a significant reduction when compared to 2018, from 73.5% to 58.7%, while the areas dedicated to Dryland Agriculture grew 12%. In relation to the Pajeú river basin, the deforestation rate was the same observed for the Brígida river basin, however, agricultural areas grew by 14.8%. Regarding the calibration of the SWAT hydrological model, for the simulated stretch on the Pajeú River, Nash-Sutcliffe values were obtained above 0.80, while for the validation stations the variation range was -0.05 and 0.71. The extrapolation of physical parameters from the Pajeú river basin to that of the Brígida river proved to be a promising procedure. When considering the same parameters and uncertainty intervals, the Nash-Sutcliffe ranged between 0.88 and 0.91. As in other studies, the greatest difficulty in carrying out new tests was the absence of observed flow data and the better quality of those related to rainfall. On the other hand, it is concluded that the calibration of the model was successful and that it can be used for planning and environmental monitoring purposes. The climate projections indicated a timid increase in temperature in specific months, and a reduction for the most part, which reflects, in a way, the behavior of the model's baseline. However, in relation to rainfall, there was a systematic reduction in the volume of rainfall, especially for the period considered wet in the region. As for demographic evolution, the method used for estimation was consistent, with values of $R^2 = 0.99$ and Nash-Sutcliffe ≥ 0.9 . Projections reveal scenarios of significant population growth. In the two hydrographic basins analyzed, the population contingent will almost triple by the year 2060. For per capita water availability, there was a level of hydrological stress for all analyzed scenarios. Population growth and reduced precipitation

tend to aggravate the problem even further. Thus, it was found that the study was able to confirm the guiding hypothesis: the hydrographic basins of the semiarid region of Pernambuco have common physical and natural characteristics that allow the calibration and validation of hydrological models indirectly, enabling the development of studies on hydroclimatic predictions . Finally, it is concluded that the present study brought new contributions in the methodological field and for the management of water resources in semiarid climate regions. The answers obtained here filled some of the gaps observed in the initial essay, still within a dissertation project. However, other analyzes can and should be developed in order to test new hypotheses and procedures, with a view to contributing to environmental management.

Keywords: SWAT. Environmental modeling. Population.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização geográfica das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida.....	39
Figura 2 - Hipsometria das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida.....	41
Figura 3 - Distribuição espacial dos tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida e Pajeú.....	42
Figura 4 - Esquema de processamento de imagem utilizado pelo MapBiomias para gerar um mosaico para um ano	44
Figura 5- Representação temporal da composição de imagens utilizadas pelo MapBiomias para o Brasil	44
Figura 6 - Etapa de classificação dos biomas e suas classes correspondentes	45
Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e meteorológicas nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida	46
Figura 8 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú ...	53
Figura 9 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão das bacias hidrográficas Brígida	55
Figura 10 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida para os anos de 1985 (A) e 2018 (B)	59
Figura 11 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Pajeú para os anos de 1985 (A) e 2018 (B).....	60
Figura 12 - Nível de significância estatística dos parâmetros mais sensíveis na simulação da vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	64
Figura 13 - Intervalo de variação dos parâmetros utilizados para calibração do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	65
Figura 14 - Variação da vazão média anual observada, código 4882000, e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia do rio Pajeú	68
Figura 15 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4883000, município de Flores-PE	69
Figura 16 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4884000, município de Serra Talhada-PE	70

Figura 17 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4885000, município de Serrinha-PE.....	72
Figura 18 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4886000, município de Serrinha-PE.....	73
Figura 19 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida.....	76
Figura 20 - Projeção climática para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, baseada em variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica.....	77
Figura 21 - Projeção climática para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, baseada em variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica.....	79
Figura 22 - Projeção populacional da população absoluta das bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú, para o período entre 2000 e 2060.....	80
Figura 23 - Cenários de disponibilidade hídrica per capita para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, frente a cenários de mudanças climáticas e evolução demográfica.....	82
Figura 24 - Cenários de disponibilidade hídrica per capita para a bacia hidrográfica do rio Brígida, frente a cenários de mudanças climáticas e evolução demográfica.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela1 - Parâmetros gerados pela Macro.xls user soil para os solos encontrados nas bacias hidrográficas do rio Brígida e Pajeú	47
Tabela 2 - Lista de reservatórios modeláveis distribuídos na bacia hidrográfica do rio Brígida	48
Tabela 3 - Lista de reservatórios modeláveis distribuídos na bacia hidrográfica do rio Brígida	49
Tabela 4 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual em uma sub-bacia do rio Pajeú	63
Tabela 5 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Pajeú	66
Tabela 6 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Brígida e Pajeú.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	HIPÓTESE E OBJETIVOS	21
2.1	HIPÓTESE	21
2.2	OBJETIVOS	21
2.2.1	Objetivo geral.....	21
2.2.1	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1	USO E COBERTURA DA TERRA.....	23
3.1.1	Uso e cobertura da terra e mudanças climáticas	25
3.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	26
3.2.1	Calibração de modelos hidrológicos e análise de incertezas	27
3.2.2	O modelo hidrológico SWAT	29
3.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	31
3.3.1	Projeções climáticas.....	32
3.3.2	Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico	34
3.4	MUDANÇAS DEMOGRÁFICAS	36
3.5.	DISPONIBILIDADE HÍDRICA	37
4	MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
4.1.1	Tipologia Climática	40
4.1.2	Hipsometria e pedologia das bacias hidrográficas	40
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
4.2.1	Mapeamento do uso e cobertura da terra	43
4.2.2	Modelagem hidrológica e banco de dados	45
4.2.3	Mapeamento e características físico-químicas dos solos.....	47
4.2.4	Modelo digital de elevação	48
4.4.4	Reservatórios.....	48
4.2.5	Abastecimento e dinamização do modelo hidrológico SWAT.....	49
4.2.6	Delimitação e parametrização das bacias hidrográficas.....	49
4.2.7	Definição das unidades de resposta hidrológica	50
4.2.8	Simulação do modelo hidrológico SWAT.....	50

4.2.9	Análise de sensibilidade e calibração do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú	53
4.2.10	Calibração da bacia hidrográfica do rio Brígida.....	55
4.2.11	Cenários de mudanças climáticas	56
4.2.12	Projeção populacional Projeção populacional e de disponibilidade hídrica frente a cenários climáticos.....	56
4.2.13	Estimativa da disponibilidade hídrica	56
4.2.14	Cenários de disponibilidade hídrica frente a mudanças demográficas e climáticas	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA	58
5.1.1	Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida	58
5.1.2	Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	59
5.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT	62
5.2.1	Análise de sensibilidade dos parâmetros para calibração e validação do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	62
5.2.2	Curva da vazão observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú	67
5.2.3	Extrapolção dos parâmetros e validação do modelo SWAT para a bacia do rio Pajeú	68
5.3	CALIBRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA.....	74
5.3.1	Comparação entre a vazão observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida.....	75
5.4	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	77
5.4.1	Padrão atual e futuro de temperatura e precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	77
5.4.2	Padrão atual e futuro de temperatura e precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Brígida.....	78
5.5	CENÁRIOS DE EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA	80
5.6	CENÁRIOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA	82
5.6.1	Cenários de disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida	82
6	CONCLUSÕES.....	87

REFERÊNCIAS	91
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a manutenção dos sistemas naturais e socioeconômicos. Sua distribuição é condicionada a partir da atuação de diferentes fatores ambientais, políticos e culturais, que atuam em escalas geográficas distintas. De maneira mais generalista, o clima pode ser considerado fator determinante para a disponibilidade espaço-temporal dos recursos hídricos, ainda que outros associados à própria dinâmica de exploração por parte da sociedade também produzam efeitos significativos.

Dentro desse contexto, a relação mudanças climáticas e recursos hídricos figura como um dos temas mais debatidos por parte da comunidade científica, gestores públicos, grandes corporações, entidades ambientais e sociedade em geral. A preocupação se deve ao fato de que o aquecimento global modificará o padrão de precipitação pluviométrica em várias regiões do mundo, com potencial para reduzir a disponibilidade de água onde a oferta é inferior a demanda.

No Brasil, uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas é o Semiárido, que ocupa a maior parte do Nordeste. Esse domínio se caracteriza pela irregularidade e escassez de chuvas por longos períodos e altas taxas de evapotranspiração potencial, o que reflete, por conseguinte, em uma menor disponibilidade de água para usos difusos. Ainda assim, é importante ressaltar que a escassez e dificuldade de acesso à água na região não se justificam apenas pelo seu menor potencial pluviométrico, mas também por fatores de ordem socioeconômica e política.

O estado de Pernambuco não escapa a essa realidade, uma vez que a referida unidade federativa possui a maior parte do seu território inserida no domínio Semiárido. Por essa razão, ao longo da história, a população enfrentou e ainda enfrenta graves problemas associados a secas prolongadas e severas, que resultaram na escassez de alimentos, perdas de vidas humanas, prejuízos materiais e movimentos de migração em massa. Ou seja, as mudanças climáticas tornariam ainda mais grave um problema comum e secular.

Outro ponto a considerar é a própria evolução demográfica na região, que também é motivo de preocupação por parte dos gestores públicos. Se as mudanças climáticas possuem potencial para reduzir a oferta global de água no tempo e espaço, o crescimento populacional tende a aumentar ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos em função da crescente demanda para consumo doméstico e desenvolvimento de atividades voltadas para a economia local.

Atualmente, uma das principais maneiras de armazenar água na região se dá através da construção de barragens, que interrompem o curso do rio em um determinado trecho, a fim de formar um lago artificial denominado reservatório. Ainda assim, essa estrutura de armazenamento depende essencialmente das condições de tempo e clima. Assim, em anos de secas prolongadas, fenômeno comum na região, o sistema tende a entrar em colapso, o que frequentemente resulta em desabastecimento para a população. Além disso, a defasagem observada entre a capacidade de retenção de água e as diferentes demandas existentes figura como outra fonte de pressão.

O entendimento sobre a inter-relação que compreende os efeitos dos fenômenos naturais e socioeconômicos sobre os recursos hídricos demanda uma importante quantidade de informações para o eficaz monitoramento e gestão das bacias hidrográficas inseridas no Semiárido pernambucano. Por outro lado, ressalta-se que esse não é um procedimento simples. A relação mudanças climáticas e recursos hídricos é complexa e cercada de incertezas sob diferentes aspectos.

A necessidade de desenvolver um estudo amplo, que possa auxiliar no monitoramento de bacias hidrográficas, com a finalidade promover o desenvolvimento sustentável da região, nunca foi tão imperativa. A presente tese foi desenvolvida a partir dessa perspectiva, com vistas a contribuir para a produção de políticas públicas adequadas à realidade natural e social das áreas caracterizadas por apresentarem menor potencial hídrico.

Este estudo ofereceu continuidade a pesquisa desenvolvida por Ferreira (2017), intitulada “Modelagem Hidrológica para Estimativa da Vazão na Bacia Hidrográfica do rio Brígida e a Disponibilidade Hídrica Frente às Mudanças Climáticas”. O autor utilizou técnicas de modelagem hidrológica, climática e demográfica para avaliar o grau de vulnerabilidade da população residente na bacia do rio Brígida, a partir de diferentes cenários climáticos (aumento e diminuição das condições de umidade) e populacionais.

O estudo trouxe contribuições para a gestão dos recursos hídricos na região e acendeu o alerta sobre risco que as mudanças climáticas e demográficas representam para a população como um todo. Entretanto, a pesquisa fez surgir questionamentos inquietantes do ponto de vista técnico e ambiental. O primeiro refere-se à aplicação do *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), modelo hidrológico escolhido para representar os processos hidrológicos da referida unidade ambiental. Esse tipo de simulador necessita de dados observados de vazão para ajuste e validação das predições, procedimentos imprescindíveis para a confiança do resultado gerado.

Entretanto, a disponibilidade de informações sobre essa variável para a região do rio Brígida é limitada, sobretudo no que se refere a espacialidade. Ao calibrar apenas um trecho do rio, o autor admitiu que a região é homogênea o suficiente para permitir a extrapolação dos parâmetros físicos ajustados para as demais áreas da referida unidade de observação. Esse procedimento levanta a primeira importante questão: as bacias do Semiárido, inseridas no estado de Pernambuco, possuem atributos físicos como solos, relevo, vegetação, entre outros, distribuídos de maneira a permitir esse tipo de procedimento? O segundo questionamento é atrelado a perspectiva ambiental e demográfica: os resultados encontrados sobre a variação da disponibilidade hídrica podem ser considerados realidade para todo o Semiárido pernambucano, principalmente para as bacias cuja disponibilidade de dados físicos é insuficiente ou inexistente?

As questões elencadas refletem uma realidade desafiadora para o desenvolvimento de estudos no campo da modelagem de sistemas ambientais, mais precisamente para a modelagem hidrológica. A representação matemática dos fenômenos e processos físicos, muitas vezes, esbarra na falta de informações com um nível de qualidade que, frequentemente, não é observado para a maior parte do território pernambucano. Enfrentar essa questão não é tarefa simples e requer certo nível de criatividade, experiência e persistência por parte dos pesquisadores.

Os problemas ambientais observados para a região, associados às novas ameaças que se desenham para o futuro próximo, precisam de respostas urgentes. Nesse sentido, a presente tese deu continuidade ao estudo mencionado anteriormente, com vistas a responder não só as questões destacadas, mas também com o objetivo de contribuir com a gestão dos recursos hídricos e avanço científico. Para essa finalidade, além da bacia hidrográfica do rio Brígida, também foi selecionada a do rio Pajeú. As duas unidades, juntas, ocupam a maior parte do Semiárido pernambucano. Também são consideradas bacias estratégicas do ponto de vista ambiental, uma vez que se verifica intensa exploração dos recursos naturais para desenvolvimento de atividades como a agricultura de sequeiro, agricultura irrigada, indústria gesseira e de cerâmica.

A bacia do rio Pajeú, mais especificamente, conta com uma disponibilidade de dados satisfatória para o desenvolvimento de estudos dessa natureza. Assim, essa foi considerada referência para as investigações desenvolvidas e fundamental para os testes realizados no sentido de confirmar ou refutar a hipótese norteadora, que por conseguinte, determinou as respostas para as questões anteriormente elencadas. Desse modo, esta tese foi constituída a partir de uma abordagem interdisciplinar, que reúne análises integradas a partir de uma

perspectiva técnica, metodológica e ambiental. Assim, pôde-se oferecer respostas mais consistentes para a compreensão e enfrentamento da problemática que envolve a escassez hídrica no Semiárido pernambucano.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

Seção destinada à hipótese norteadora do estudo e aos objetivos propostos para alcançar as respostas.

2.1 HIPÓTESE

As bacias hidrográficas do semiárido pernambucano possuem características físico-naturais comuns entre elas que permitem a calibração e validação de modelos hidrológicos de forma indireta, possibilitando o desenvolvimento de estudos preditivos para o monitoramento e gestão ambiental.

2.2 OBJETIVOS

Objetivos geral e específicos propostos para a presente tese.

2.2.1 Objetivo geral

Determinar e analisar a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas de áreas semiáridas frente a cenários de mudanças climáticas e demográficas, como subsídio à gestão ambiental.

2.2.1 Objetivos específicos

- Determinar as mudanças espaciais e temporais do uso e cobertura da terra para as bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú;
- Calibrar e validar, direta e indiretamente, o modelo hidrológico SWAT para estimativa das vazões dos rios Brígida e Pajeú;
- Simular cenários de mudanças climáticas para as bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú;
- Projetar a população total da região que compreende das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida;

- Estimar a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú, frente a cenários climáticos e de evolução populacional.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura aqui exposta traz uma estrutura organizacional baseada nos objetivos específicos propostos, de modo a oferecer sustentação teórica para esses e para os resultados encontrados.

3.1 USO E COBERTURA DA TERRA

Segundo manual técnico de *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 1999), entende-se que o uso e cobertura da terra é composto por diferentes estruturas, condicionadas a partir da atuação de forças naturais e humanas. Os grupos humanos exercem um conjunto de atividades e práticas sobre as superfícies, transformando-as para melhor atender as demandas sociais, culturais e econômicas. Esse é um dos atributos bem utilizados em estudos mais generalistas em relação aos alvos dispostos na superfície, visto que geralmente são empregadas escalas com menor nível de detalhamento espacial.

As transformações mencionadas têm sido apontadas como uma das principais causas para os impactos observados sobre os ecossistemas aquáticos e terrestres, entre os quais pode-se destacar a redução da disponibilidade hídrica, mudanças climáticas, desertificação, aumento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, assoreamento dos rios e perda da biodiversidade animal e vegetal (OP DE HIPT et al., 2019; SHIRMOHAMMADI et al., 2020).

Nas últimas décadas, a temática envolvendo os impactos das alterações no uso e cobertura da terra sobre recursos hídricos recebeu atenção especial, dada a magnitude dos eventuais efeitos para os sistemas naturais e socioeconômicos. Trabalhos como os conduzidos por Bai, Ochuodho e Yang (2019), Gabiri et al. (2019) e Ridwansyah et al. (2020), destacaram que a associação entre os problemas ambientais anteriormente elencados, frequentemente originados das práticas de desmatamento, têm contribuído de maneira importante para o aumento da escassez hídrica em várias regiões.

Entre os exemplos que podem ser citados, está o estudo desenvolvido por Woldesenbet et al. (2017) no norte da África, nas bacias hidrográficas dos rios Tana e Beles, no Alto Nilo Azul, Etiópia. Os autores utilizaram o modelo hidrológico SWAT para estimar os impactos das alterações no uso da terra sobre os processos hidrológicos das referidas unidades ambientais. Os resultados sugeriram que a expansão das áreas de cultivo, associada à redução da mata nativa, contribui significativamente para aumento do escoamento superficial,

produção de sedimentos, declínio da infiltração e acumulação de águas subterrâneas e evapotranspiração.

Resultados semelhantes foram encontrados por Teklay et al. (2019), também para região etíope, porém na bacia hidrográfica do rio Gummara. Os pesquisadores identificaram que o aumento de 11,1% das terras destinadas à agricultura e redução de 2,3% das florestas nativas foram decisivos para que o escoamento superficial médio anual e a vazão máxima da bacia sofressem incremento de 11,6 mm e 2,4 m³/s, respectivamente, entre 1985 a 2015.

Para o continente asiático, mais precisamente na Índia, Munoth e Goyal (2020) empregaram o modelo SWAT para simulação dos impactos das alterações no uso e cobertura da terra, entre os anos de 1975 e 2016, sobre o ciclo hidrológico na sub-bacia do rio Tapi. Nas análises, os autores constataram que as áreas agrícolas cresceram 18% durante esse intervalo, enquanto os espaços ocupados por florestas nativas e pastagens diminuíram 7% e 10%. Isso resultou em um significativo aumento do escoamento superficial, cerca de 36%, produção de água, 22%, e de sedimentos 22%.

Os resultados dos estudos supracitados seguiram a mesma direção que outros realizados anteriormente por Abdalla et al. (2013), López-Moreno et al. (2014) e Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013). Por outro lado, a resposta hidrológica às alterações no uso e cobertura da terra variam de maneira importante em relação a escala geográfica e temporal, como sugerem Tamm et al. (2018). Os autores ressaltaram, através de simulações realizadas em bacias hidrográficas localizadas ao norte da Europa, que existe uma forte correlação linear entre as modificações nas áreas florestais e a variação anual da vazão dos rios. Entretanto, sugerem que os impactos são mais relevantes em escala anual. Quando as análises foram realizadas em escala de sub-bacias, o padrão de variação do fluxo não respondeu de maneira importante à remoção da cobertura vegetal.

No Brasil, a resposta dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas ao desmatamento não foge ao que foi encontrado nos estudos anteriormente citados, para diferentes regiões. De acordo com Souza et al. (2019), que estimaram a vazão de uma bacia hidrográfica da região amazônica, frente aos avanços das áreas desmatadas, o crescimento de 45% das classes de pastagem foi decisivo para o significativo aumento da vazão rio Machadinho, localizado no estado de Rondônia.

3.1.1 Uso e cobertura da terra e mudanças climáticas

Segundo Mitchard (2018), a vegetação exerce importante papel no sequestro e estocagem de CO₂, contribuindo de maneira importante para o balanço global de carbono. Dessa forma, naturalmente, as alterações no uso e cobertura da terra, principalmente àquelas associadas a remoção da cobertura vegetal nativa, causam desequilíbrio no referido balanço, uma vez que diminuem o potencial de sequestro de CO₂ dessas áreas e contribuem, em um efeito reverso, para maior liberação através do material decomposto.

De acordo com Strandberg e Kjellström (2019), o desmatamento é uma prática decisiva para a mudança climática em escala local. Além das questões relacionadas ao balanço de carbono, há significativa alteração nos valores de albedo, o que contribui para a diminuição das taxas de evapotranspiração, assim como para o aumento da temperatura de superfície e, por conseguinte, do ar.

Isso foi reforçado a partir da pesquisa desenvolvida por Prevedello et al. (2019). Os autores utilizaram imagens de satélite para cobrir o período entre 2000 e 2010, com o objetivo de avaliar os efeitos do desmatamento sobre as temperaturas locais em todo o globo. Os resultados apontaram para um aquecimento médio que variou entre 0,02 e 0,38 °C e 0,01 e 0,16 °C para as áreas tropicais e temperadas, respectivamente. O estudo indicou ainda que as regiões tropicais apresentaram maior sensibilidade na relação entre as mudanças na cobertura vegetal e o clima, com aumento entre 0,25 e 1,08 °C, associado ao desmatamento de aproximadamente 50% das áreas florestais.

Outros estudos como os empreendidos por Devaraju et al. (2018), Houspanossian et al. (2017), Lejeune et al. (2018) e Scott et al. (2018) discutiram sobre a importante relação entre as alterações no uso e cobertura da terra e modificações climáticas em diferentes escalas, seja a partir de análises históricas ou projetadas para o futuro. As análises só vieram a reforçar o que já era amplamente discutido e objeto de consenso entre diversos pesquisadores.

Dada a importância desse atributo para compreensão dos problemas ambientais, parte da comunidade científica passou a despende esforços no sentido de desenvolver pesquisas, métodos e tecnologias que possibilitassem o monitoramento e gestão ambiental de forma mais eficiente. Essa tendência foi acelerada diante dos avanços nas pesquisas aeroespaciais, com o lançamento de satélites que passaram a orbitar o globo terrestre.

Apesar de a corrida aeroespacial ter se iniciado por volta de 1957, foi a partir de 1970 que o uso de imagens de satélites se consolidou, graças ao início da série Landsat. Posteriormente, outros satélites e sensores foram desenvolvidos e empregados para fins

militares, planejamento territorial e monitoramento ambiental. Entre eles, pode-se destacar os programas SPOT, ALOS, CBERS, ENVISAT. A gama de dados e informações derivadas das referidas tecnologias tem sido disponibilizada em sites ligados a instituições públicas e privadas. Desse modo, nem todos os produtos são disponibilizados gratuitamente (NOVO, 2008).

O livre e facilitado acesso aos produtos oriundos do programa Landsat, que conta com uma série histórica com mais de 40 anos, impulsionou sua utilização em estudos ambientais em várias partes do mundo (ALLAM; BAKR; ELBABLY, 2019; JIMÉNEZ et al., 2018; KETEMA et al., 2020; PHALKE et al., 2020; ROUSTA et al., 2018; SHI et al., 2017; WELLMANN et al., 2020; ZAIDI et al., 2017).

No território brasileiro, a preocupação com as questões associadas ao desmatamento deu origem ao Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias). Esse foi iniciado em março de 2015, durante seminário em São Paulo, e contou com a presença de diversos especialistas da área de sensoriamento remoto. Entre os principais objetivos norteadores, destaca-se o de desenvolver e implementar uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para a produção de mapas anuais de cobertura e uso do solo, a partir de 1985, até os dias atuais e posteriores. A série é baseada em imagens orbitais geradas por meio dos satélites Landsat (MAPBIOMAS, 2020).

Um dos estudos de notoriedade sobre a base de dados do MapBiomias foi realizado por Neves et al. (2020), que compararam os resultados obtidos com os do projeto de mapeamento TerraClass, para a região do bioma Amazônia. Na avaliação, baseada em matrizes de concordância, os autores destacaram que existe uma correspondência de 87,4% entre o TerraClass x MapBiomias 2 e de 92% para o TerraClass x MapBiomias 3.

Outra importante pesquisa se deu na Reserva da Biosfera do Cerrado, em que Brito e Silva (2019) utilizaram a base de dados para uma análise multitemporal do uso e cobertura da terra entre os anos de 2001 e 2016. Os resultados apontaram que 15,000 km² de vegetação nativa foram convertidos para uso antrópico. Desse total, 53,5% ocorreram durante o intervalo compreendido entre 2004 e 2008, o que corresponde a apenas 26,6% do período analisado.

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

De acordo com Tucci (2005), a modelagem hidrológica, em escala de bacias hidrográficas, representa um procedimento de suma importância para o monitoramento dos recursos hídricos, simulação e predição dos processos hidrológicos. Estruturalmente, um

simulador hidrológico é capaz de representar os fluxos de água em uma superfície e subsuperfície, ao considerar a influência e interação dos diferentes componentes do sistema.

Os primeiros modelos hidrológicos surgiram em 1930. Esses, ainda eram considerados simplistas, dado o estado da arte até o momento. Mas a partir de 1945, com as experiências conduzidas pelo hidrólogo Horton, passou-se a obter resultados mais expressivos. Em seus ensaios, o pesquisador, de maneira revolucionária, conseguiu simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas. Tais experiências nortearam os demais estudos produzidos por outros autores (BEVEN, 2004; BRUNET; FERRAS, 1998; CHRISTOFOLETTI, 2004).

Posteriormente, a revolução computacional, iniciada por volta de 1950, trouxe profundas modificações para a história da modelagem hidrológica. A maior capacidade de processamento dos computadores, associada aos avanços nos conhecimentos sobre a temática, impulsionou o surgimento de novos simuladores, que foram se tornando cada vez mais robustos e complexos, como o *Streamflow Simulation and Reservoir Regulation* (SSARR), *Topography Model* (TOPMODEL), *Kinematic Erosion* (KINEROS) e *Cascade Two-Dimensions* (CASC2D).

O aumento da complexidade dos modelos hidrológicos trouxe novos desafios para os pesquisadores que lançavam mão dessa ferramenta. Isso porque o processo de calibração desses, que consiste em ajustar o modelo para a realidade física das bacias em função dos erros das entradas, se tornou mais complexo devido ao incremento no número de parâmetros que precisavam ser estimados, compreendidos e ajustados (SONG et al., 2015).

3.2.1 Calibração de modelos hidrológicos e análise de incertezas

A calibração é um dos procedimentos que representa grande desafio para o ajuste dos parâmetros de um determinado modelo, dado o tempo despendido para isso, além da dificuldade de obtenção de informações de campo em alguns países, assim como a própria estrutura conceitual dos modelos. Por essa razão, uma série de métodos estatísticos foram desenvolvidos ou adaptados para a avaliação da capacidade de um modelo simular, com certo grau de confiabilidade, os processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Um dos amplamente utilizados, e com elevado grau de confiabilidade, é o índice de eficiência Nash-Sutcliffe.

A abordagem proposta por Nash e Sutcliffe (1970) tem por objetivo verificar a concordância ou discordância entre a comparação do escoamento superficial simulado e o

observado. O intervalo de variação do coeficiente vai de $-\infty$ a 1. Para um ajuste perfeito, o valor do coeficiente deve ser igual ou próximo a 1. Quando o resultado for ≤ 0 , significa que o modelo é incapaz de representar os fluxos de água em uma dada bacia hidrográfica.

Além do Nash-Sutcliffe, outros métodos passaram a ser incorporados nas análises, seja para complementar e reforçar os resultados obtidos, ou para realizar outros tipos de avaliações. Entre os mais utilizados, destaca-se o *Percent Bias* (PBIAS), que indica a confiabilidade da simulação frente ao volume do escoamento superficial. Seu intervalo varia entre -25% e 25%. Quando positivos, indicam que há subestimativa da vazão, enquanto os negativos referem-se aos fluxos superestimados (BHATTA et al., 2020).

Outros métodos empregados na calibração e validação dos modelos são o *p-factor*, *r-factor*, coeficiente de determinação linear (R^2) e *ratio of the root mean Square error to the standard deviation of measured data* (RSR) (THAVHANA; SAVAGE; MOELETSI, 2018).

Além das questões associadas diretamente à avaliação de desempenho dos modelos, alguns pesquisadores têm se preocupado com os aspectos voltados para as análises de incertezas, tornando-as objeto central de suas investigações (RAFIEI EMAM et al., 2018; SHRESTHA; KAYASTHA; SOLOMATINE, 2009; SIKORSKA; RENARD, 2017; ZHAO et al., 2018).

De acordo com Moges, Demissie e Li (2020), as incertezas acerca da modelagem hidrológica referem-se à estrutura conceitual dos modelos, que abrange as equações empregadas, assim como os submodelos acoplados, à percepção e experiência do pesquisador sobre os aspectos da modelagem e às incertezas inerentes aos dados de entrada. Desse modo, o acúmulo de erros nas diferentes etapas do projeto pode influenciar negativamente no resultado final das simulações.

Devido a essas questões, alguns métodos estatísticos como o *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (PARASOL), *Markovchain Monte Carlo* (MCMC) e *Importance Sampling* (IS) e *Sequential Uncertainties Fitting Version-2* (SUFI-2) vêm sendo empregados no sentido de realizar análises de incertezas. Por outro lado, testes desenvolvidos por Yang et al. (2008) demonstraram que o SUFI-2 se destaca positivamente entre os demais. Segundo Alegre, Clara e Franco (2017), o SUFI-2 é um algoritmo que permite ao usuário informar a margem de erro, em porcentagem, relacionada aos dados de entrada. Esse percentual de incerteza é frequentemente definido pelo pesquisador, a partir de sua percepção sobre os dados obtidos em campo.

Em relação à adoção em um determinado intervalo de variação de incertezas, na ampla literatura que aborda essa temática, é possível encontrar aplicações com o SUFI-2 que

admitem níveis que variam entre $\pm 20\%$ e 60% (ALEGRE; CLARA; FRANCO, 2017; HEISTERMANN; MÜLLER; RONNEBERGER, 2006; SHAWUL; ALAMIREW; DINKA, 2013; VILAYSANE et al., 2015).

Ficou claro nos ensaios supracitados que a análise de incertezas é fundamental para avaliar os resultados da calibração. Isso porque, uma simulação de vazão que apresente um coeficiente de NSE próximo de 1 não indica, necessariamente, que o modelo é capaz de realizar previsões seguras. Se o intervalo de incertezas admitido estiver próximo de 100% (irreal), por exemplo, isso viria a comprometer as simulações de longo período.

As utilizações do algoritmo SUFI-2 vão desde o desenvolvimento de estudos voltados para as questões ambientais e de monitoramento (ZHANG et al., 2020), à análises de desempenho entre diferentes modelos, como ficou claro no trabalho desenvolvido por Chen et al. (2019), que compararam o grau de concordância e eficiência dos modelos SWAT e HSPF.

3.2.2 O modelo hidrológico SWAT

Dentre os simuladores que ganharam bastante notoriedade devido à robustez dos resultados fornecidos, pode-se destacar o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O SWAT é um modelo semi-distribuído, capaz de representar os processos físicos em bacias hidrográficas, o que permite simular, no tempo e espaço, escoamento superficial, produção de sedimentos, evapotranspiração, infiltração de água no solo, efeitos do clima sobre os recursos hídricos, entre outros. Esse foi desenvolvido nos Estados Unidos, porém, as aplicações foram difundidas graças a fácil integração com *interfaces* gráficas de SIGs como ArcGis e QGIS (NEITSCH et al., 2009).

O modelo SWAT é baseado na metodologia da Curva Número (CN), desenvolvida por *United States Department of Agriculture* (USDA) no ano de 1954, para estimativa do escoamento superficial. Esse método emprega um conjunto de informações inerentes à dinâmica hidrológica dos componentes solo-vegetação, que envolve o tipo e características de uso e cobertura da terra, umidade inicial e condições hidrológicas do solo. Em ambientes com características físico-naturais mais específicas e complexas, há a necessidade de realizar ajustes. Ainda assim, esse é um dos métodos mais conhecidos e utilizados em função do reduzido número de parâmetros, o que o torna menos complexo (LIAN et al., 2020).

Segundo Arnold et al. (2012), a estrutura conceitual do modelo permite a inserção de mapas georreferenciados de uso e cobertura da terra, solos e declividade, assim como dados climatológicos oriundos de estações pluviométricas e meteorológicas. Ainda de acordo com

os autores, para efeito de modelagem, o SWAT subdivide a bacia hidrográfica delimitada em sub-bacias e microbacias. Dentre as principais vantagens desse método, destaca-se a possibilidade de simular cenários ambientais para diferentes áreas, com características físico-naturais distintas.

As vantagens oferecidas pelo SWAT fizeram do modelo um dos mais utilizados no mundo, com aplicações voltadas para as áreas ambiental, agroecológica e climática. Entre os primeiros estudos de notoriedade no mundo, destacam-se três. O primeiro foi conduzido dentro do projeto *Hydrologic Unit Model of the U.S* (HUMUS), nos Estados Unidos, empregado para avaliar os impactos do uso de poluentes agrícolas sobre a disponibilidade hídrica. Esse resultou na criação de um amplo banco de dados, capaz de representar os processos físicos e hidrológicos de todo o território americano (ARNOLD et al., 1999).

No continente africano, Schuol et al. (2008) deram andamento ao segundo estudo mais expressivo com aplicações do SWAT. Nessa investigação, foram modeladas as quatro bacias mais extensas da região, com o propósito de realizar previsões hidroclimáticas. Os resultados apresentaram elevado grau de incertezas. Mais tarde, Faramarzi et al. (2013), utilizaram a base de dados criada para o continente para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de “água doce”. Com alguns ajustes nos dados de entrada do ensaio anterior, os pesquisadores alcançaram seu principal objetivo e concluíram que as simulações apontaram ganhos e perdas hídricas, conforme variação espacial.

O terceiro estudo, que também possui dimensões continentais, foi desenvolvido por Abbaspour et al. (2015) para a Europa. Os autores determinaram a variação da disponibilidade espaço-temporal da água na região. Com resultados classificados como satisfatórios, concluiu-se que as análises deveriam ser realizadas a nível de sub-bacia, pois isso ajudaria na melhor compreensão da distribuição espacial e temporal da água.

Outras aplicações, de menor dimensão espacial, estão disponíveis na vasta literatura que trata sobre a utilização do SWAT para diferentes ambientes e objetivos. Para o continente asiático, mais precisamente na China, por exemplo, Shi et al. (2019) empregaram o modelo para avaliar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra e da construção de barragens sobre os processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Wuding. Nesse estudo, observou-se que houve tendência, significativa, de redução do escoamento superficial e produção de sedimentos. Os resultados também revelaram que as atividades antrópicas são responsáveis por pelo menos 75% das alterações observadas.

Ainda na China, Zhang et al. (2019b), simularam os efeitos do desmatamento e das alterações climáticas no escoamento superficial e produção de sedimentos na bacia

hidrográfica do rio Zhenjiangguan. Os resultados encontrados indicaram que uma alteração de 10% na precipitação pluviométrica anual é capaz de reduzir ou aumentar o escoamento superficial em torno de 10 a 14% e de 17 a 24% quando considerada a produção anual de sedimentos. Quanto à temperatura, o aumento de 0,7 °C pode resultar em uma diminuição de 1,4% a 2% no escoamento anual e de 2% a 3,7% para o rendimento anual de sedimentos.

Para a América Central e do Sul, as aplicações com SWAT ainda são limitadas devido à dificuldade de obtenção de dados de entrada. Entre as pesquisas de notoriedade, destaca-se o trabalho desenvolvido por Setegn et al. (2014) na bacia hidrográfica do rio Cobre, Jamaica. Os autores optaram por investigar a variação sazonal da vazão do referido rio. Porém, a análise foi comprometida, visto que o modelo não apresentou bom desempenho na etapa de calibração, uma vez que o Nash-Sutcliffe encontrado variou entre 0,51 e 0,58, enquanto o R^2 máximo foi de 0,69. A razão principal para isso seria o elevado nível de erro associado à distribuição espacial da precipitação. Ainda assim, os pesquisadores indicam que foi possível observar o padrão de variação da vazão na região.

Para a América do Sul, destaca-se o trabalho conduzido por Fernandes (2015), cujo objetivo foi avaliar a viabilidade do uso do modelo SWAT para estimar vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, Brasil. Os resultados encontrados durante a análise de desempenho do SWAT indicaram que o modelo foi capaz de representar bem os processos hidrológicos característicos da bacia. A eficiência foi atestada por meio da aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe, que variou entre 0,66 a 0,99, enquanto o R^2 foi de 0,64 a 0,99.

3.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De acordo com Nota técnica nº 79 de Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1966), entende-se como mudança climática as modificações persistentes, estatisticamente verificadas, nos padrões climáticos de uma determinada região.

Segundo Ferreira et al. (2017), no passado geológico, a Terra, naturalmente, passou por diversos processos de resfriamento e aquecimento, causados por fatores exclusivamente naturais, como erupções de vulcões, movimento de placas tectônicas, variação da radiação solar, posicionamento da Terra em relação ao Sol, choque com corpos celestes, entre outros. As mudanças ocorreram em escalas temporais e espaciais variadas, como resultado das diferentes características e níveis, formas de combinação e intensidade dos fatores atuantes.

Nas últimas décadas, parte significativa da comunidade científica vem dedicando esforços para investigar uma possível interferência humana na dinâmica climática global. Segundo Tong e Ebi (2019), esse processo estaria associado ao aumento da concentração atmosférica de gases do efeito estufa, que têm apresentado significativo crescimento desde a Revolução Industrial, mas com maior nível de liberação nas últimas cinco décadas. Saini, Sharma e Kumar (2018) pontuaram que entre os principais gases que contribuem para as alterações climáticas, destaca-se dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

A emissão de gases estufa resulta da queima de combustíveis fósseis por parte das termoelétricas, indústrias e automóveis. No mundo, os maiores produtores de CO_2 , gás compreendido como principal controlador do aquecimento global, são Estados Unidos e China, devido à elevada atividade industrial e tamanho da frota de veículos (KHOCHIANI; NADEMI, 2020). Em países que apresentam baixa atividade industrial e economia essencialmente agrícola, como é o caso do Brasil, a maior parte das emissões atmosféricas são oriundas das alterações no uso e cobertura da terra.

O desmatamento representa a segunda maior causa do aquecimento global e uma das que têm maior influência no aumento médio da temperatura de superfície (COPERTINO et al., 2019). Segundo Winckler et al. (2019), a remoção da cobertura vegetal nativa produz maiores impactos, em termos de temperatura de superfície e do ar, em escala local, porém, são verificadas influências em regiões vizinhas e remotas.

3.3.1 Projeções climáticas

As predições sobre o clima se tornaram objeto de estudo para muitos cientistas, dadas as incertezas relacionadas aos possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre os sistemas naturais e socioeconômicos. Isso porque, a mudança no clima funciona como um sistema de retroalimentação. Ou seja, impactos ambientais decorrentes de alterações climáticas, como a desertificação (LI et al., 2016; YAN et al., 2018), alterações no ciclo hidrológico (KUNDZEWICZ et al., 2018), perda da biodiversidade animal e vegetal (NOGUÉS-BRAVO et al., 2018), por exemplo, passam a alimentar as causas.

Diante de tais questões, o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de projetar a dinâmica atmosférica vem crescendo dentro dos principais centros de pesquisas do mundo. Segundo Geoffroy et al. (2013), a partir da representação tridimensional dos sistemas atmosféricos, esses simuladores de clima são capazes de representar matematicamente os

principais processos relacionados ao balanço de energia global, considerando as inter-relações das componentes do sistema e os mecanismos de alimentação dos processos físicos.

De modo geral, os modelos climáticos podem ser divididos em dois grupos, a partir das suas respectivas resoluções espaciais. O primeiro engloba os modelos climáticos globais, com resoluções espaciais que varia normalmente entre 300 e 500 km. Enquanto o segundo grupo abarca os modelos regionais que apresentam maior detalhamento, com resoluções espaciais que podem variar entre 25 e 50 km (ARRIETA, 2012).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), frequentemente, utiliza em seus relatórios os resultados obtidos a partir de simuladores climáticos globais, baseados em forçastes controladoras como aumento da concentração de gases estufa, mudanças na tecnologia e crescimento populacional. A partir dessas informações, são gerados cenários climáticos classificados como otimistas (baixas emissões) e pessimistas (altas emissões) (IPCC, 2007; 2013).

No Brasil, há estudos cujos resultados foram baseados em modelos climáticos globais. Dentre os trabalhos de notoriedade no país, pode-se destacar o conduzido por (MARENGO, 2006), que utilizou simuladores como o *Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO-Mk2), o *Canadian Center for Climate Modeling and Analysis* (CCCMA), produzido no Canadá, o *National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA-Geophysical Fluids Dynamic* (GFDL-CM2), dos Estados Unidos, e o *Center for Climate Studies and Research CCSR/National Institute for Environmental Studies* (CCSR/NIES).

Os modelos foram empregados para predição de cenários de temperatura e precipitação pluviométrica sobre diferentes regiões. Para o Nordeste, por exemplo, o autor utilizou um conjunto de simuladores, entre os quais pode-se destacar o GFDL, CCCMA e MIROC. Um ponto em comum entre os três modelos refere-se ao aumento da temperatura média na região. Porém, quando considerado o regime de chuvas, o GFDL e CCCMA indicaram aumento do volume, enquanto o MIROC indicou redução sistemática das chuvas, para todos os cenários considerados.

Os resultados demonstraram que ainda há um conjunto de incertezas relacionadas à predição de cenários climáticos futuros, uma vez que os modelos desenvolvidos possuem variáveis que são consideradas e dinamizadas de maneiras distintas. Isto fica claro quando é realizada uma rápida comparação entre os três modelos em questão. De acordo com Jiang et al. (2012), o GFDL, por exemplo, possui resolução de $2,5^\circ \times 2^\circ$ para componente atmosférico, com 24 níveis verticais. Em relação à componente oceânica, verifica-se $1^\circ \times 1^\circ$, porém o nível

de “detalhamento” é perdido na medida em que se ultrapassa a linha dos 30° de latitude Norte ou Sul.

Em relação ao CCCMA, o modelo dispõe de resolução oceânica com 1,8° x 1,8° e 29 níveis verticais, para uma resolução espacial de 1,9° x 1,9°. Quanto ao MIROC, esse apresenta maior nível de detalhamento quando comparado aos anteriores. O modelo conta com 0,5° - 1,4° x 1,4° e 47 níveis verticais para componente oceânica. Outro ponto de destaque em relação ao MIROC é a inclusão dos efeitos dos gases estufa, assim como a variação da radiação solar, considerada constante no GFDL e CCCMA.

Os modelos climáticos globais ainda apresentam certo nível de incertezas quanto às simulações de precipitação pluviométrica para escala regional (SALMAN et al., 2018; SHEN et al., 2018). Por essa razão, houve significativo incremento no uso de simuladores climáticos regionais, capazes de fornecer maior detalhamento e precisão quanto à distribuição e a intensidade das mudanças dessa variável.

Para a América do Sul, um dos modelos regionais empregados para predição das anomalias de temperatura e precipitação pluviométrica é o Eta, do CEPTEC-INPE, derivado do ECHAM-Eta e HadCM-Eta. Esse é capaz de representar as anomalias de temperatura e precipitação pluviométrica para os intervalos entre 2010 e 2040, 2041 e 2070 e 2071-2100. Sua resolução horizontal varia entre 20 e 40 km, com 38 camadas de níveis verticais (SINCHAN, 2020).

3.3.2 Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico

Segundo Miranda et al. (2010), o ciclo hidrológico corresponde à sucessão de processos através dos quais a água inicia seu percurso até retornar a anterior posição “primitiva”. Na perspectiva sistêmica, o ciclo é classificado como um sistema fechado, em escala global, em que a interação da água com as superfícies terrestres e atmosfera tem como forças motrizes a radiação eletromagnética emitida pelo Sol, força gravitacional e movimento de rotação terrestre. Todavia, Ma et al. (2018) pontuam que a distribuição espacial e temporal da água obedece, basicamente, ao padrão climático de uma determinada região, sua variabilidade e possíveis mudanças.

Dentro desse contexto, a relação entre as mudanças climáticas e os recursos hídricos se tornou objeto de numerosas pesquisas (DISTEFANO; KELLY, 2017; GONZÁLEZ-ZEAS et al., 2019; LUO et al., 2018; NORTHEY et al., 2017; WANG et al., 2017, 2020; ZHANG et

al., 2019a), desenvolvidas em diferentes ambientes e que partem de metodologias variadas, para as quais têm-se obtido resultados diversos.

Como a precipitação pluvial é considerada elemento importante no que se refere à distribuição hídrica, esta variável climática tem se destacado nos estudos sobre a temática. Entre os trabalhos mais relevantes, destaca-se o conduzido por Bates et al. (2008) para o continente africano, Tabari e Talaee (2011), na região geopolítica compreendida como Oriente Médio, e Gallant, Karoly e Gleason, (2014), para a maior parte Estados Unidos e todo continente europeu.

Os resultados revelaram tendência de diminuição das chuvas para a maioria das estações pluviométricas pesquisadas. Em relação aos dados analisados para a América do Sul, estes revelaram aumento das condições de umidade para a porção sudeste. Entretanto, para parte ocidental do continente e região Nordeste do Brasil, houve tendência de redução das chuvas.

Análises mais específicas, que relacionam os efeitos do clima sobre o ciclo hidrológico, também vêm sendo desenvolvidas em várias partes do mundo. Anjum et al. (2019), desenvolveram um ensaio para uma região subtropical úmida, no norte do Paquistão. Os autores utilizaram modelos climáticos como o BCC-CSM, CCSM4, MIROC5, MRI-CGCM3, entre outros, com o objetivo de projetar dados de chuva e temperatura e assim simular cenários de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Swat, até o final da segunda metade do presente século.

Os resultados indicaram significativo aumento da vazão, com intervalos variando entre 3 e 44,4% em relação ao período de referência (1981-2010). Todos os modelos empregados indicaram aumento da precipitação para o período chuvoso, redução para o seco e aumento persistente da temperatura média. Estes resultados, com certas variações, segundo os autores, são semelhantes aos encontrados em estudos conduzidos na Índia (SHARMILA et al., 2015) e Malásia (TAN et al., 2017).

Outro destaque foi a pesquisa conduzida na China por Zhang et al. (2019), na bacia hidrográfica do rio Zhenjiangguan. O clima na região é classificado como seco, com precipitação média anual em torno de 570 mm. A partir de cenários climáticos hipotéticos para predição do escoamento superficial e produção de sedimentos, os autores identificaram que a precipitação é fator determinante para as mudanças. Uma variação de $\pm 10\%$ no volume de chuvas, por exemplo, é capaz de produzir uma alteração de 10 a 14% no escoamento superficial e de 17% a 24% na produção de sedimentos. Em relação à temperatura, a cada

aumento de 0,7 °C, verificou-se redução de 1,4 a 2% no escoamento anual e de 2 a 3,7% na produção anual de sedimentos.

No Brasil, em Pernambuco, Silva, Lima Montenegro e Souza (2017) realizaram um amplo estudo cujo objetivo foi verificar possíveis evidências de processos relacionados às mudanças climáticas por meio de índices de temperatura e precipitação pluviométrica. Os resultados indicaram tendência de aumento da temperatura média do ar e redução das chuvas em algumas bacias hidrográficas do estado, aumentando a aridez da região.

3.4 MUDANÇAS DEMOGRÁFICAS

A demografia compreende a área da ciência geográfica que busca estudar as questões inerentes à dinâmica e processos populacionais. A preocupação com a evolução da população global se tornou objeto de estudo devido à relação estabelecida entre o crescimento populacional e intensificação exploração dos recursos naturais.

Os estudos sobre a dinâmica populacional se iniciaram entre os séculos XVII e XVIII, com as formulações do economista britânico Thomas Robert Malthus, considerado pai da Demografia. Em suas análises, Malthus associou o crescimento populacional acelerado à escassez de alimentos, propagação de doenças e avanço da miséria. De acordo com o autor, a população aumentaria segundo uma progressão geométrica, enquanto a produção de alimentos cresceria a uma taxa aritmética. Essa incompatibilidade resultaria em um colapso social. Entre suas propostas para enfrentamento, estaria o controle da natalidade por meio do Estado (ASCHE; SMITH, 2018).

Obviamente, Malthus não previu o significativo avanço tecnológico que houve nas décadas que se seguiram. Avanços esses que foram fundamentais para o aumento da produção de alimentos e desconstrução de sua teoria. Entretanto, suas formulações foram utilizadas, posteriormente, como ponto de partida para novas hipóteses, entre as quais está a proposta que ficou conhecida como Neomalthusianismo ou Ecomalthusianismo. Seus defensores difundiram a ideia de que o crescimento populacional descontrolado seria um fator determinante para o aumento da pressão sobre recursos naturais. Isso resultaria na degradação ambiental, o que, por conseguinte, viria a comprometer as gerações futuras (O'SULLIVAN, 2020).

Por outro lado, Saath e Fachinello (2018) pontuaram que a atenção ao crescimento populacional se justifica, porém outras questões precisam ser compreendidas. A fome e o acesso limitado a recursos como a água, por exemplo, não são necessariamente um reflexo do

elevado contingente populacional, mas da falta de políticas públicas eficientes e adequadas à realidade de uma dada região. Os autores salientam que até o ano de 2050 a população global deve ser superior a 9,5 bilhões de habitantes, e caso as ações no âmbito político não sejam devidamente adotadas, haverá um agravamento dos problemas de ordem socioeconômica, principalmente nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento.

Desse modo, é em função da falta de planejamento e gestão pública apropriada que o crescimento populacional se torna decisivo para o adensamento das mazelas sociais. Dentre as preocupações atuais, estão as questões relacionadas ao acesso à água. A crescente pressão sobre os recursos hídricos tem limitado sua distribuição espacial, situação que combinada ao aumento do contingente populacional põe em risco a geração atual e as futuras (GUDE, 2017).

3.5 DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A diferença entre a oferta e demanda de água é denominada disponibilidade hídrica. Esse balanço é um dos métodos empregados por entidades como a ONU para traçar diagnósticos sobre os recursos hídricos em diferentes regiões, com o objetivo de fornecer informações que venham subsidiar outras pesquisas e políticas públicas adequadas para contornar possíveis dificuldades decorrentes da escassez de água.

Existe um conjunto de métodos que podem ser utilizados para avaliar a situação hídrica em escalas diferentes. Entre os mais utilizados, destaca-se o Índice de Exploração da Água (IEA), desenvolvido por *European Environment Agency* (EEA). O IEA é o resultado da razão matemática entre a vazão de retirada para usos consuntivos e a vazão média anual de um determinado rio. Para essa avaliação, intervalos percentuais iguais ou inferiores a 5% indicam que pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento é necessária. Quando a razão de retirada alcança valores iguais ou superiores a 40%, a situação é classificada como crítica. Nesse caso, há a necessidade de atividades de gerenciamento e investimentos em infraestrutura (ALCAMO; HENRICHS; RÖSCH, 2000).

Outro índice bastante empregado é o *Social Water Scarcity Index* (SWI), desenvolvido por Ohlsson (2000). Esse índice, diferentemente do IEA, leva em consideração indicadores sociais como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Uma de suas vantagens é oferecer uma resposta mais fiel dos possíveis impactos da escassez hídrica para diferentes regiões, uma vez que cada grupo social, devido às suas condições socioeconômicas, pode responder de maneira diferente ao problema.

Outro índice bem utilizado é o da Disponibilidade Hídrica per Capita, computada a partir do quociente entre a vazão média anual e o número total de habitantes de uma determinada bacia hidrográfica. O resultado obtido é comparado com intervalos pré-estabelecidos que serão utilizados para diagnóstico da situação hídrica de uma região. Disponibilidades cujo intervalo são $< 500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$, denotam uma condição de escassez hídrica. Valores entre 500 e $1700 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$, refletem uma situação de estresse hídrico, enquanto disponibilidades superiores a $1700 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ correspondem a situação de conforto de conforto hídrico (FALKENMARK, 1989).

Um dos estudos de notoriedade desenvolvidos no Brasil, para uma região de clima semiárido, foi conduzido por Ferreira e Souza (2020). Os autores empregaram o índice de disponibilidade hídrica per capita para avaliara situação hídrica da população inserida na bacia hidrográfica do rio Brígida, frente a cenários de mudanças climáticas e de crescimento populacional. Entretanto, o grande diferencial metodológico do estudo consistiu em adaptar o índice de Falkenmark (1989) para traçar a situação hídrica da região a partir da razão entre a água acumulada nos reservatórios e a quantidade de habitantes.

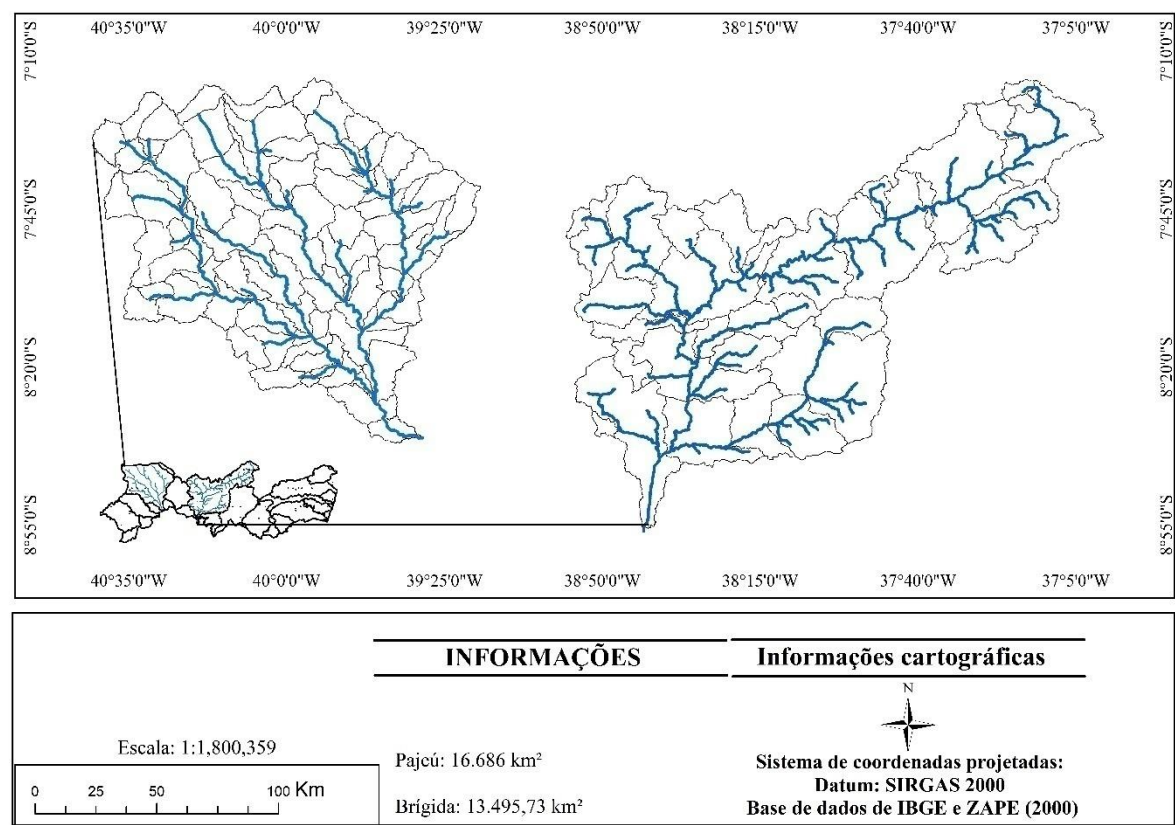
4 MATERIAL E MÉTODOS

Seção destinada à localização e caracterização da área de estudos, assim como aos procedimentos metodológicos utilizados para os objetivos específicos propostos.

4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estado de Pernambuco possui uma área de 98.312 km², subdividida em três mesorregiões (Zona da Mata, Agreste e Sertão). A região sertaneja, conhecida como Sertão de Pernambuco, ocupa 70% do território e comporta a maior parte das bacias hidrográficas do estado. As bacias hidrográficas modeladas foram as dos rios Brígida e Pajeú (Figura 1), que se encontram inseridas no Submédio São Francisco, trecho pernambucano.

Figura 1- Localização geográfica das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida



Fonte: O autor (2021).

A bacia do rio Brígida possui área de 13.495,73 km² e abrange 15 municípios, parcialmente ou totalmente inseridos na unidade. Quanto à bacia hidrográfica do rio Pajeú,

essa possui área de 16.685,63 km² e envolve 27 municípios. São as duas maiores bacias hidrográficas do Semiárido pernambucano (APAC, 2020).

As referidas unidades ambientais são estratégicas do ponto de vista socioeconômico e ambiental, dada a problemática da escassez hídrica na região, exploração dos recursos naturais, associados frequentemente à degradação da vegetação nativa para a produção de lenha e desenvolvimento de atividades voltadas para a indústria gesseira, agricultura irrigada, entre outros.

4.1.1 Tipologia Climática

Apesar de encontrar-se inserida no domínio semiárido, a região do Submédio São Francisco apresenta, no trecho pernambucano, pelo menos, duas tipologias climáticas. A predominante é o tropical semiárido (BSh), conforme classificação de Koppen. O segundo, porém, menos expressivo, é o subúmido seco, que conforme a classificação adotada equivale à transição entre o tropical típico (Aw) e o semiárido (BSh). Nas regiões estudadas, esse tipo de clima está associado às localidades com maiores valores de altitude, classificadas como áreas de exceção. Estas, acabam por contribuir para o aumento das condições de umidade e diminuição da temperatura média, quando comparadas ao entorno.

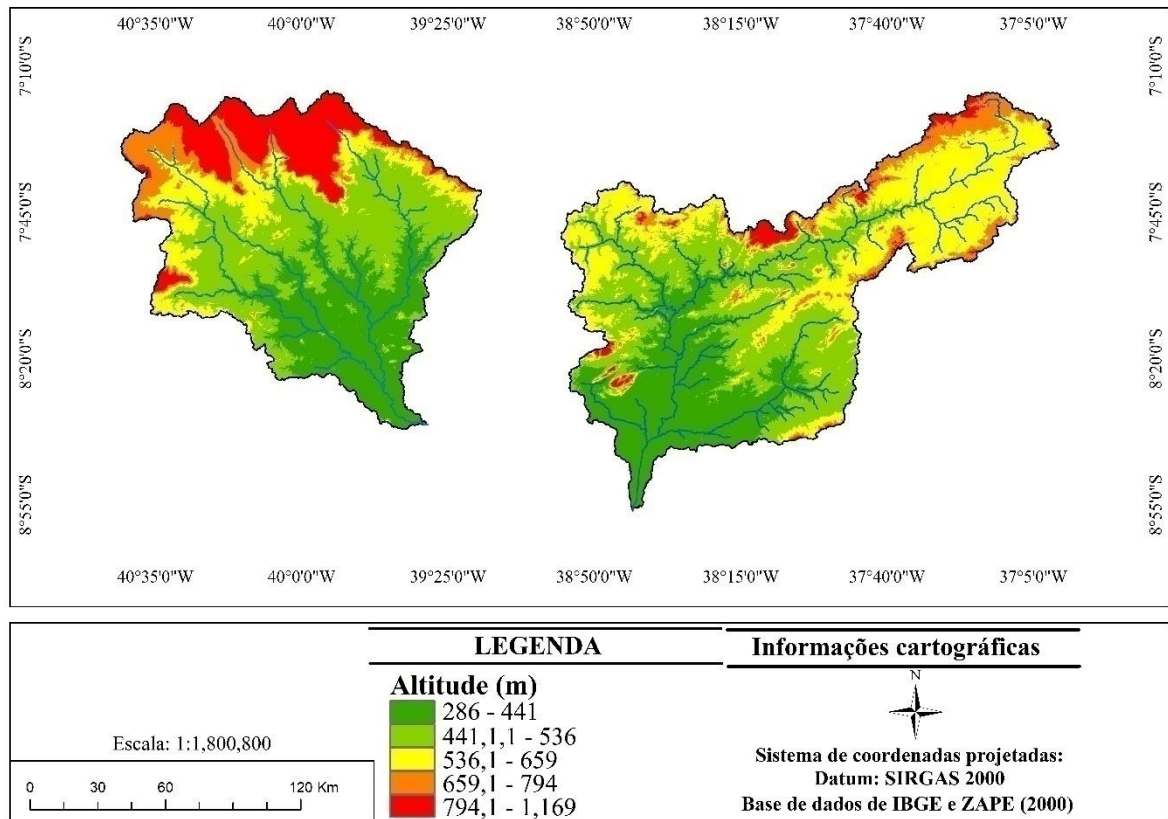
Em relação à precipitação pluviométrica, esta é controlada por diferentes sistemas atmosféricos que atuam em escalas variadas. Entre os mais relevantes, destaca-se instabilidades associadas às Frentes Frias, Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZACAS) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). É importante ressaltar que a atuação da ZCIT é praticamente um fator determinante para a ocorrência de chuvas na região. Este sistema pode atuar de maneira acentuada ou inibida em função das condições meteorológicas em escala global, que respondem, entre outros fatores, ao padrão termodinâmico dos oceanos Atlântico Norte e Sul (RODRIGUES; SENNA; CATALDI, 2019).

4.1.2 Hipsometria e pedologias das bacias hidrográficas

As bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú encontram-se inseridas na unidade geoambiental conhecida como conhecida como Depressão Sertaneja. Essa, se caracteriza por apresentar relevos predominantemente planos, com áreas de exceção relacionadas à presença

de maciços residuais, oriundos do processo de formação do Planalto da Borborema, e pela presença de Planaltos, Chapadas e Serras (Figura 2).

Figura 2 - Hipsometria das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida

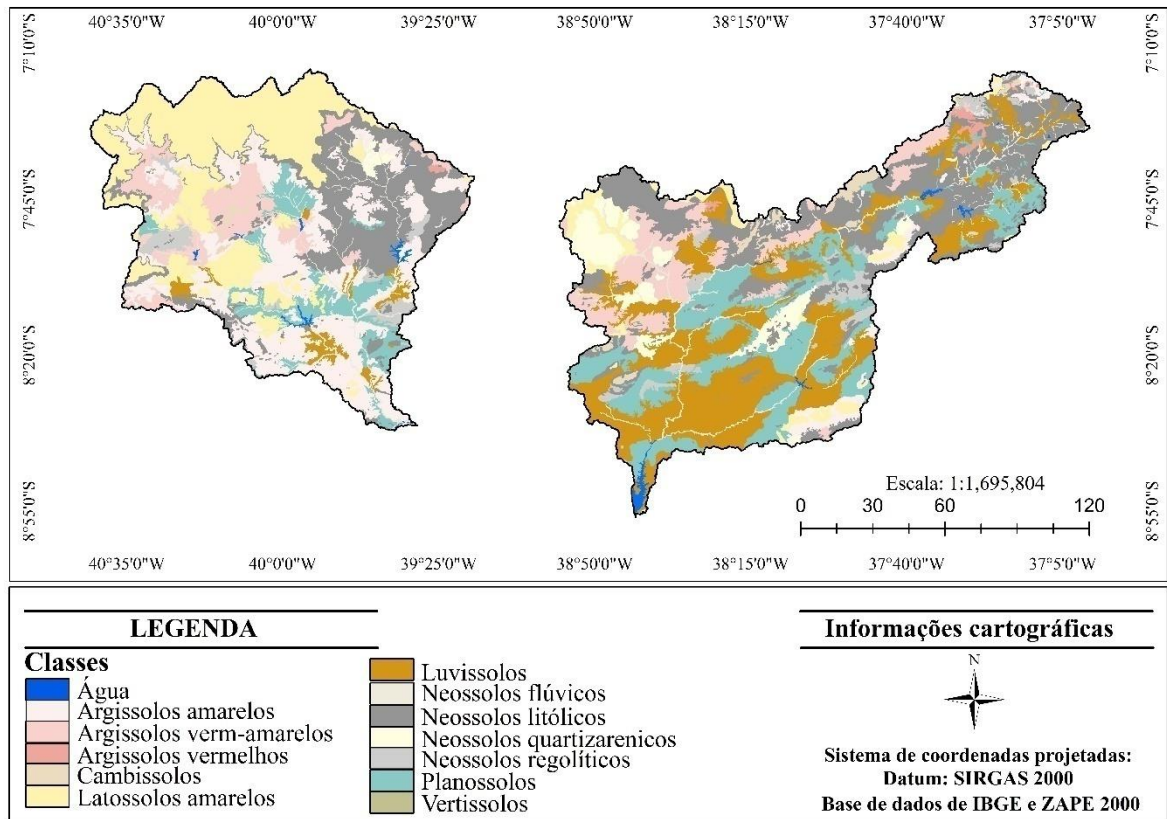


Fonte: O autor (2021).

Verifica-se a predominância de altitudes que variam entre 286 e 536 m, onde o relevo é classificado como plano e suave ondulado. As áreas de altitude intermediária, entre 536,2 e 659 m, correspondem aos perímetros de transição entre o relevo suave ondulado e escarpado, classificadas como de relevo ondulado. Quanto aos compartimentos mais elevados, estes se concentram ao norte das bacias, nas áreas de chapada, e a oeste, onde encontra-se o limite de transição entre a encosta setentrional do Planalto da Borborema e a depressão Sertaneja.

Sobre os aspectos pedológicos das bacias hidrográficas estudadas, estes podem ser observados na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição espacial dos tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida e Pajeú



Fonte: O autor (2021).

Ao todo, a região apresenta 12 classes de solos, com concentrações distintas entre as unidades ambientais. Verifica-se a predominância dos Neossolos Litólicos (22,4%), Luvisolos (16,2%), Planossolos (14%), Latossolos Amarelos (13,4%), Argissolos Amarelos (12,6%) e os Argissolos Vermelho-Amarelos (9,3%).

Na bacia hidrográfica do rio Brígida, as classes de solos mais expressivas correspondem aos Neossolos Quartizarenicos, Latossolos Amarelos e Argissolos. Quanto a do rio Pajeú, as manchas mais representativas referem-se também aos Neossolos Litólicos, mas se diferencia quanto à predominância dos Planossolos e Luvisolos, entre as quais, predominam os Neossolos Litólico (17,1%), Planossolos (16,3%), Argissolos Amarelos (16%), Luvisolos (12,6%), Argissolos Vermelhos (10,8%), Neossolos Quartizarenicos (9,6%) e Latossolos Amarelos (9,4%). As demais classes são menos expressivas e, juntas, ocupam cerca de 8% da região.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção expostos os procedimentos metodológicos empregados para o desenvolvimento do presente estudo, estruturada conforme os objetivos específicos propostos.

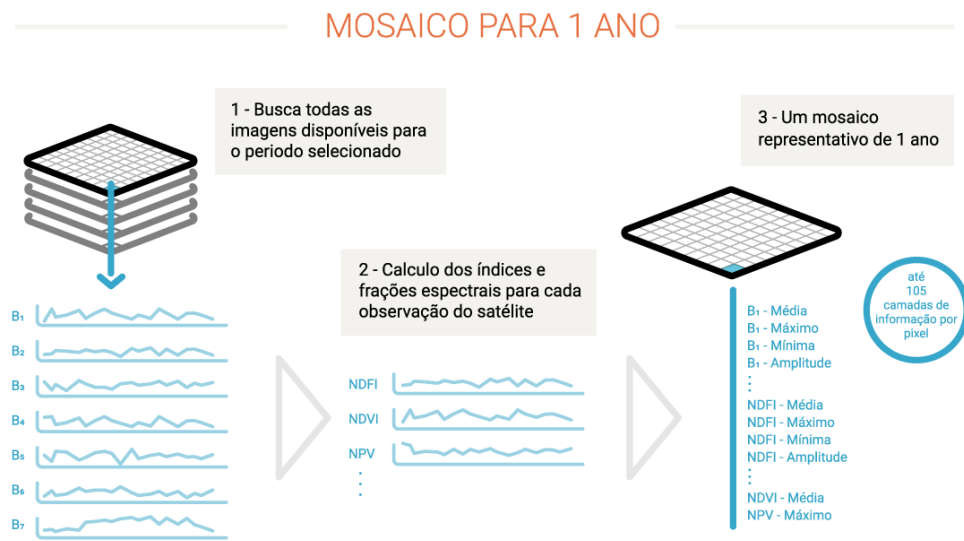
4.2.1 Mapeamento do uso e cobertura da terra

O mapeamento espaço-temporal do uso e cobertura da terra das duas bacias hidrográficas foram obtidos junto ao MapBiomas (2020). Sua produção é o resultado da classificação pixel a pixel de imagens de satélites da série Landsat, realizada pela equipe de desenvolvimento do projeto. Segundo informações disponibilizadas pelo corpo de pesquisadores, o processamento foi conduzido com o uso de extensos algoritmos de aprendizagem de máquina (*machinelearning*) através da plataforma *Google Earth Engine*, que oferece capacidade de processamento na nuvem.

As imagens empregadas possuem resolução espacial de 30 metros, disponíveis gratuitamente na plataforma *Google Earth Engine*, que conta com uma série temporal superior a 30 anos. Ao todo, foram necessárias 380 cenas do Landsat para representar toda a superfície brasileira. No total, são mais de 9 bilhões de pixels.

As imagens, eventualmente, apresentaram alvos como nuvens, fumaça, entre outros. Isso tende a dificultar a representação fiel da superfície. Para contornar o referido problema, a equipe selecionou pixels sem nuvens, ou qualquer outro alvo indesejado, dentre as imagens disponíveis próximas ao período. Posteriormente, foram extraídas métricas (pixel a pixel) que indicam o padrão daquela área específica que está “contaminada”. O procedimento é desenvolvido para todas as bandas espectrais (Figura 4).

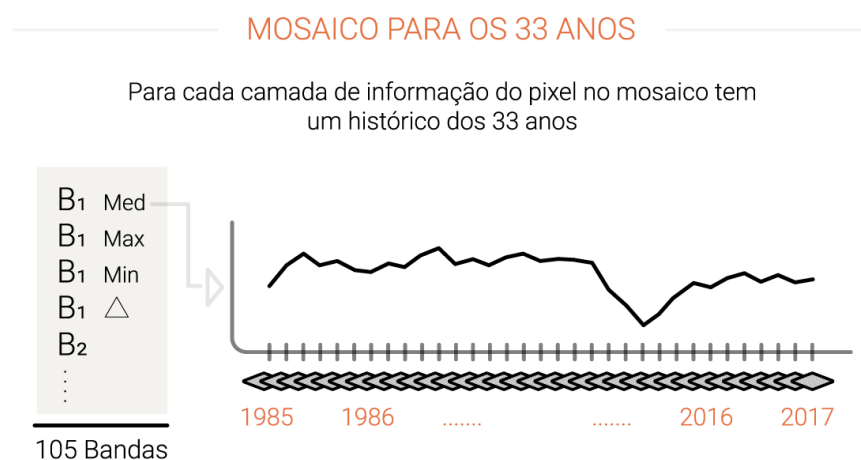
Figura 4 - Esquema de processamento de imagem utilizado pelo MapBiomass para gerar um mosaico para um ano



Fonte: MapBiomass (2020).

O conjunto de imagens processadas foi salvo como uma coleção de dados (*Asset*) junto à plataforma do *Google Earth Engine*. Essa base de dados passa a ser utilizada de duas maneiras. A primeira é utilizada como base de parâmetros para o algoritmo classificar as imagens, que produz também a composição RGB, responsável por permitir as visualizações da imagem de fundo na plataforma MapBiomass (Figura 5).

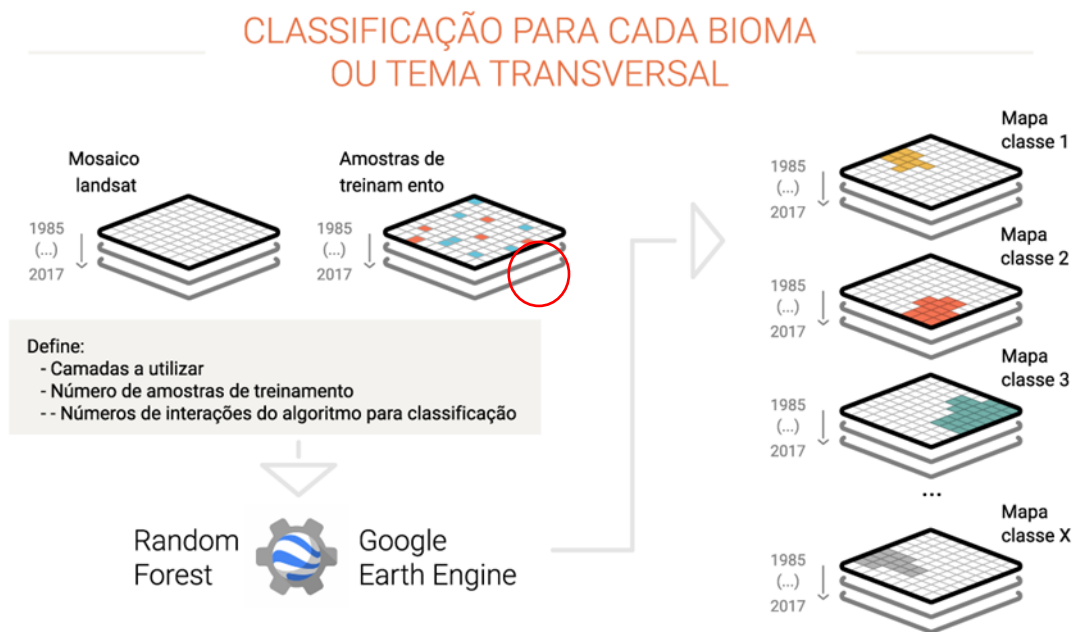
Figura 5- Representação temporal da composição de imagens utilizadas pelo MapBiomass para o Brasil



Fonte: Fonte: MapBiomass (2020).

Por fim, foram realizadas etapas de classificação para cada um dos biomas, assim como suas respectivas classes. Por meio dos mosaicos foi representada a cobertura e uso do solo (floresta, campo, agricultura, pastagem, área urbana, água etc.), conforme Figura 6. Nessa etapa, pesquisadores empregaram um classificador automático denominado “*randomforest*”, baseado em aprendizado de máquina. Assim, as máquinas foram “treinadas” com amostras dos alvos a serem classificados. Estas amostras puderam ser obtidas a partir de mapas de referência.

Figura 6 - Etapa de classificação dos biomas e suas classes correspondentes



Fonte: Produzido pelo autor a partir de imagens de satélites disponíveis no banco de dados do Google Earth Pro.

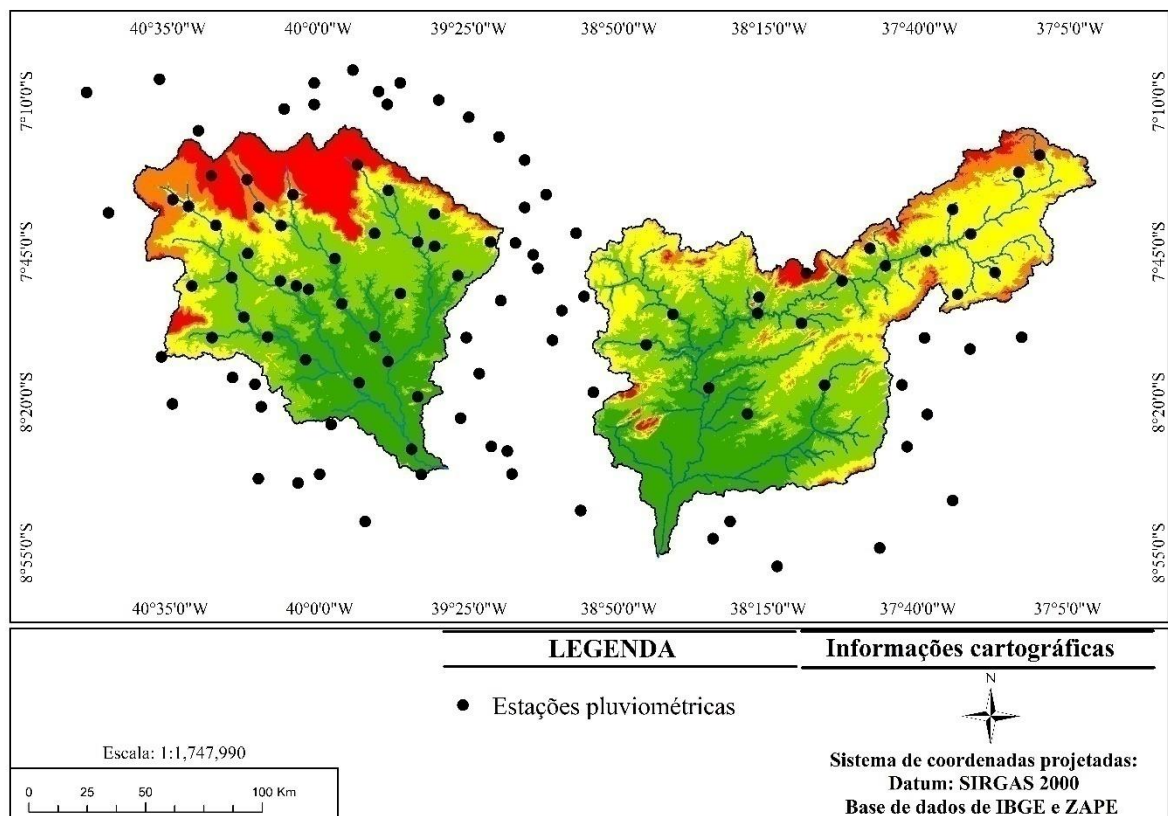
O produto disponibilizado pelo MapBiomas encontra-se em formato matricial e com classes generalistas. Para a presente tese, os mapas foram convertidos para o formato shapefile (SHP) e reclassificados seguindo a classificação do Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012).

4.2.2 Modelagem hidrológica e banco de dados

Os dados climáticos empregados para a simulação dos processos hidrológicos das bacias hidrográficas analisadas foram obtidos junto à Agência Pernambucana de Águas e

Clima (APAC), Agência Nacional de Água (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis climáticas correspondem à precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima e mínima do ar (°C), radiação solar (MJ/m²/dia), velocidade média do vento a 10 m (m/s) e umidade relativa do ar (%), todos em escala diária, distribuídos conforme observado na Figura 7.

Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e meteorológicas nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, os dados representam o período que se estende de 1962 a 2016. Em relação à bacia hidrográfica do rio Brígida, a série se inicia em 1963 e é finalizada em 2014. Para essa unidade ambiental, foram utilizados dados de 73 postos pluviométricos e seis estações meteorológicas. Quanto às estações distribuídas na bacia hidrográfica do rio Pajeú, o período considerado, com certas variações, vai de 1962 a 2016. Ao todo, foram selecionados 34 postos pluviométricos, dos quais dois referem-se a estações meteorológicas.

A escolha das estações pluviométricas e meteorológicas obedeceu ao critério de disponibilidade de informações. Desse modo, postos que apresentassem ausência de dados com intervalo superior a 30% foram imediatamente desconsiderados. Ressalta-se que esse

procedimento só foi realizado após cuidadosa análise dos valores observados, em que buscou-se encontrar erros relacionados a falha operacional dos equipamentos (aquisição) ou transmissão dos dados.

Posteriormente, realizou-se a parametrização das variáveis meteorológicas de entrada no modelo hidrológico SWAT. Esse procedimento consiste em calcular as estatísticas referentes às séries temporais das estações meteorológicas e estimativa da normal climatológica da área estudada. Tais informações servirão como base também para permitir o preenchimento das falhas observadas em escala diária dos dados de entrada. Os cálculos foram realizados por meio da macro *Weather Generator* (WGN), em formato xls.

4.2.3 Mapeamento e características físico-químicas dos solos

O mapeamento dos solos encontrados nas bacias hidrográficas modeladas foi obtido junto ao Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE), em escala de 1:100.000. O projeto de zoneamento foi empreendido pela Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária de Pernambuco, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A base de dados vetoriais encontra-se no formato *shapfile* (shp).

Em seguida, foram relacionadas a cada classe de solos as informações sobre suas características físico-químicas (Tabela 1).

Tabela1 - Parâmetros gerados pela Macro.xls *usersoil* para os solos encontrados nas bacias hidrográficas do rio Brígida e Pajeú

Parâmetros	Descrição	Unidade
HYDGRP	Grupo hidrológico dos solos	-
SOL_ZMX	A profundidade máxima de enraizamento de perfil	mm
ANION_EXCL	Fração de porosidade a partir do qual são excluídos ânions	-
SOL_CRK	Volume máximo de quebra do perfil do solo.	-
TEXTURE	Textura da camada de solo	-
SOL_Z	Profundidade a partir da superfície do solo para o fundo da camada	mm
SOL_BD	Densidade do solo úmido	Mg/m ³ ou g/cm ³
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água na camada do solo	mm
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado	mm/hr
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico	%
CLAY	Teor de argila	%
SILT	Teor de silte	%
SAND	Teor de areia	%
ROCK	Teor de fragmentos de rocha	%
SOL_ALB	Albedo do solo úmido	-
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo	-
SOL_EC	Condutividade elétrica (parâmetro não ativo no momento)	dS/m

Fonte: ARNOLD et al. (2012).

Para isso, recorreu-se ao Sistema de Informação de Solos Brasileiros da Embrapa. Algumas classes de solos dentro das bacias não dispunham de informações representativas daquelas áreas, então foi necessário importá-las de áreas o mais próximas, quando possível.

4.2.4 Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) das bacias hidrográficas modeladas foi gerado a partir da imagem de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m.

4.4.4 Reservatórios

Os dados para modelagem dos reservatórios foram adquiridos junto a APAC e correspondem a informações sobre capacidade máxima (m^3) e área total do espelho d'água da bacia (m^2) na cota de descarga. Como o modelo exige um padrão de entrada específico, as unidades foram convertidas de m^3 para 10^4m^3 e de m^2 para ha. Vale ressaltar que as bacias contam com outras estruturas hidráulicas, mas que não foram utilizadas nas simulações devido ao déficit de informações. Isso acontece, principalmente, em função do menor porte das barragens, que por essa razão deixam de ser monitoradas.

O conjunto de reservatórios utilizados na modelagem para bacia hidrográfica do rio Brígida encontra-se exposto na Tabela 2. Pelo menos seis reservatórios foram identificados em bancos de dados de APAC, porém foram descartados devido à ausência de informações básicas. A maior parte das barragens desconsideradas possuíam capacidade máxima inferior à $2.000.000 \text{ m}^3$.

Tabela 2 - Lista de reservatórios modeláveis distribuídos na bacia hidrográfica do rio Brígida
Fonte: Elaborado a partir da base de dados de APAC (2020).

Reservatórios	Capacidade máxima (m^3)	Área (m^2)
Algodões	58.481.874	11.574.900
Cachimbo	31.207.006	7.226.280
Chapéu	188.000.000	24.500.000
Engenheiro Camacho	27.664.500	6.391.000
Entremontes	348.297.500	46.833.000
Lagoa do Barro	22.947.850	5.750.000
Lopes II	23.935.360	7.999.600

Fonte: O autor (2021)

Quanto aos reservatórios distribuídos na bacia hidrográfica do rio Pajeú, as informações desses encontram-se expostas na Tabela 3. Ao todo foram modeladas 13 bacias hidráulicas. Semelhante ao que aconteceu para a bacia do rio Brígida, outros reservatórios ficaram de fora da análise devido à escassez de dados.

Tabela 3 - Lista de reservatórios modeláveis distribuídos na bacia hidrográfica do rio Brígida

Reservatórios	Capacidade máxima (m³)	Área (m²)
Arrodeio	14.522.100	4.834.200
Barra do Juá	71.474.000	14.320.000
Brotas	19.639.577	4.678.921
Cachoeira II	21.031.145	3.903.250
Jazigo	15.543.300	459.64
Laje Do Gato	1.102.940	532.92
Mãe D'Gua	1.500.000	288.12
Rosário	36.532.000	8.279.000
Saco I	36.000.000	6.749.232
São José II	7.152.875	1.694.250
Serrinha I	1.256.504	340.6
Serrinha II	311.080.000	44.227.600
Serrote	1.622.615	646.56

Fonte: O autor (2021).

4.2.5 Abastecimento e dinamização do modelo hidrológico SWAT

No presente estudo, utilizou-se a versão ArcSWAT 2012.10.24 do modelo hidrológico SWAT, que foi acoplada a interface gráfica do usuário no ArcMap, do software ArcGis 10.2.2. Para criar o projeto, foi usada a ferramenta *New SWAT Project*. Em seguida, substituiu-se o banco de dados pré-instalado, correspondente às realidades físico-natural das bacias hidrográficas dos Estados Unidos, pelos gerados a partir das variáveis de solos e padrão climatológico das bacias modeladas. Esse procedimento se deu por meio das opções *UserSoil* e *Weather Generator*, respectivamente, no arquivo SWAT2012.mdb.

4.2.6 Delimitação e parametrização das bacias hidrográficas

A delimitação das bacias e sub-bacias se deu através do processamento da imagem de radar SRTM. Por meio da função *Automatic Watershed Delineation*, o produto foi introduzido no modelo que, em seguida, calculou automaticamente os fluxos de direção e acumulação da água. Esse procedimento é baseado na altimetria da bacia hidrográfica estudada, enquanto o método empregado corresponde ao definido pela ferramenta *Hydrology*

do ArcGis, que é utilizada pelo modelo SWAT em toda a etapa de definição dos canais de drenagem e pontos de confluência dos rios.

Posteriormente, foram inseridos, manualmente, nas redes de drenagem os reservatórios encontrados na área de estudo e os pontos representando as estações que dispõem de dados observados de vazão para serem utilizados na etapa de calibração e validação do modelo hidrológico SWAT. Após a referida etapa, as bacias foram devidamente parametrizadas, em que foi definida a quantidade de sub-bacias, tamanhos e seus respectivos canais.

4.2.7 Definição das unidades de resposta hidrológica

As Unidades de Resposta Hidrológica (URH) representam uma nova subdivisão das bacias, porém baseada em critérios que levam em consideração a combinação dos mapas de uso e cobertura da terra, solos e declividade do terreno. Desse modo, os mapas são sobrepostos e cada unidade criada a partir do cruzamento possui o equivalente, em média, a 20% do tamanho da sub-bacia a qual está vinculada. Esse limiar é definido pelo pesquisador, conforme nível de detalhamento exigido no estudo. Frequentemente, um dos limitantes quanto ao maior nível de detalhamento, no caso para utilizar unidades de resposta hidrológicas menores, é a capacidade de processamento dos *hardwares* dos computadores. Assim, normalmente, a depender do tamanho das bacias, são utilizados intervalos entre 10 e 20% (ARNOLD et al., 2012b).

4.2.8 Simulação do modelo hidrológico SWAT

Após acoplamento do banco de dados ao SWAT, a base foi convertida em tabelas no formato txt e MDB. Com as informações devidamente estruturadas, o modelo realizou a simulação do balanço hidrológico, baseado na seguinte equação:

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

Em que:

SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm), SW_0 representa o conteúdo inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo (dias), R_{day} indica a quantidade de precipitação no dia i (mm),

Q_{surf} é o escoamento superficial no dia i (mm), E_a é a evapotranspiração no dia i (mm), w_{seep} é a percolação no dia i (mm) e Q_{gw} é o fluxo de retorno no dia i .

Quanto a estimativa do escoamento superficial, essa é baseada no método da Curva Número (CN) do *SoilConservation Service-SCS*:

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

Em que:

Q_{surf} é escoamento acumulado diário (mm), R_{day} é a precipitação pluviométrica diária (mm), I_a é a subtração inicial que inclui o armazenamento de superfície, interceptação e infiltração anterior (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm). Como o parâmetro de retenção varia no tempo e espaço (mudanças no uso e cobertura da terra, conteúdo de água nos solos, mudanças nos solos e declividade do terreno), esse é calculado a partir da seguinte equação:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Em que:

CN corresponde à curva número para o dia.

A estimativa da evapotranspiração pode ser calculada por pelo menos três métodos distintos dentro do SWAT: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Montheith. Para o presente estudo, foi adotado o proposto por Hargreaves, devido, principalmente, à baixa qualidade dos dados de entrada para velocidade do vento, variável de grande importância para método de Penman-Montheith, por exemplo. Nesse sentido, a equação proposta por Hargreaves é a seguinte:

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\Gamma_{av} + 17.8) \quad (4)$$

Em que:

λ o calor latente para vaporização (MJ kg^{-1}), E_o é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), H_0 representa a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_{mx} é a temperatura máxima do ar no dia

(°C), T_{mn} é a temperatura mínima do ar no dia e (°C) e Γ_{av} é a temperatura média do ar para um dado dia (°C).

A percolação é calculada pelo modelo com base na técnica de propagação do armazenamento, procedimento representado na equação a seguir:

$$SW_i - SW_{oi} \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_t}\right) \quad (5)$$

Em que:

SW_i indica a umidade no início do dia, SW_{oi} representa a umidade do solo no fim do dia, Δt é o intervalo de tempo (h), TT é o tempo de propagação através das camadas e i é o índice de identificação da camada do solo.

Estimativa da percolação:

$$P_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_t}\right) \right] \quad (6)$$

Em que:

P_i é a percolação em mm/dia.

Quanto ao tempo de percolação, esse é único para cada camada:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (7)$$

Em que:

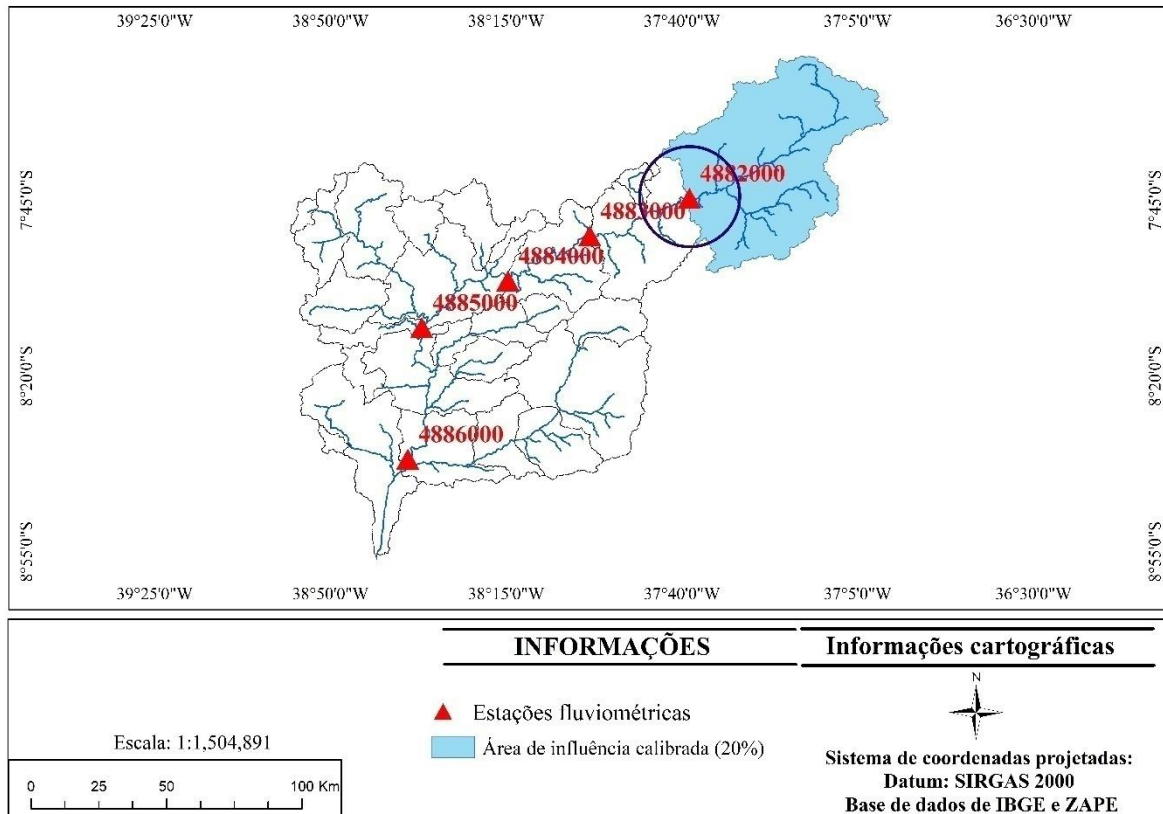
SAT_{ly} corresponde a quantidade de água na camada do solo quando esse se encontra totalmente saturado (mm), FC_{ly} indica a umidade do solo quando atingida a capacidade de campo e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada para a camada (mm-h⁻¹).

4.2.9 Análise de sensibilidade e calibração do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

Para análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo hidrológico SWAT, foi empregado o software SWAT-CUP-5.1.6.2, na versão de distribuição livre. O programa conta com um pacote estatístico entre os quais pode-se destacar o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2), selecionado para o desenvolvimento do presente estudo.

Em relação às estações fluviométricas utilizadas para os procedimentos supracitados, a bacia hidrográfica do rio Pajeú conta com cinco postos, instalados no canal principal, seguindo da região montante à jusante. Para responder à hipótese norteadora do presente estudo, foi selecionada a estação localizada no município de Afogados da Ingazeira, código 4882000, conforme destacado na Figura 8.

Figura 8 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú



Fonte: O autor (2021).

Vale ressaltar que alguns critérios foram obedecidos para essa seleção. O primeiro refere-se ao fato de que entre o período de 1961 a 1974, intervalo escolhido para calibração do modelo, a vazão do rio apresentava um regime que pode ser considerado como natural, visto que os principais reservatórios encontrados na área ainda não haviam sido construídos. Outra questão observada corresponde à qualidade dos dados de precipitação. Esses, para praticamente toda a bacia, em geral, não apresentavam falhas superiores a 10%, principalmente na região à montante. E, por fim, as sub-bacias que influenciavam esse trecho do rio apresentavam características físicas e naturais bem representativas em relação à área de estudo.

Após obedecer às etapas anteriormente citadas, os dados modelados e os valores de vazão observada foram importados para dentro do ambiente do SWAT-CUP. A partir de então, foram selecionados 20 parâmetros, considerados mais comuns no ajuste de modelos hidrológicos, conforme indicado por Arnold et al. (2012). Nessa etapa, foi realizada uma análise de sensibilidade, por parâmetro, e aqueles que não apresentaram significância estatística quanto ao nível de importância, foram descartados. Por fim, foram conduzidas 100 simulações, com 20 iterações cada uma, para todos os parâmetros, com intervalo de incerteza variando entre -20 e 20%.

Ao final, quando encontrado o intervalo de variação considerado ideal, uma nova simulação foi iniciada, dessa vez com 1000 iterações. Ao alcançar o intervalo máximo de possibilidades de combinações dos valores para cada um dos parâmetros restantes, o modelo foi considerado calibrado. Vale ressaltar que o método empregado para avaliação de desempenho do SWAT para simulação nesse trecho do rio foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \quad (8)$$

Em que, E_m é a vazão observada, E_s , a vazão simulada pelo modelo, $\bar{E}$ indica a média da vazão observada para o período de simulação, enquanto n é o número de eventos.

Com os parâmetros devidamente calibrados, seus valores foram extrapolados para todas as sub-bacias localizadas no centro e jusante, a fim de testar a hipótese de que esse procedimento é suficiente para calibrar toda a bacia hidrográfica do rio Pajeú. Para averiguar a acurácia do modelo na simulação do escoamento superficial em outros trechos do rio, foram utilizadas as demais estações fluviométricas, que possuíam dados de vazão para diferentes

períodos. Vale ressaltar que todo esse processo foi realizado para calibração da vazão média anual. Assim, os para os quais observou-se insuficiência de dados foram desconsiderados.

4.2.10 Calibração da bacia hidrográfica do rio Brígida

A bacia hidrográfica do rio Brígida conta com duas estações fluviométricas localizadas em canais diferentes (Figura 9). Para o presente estudo, apenas a estação de código 48460000 foi considerada para análise, visto que as demais apresentaram significativa inconsistência ou total ausência de informações.

Figura 9 -Distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão das bacias hidrográficas Brígida



Fonte: O autor (2021).

Para a bacia hidrográfica do rio Brígida, utilizou-se um procedimento de calibração indireta. Esse consistiu em importar os parâmetros ajustados da bacia hidrográfica do rio Pajeú, admitindo que ambas apresentam características físico-naturais semelhantes a ponto de permitir tal iniciativa. Assim, em um primeiro momento, foram importados os mesmos parâmetros, com o mesmo intervalo inicial de incertezas ($\pm 20\%$). Para melhor compreensão

do método proposto, os resultados foram comparados com os encontrados por Ferreira e Souza (2020), que modelaram a referida bacia hidrográfica.

4.2.11 Cenários de mudanças climáticas

Os cenários de mudanças climáticas foram baseados nos gerados pelo modelo climático HADGEM2-ES. O modelo possui resolução espacial de 20k e abrange toda a América do Sul. Dentre os três cenários disponibilizados (otimista, moderado e pessimista), adotou-se para o presente estudo o considerado moderado, para o período que se estende entre 2010 a 2060. As informações correspondem à temperatura média do ar e precipitação pluviométrica, ambas em escala diária.

4.2.12 Projeção populacional Projeção populacional e de disponibilidade hídrica frente a cenários climáticos

A projeção da população total da bacia hidrográfica dos rios Brígida e Pajeú foi baseada na equação em projeção geométrica proposta por Rocha, Brito Filho e Silva (2011):

$$P_{pt} = p1(1 + txa)^{ia} \quad (9)$$

Em que, $p1$ é a população total do ano do último censo, txa corresponde à taxa de crescimento geométrico anual por município (%) e ia representa o intervalo em anos do censo base da projeção (ano anterior) para o ano projetado.

Para validar os resultados e averiguar a capacidade da equação projetar a população das bacias hidrográficas com confiabilidade, utilizou-se a projeção utilizada pelo IBGE para o ano de 2019 como referência. Assim, foi calculado o erro relativo.

4.2.13 Estimativa da disponibilidade hídrica

Para estimar a disponibilidade hídrica per capita nas bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú, adaptou-se o método proposto por UNESCO (2003):

$$DAPA = \frac{RES}{P_{tl}} \quad (10)$$

Em que, DAPA é disponibilidade de água por habitante por ano, RES corresponde ao total de água armazenado pelos reservatórios das bacias para um determinado ano e Ptl é a população total das bacias encontrada nos municípios inseridos nas bacias, conforme dados do último censo divulgado pelo IBGE (2010).

4.2.14 Cenários de disponibilidade hídrica frente a mudanças demográficas e climáticas

A disponibilidade hídrica projetada foi baseada nas anomalias de temperatura e precipitação do HADGEM2-ES crescimento populacional, para o período entre 2010 e 2060. Inicialmente, o modelo hidrológico SWAT foi abastecido com os dados climáticos projetados. Posteriormente, foi calculado o balanço de água per capita com base no total disponível nos reservatórios e tamanho da população das bacias por período analisado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção encontram-se expostos os resultados encontrados ao longo da pesquisa para cada um dos objetivos específicos propostos.

5.1 MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA

A partir desse trecho, são apresentados os resultados que atendem ao primeiro objetivo específico, que corresponde ao mapeamento da variação espaço-temporal do uso e cobertura da terra.

5.1.1 Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida

A representação das alterações no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Brígida, ocorridas entre 1985 e 2018, podem ser visualizadas na Figura 10. Os resultados encontrados indicam que a base de dados, assim como as técnicas de análise e processamento aplicadas pelos pesquisadores do MapBiomas, foi capaz de detectar as mudanças espaciais e temporais no uso e cobertura da terra na região, face às alterações observadas para as diferentes classes de uso.

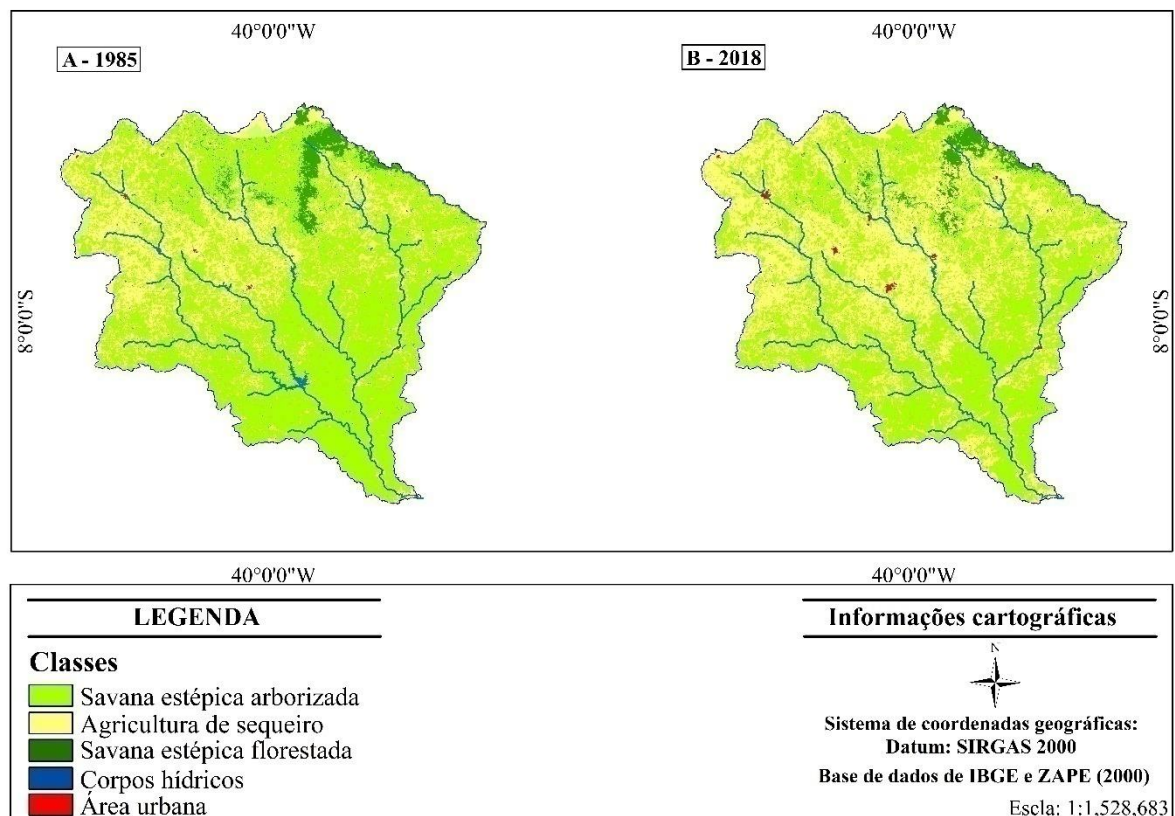
A vegetação predominante na área é a do tipo caatinga, com destaque para a Savana Estépica Arborizada e Savana Estépica Florestada, que ocupam a maior parte da área de estudo. Outras classes como a Agricultura de Sequeiro, Área Urbana e Corpos Hídricos podem ser encontradas, porém são menos expressivas.

A análise temporal revela que a classe mais significativa em 1985, a Savana Estépica Arborizada, sofreu importante redução quando comparado ao ano de 2018, passando de 73,5% para 58,7%. As análises sobre os resultados revelam que esse tipo de cobertura foi convertido, majoritariamente, em áreas de Agricultura de Sequeiro, visto que esta classe cresceu 12% dentro do referido intervalo.

Quando se toma como referência os canais de drenagem da bacia hidrográfica do rio Brígida e as Áreas Urbanas, a conversão de florestas de caatinga em classes agrícolas é mais intensa onde a rede de drenagem é mais densa. Entre as áreas mais degradadas, destaca-se a do centro-montante da região, que concentra maior quantidade de rios, principalmente na porção oeste. Outro ponto importante são as Áreas Urbanas, que estão concentradas próximas a essa localidade.

A Savana Estépica Florestada é bem menos expressiva. Por outro lado, proporcionalmente, foi tão degradada quanto a Savana Estépica Floresta. Esse tipo de vegetação se concentra na região à montante da bacia, sob influência do relevo predominante na área (Planalto e Montanhoso), que cria uma região de exceção devido à influência sobre o clima. Sua área em 1985 era de aproximadamente 1,51% e passou para 1,37% em 2018.

Figura 10 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida para os anos de 1985 (A) e 2018 (B)



Fonte: O autor (2021).

5.1.2 Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Pajeú

Em relação à bacia hidrográfica do rio Pajeú, as classes encontradas foram as mesmas observadas na bacia do rio Brígida (Figura 11). Como observado anteriormente, há na região o predomínio da Savana Estépica Arborizada, que em 1985 chega a ocupar 73,5% da superfície. Bem distribuída na região, essa classe passou para 58,7% em 2018, o que representa redução de 14,8%, ou uma taxa de desmatamento em torno de 0,44% ao ano.

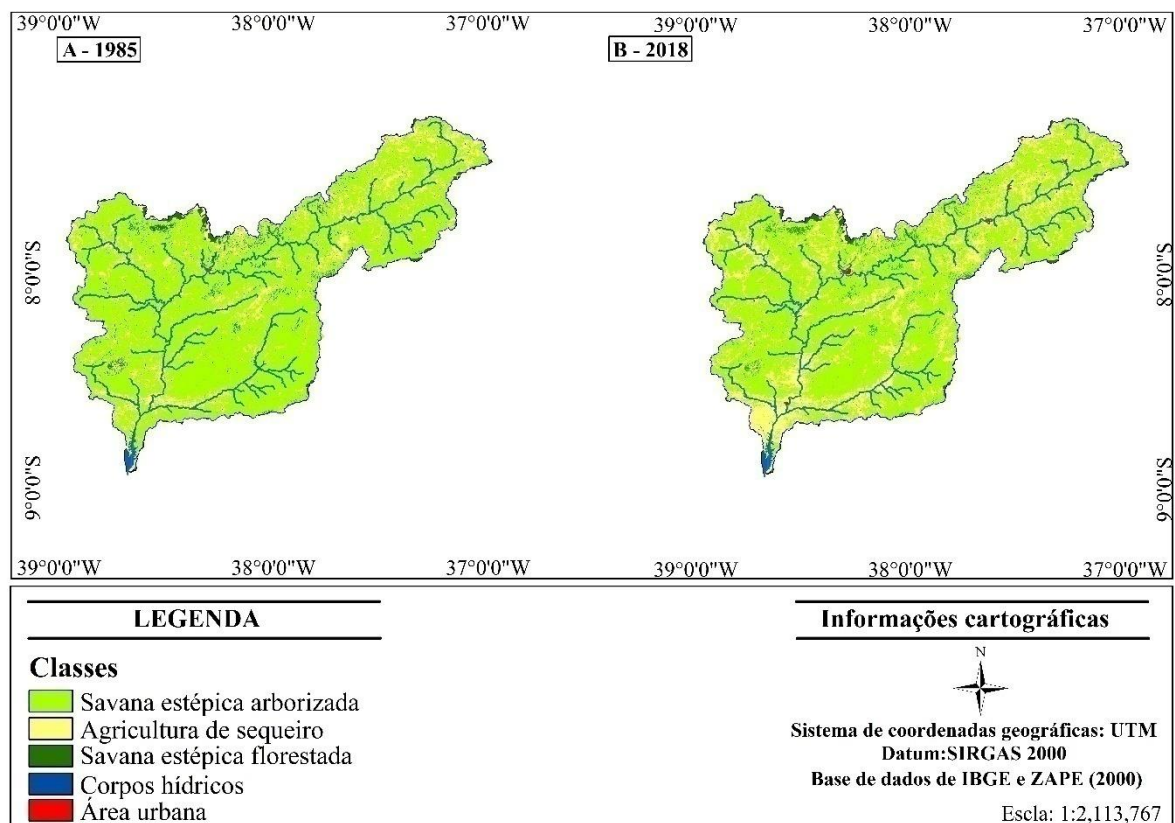
A redução da área de Savana Estépica Arborizada encontra-se relacionada, principalmente, ao surgimento e ampliação da Agricultura de Sequeiro, que passou de 23,4%

em 1985 para 35,9% em 2018. Mais uma vez, observa-se que a presença dos rios é fator determinante para a concentração de extensas áreas cujo uso é essencialmente agrícola.

Chama atenção a região à jusante da bacia do rio Pajeú, onde está localizada a Represa Luiz Gonzaga. O entorno da área, proporcionalmente, foi um dos mais degradados e é justamente a localidade que conta com a maior quantidade de águas superficiais, devido à presença do reservatório.

Quanto à Savana Estépica Florestada, sua área passou de 1,51% em 1985 para 1,37% em 2018. Quando considerada sua área absoluta, a redução total é de cerca de 10%, o que pode ser considerada uma perda significativa, dada a sua baixa representatividade na área. Como observado nas classes anteriores, as regiões antes ocupadas pela Savana Estépica Arborizada deram a Agricultura de Sequeiro.

Figura 11 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Pajeú para os anos de 1985 (A) e 2018 (B).



Fonte: O autor (2021).

Os resultados encontrados, de modo geral, revelaram que há uma acentuada tendência de desmatamento nas regiões estudadas. Na Bacia hidrográfica do rio Brígida, o processo,

proporcionalmente, é mais intenso do que em relação à bacia hidrográfica do rio Pajeú. Porém, em comum, percebeu-se o fator agrícola como decisivo para a diminuição da vegetação nativa. Esse padrão de variação também foi observado por Gomes da Silva et al. (2016) em investigação sobre as mudanças espaço-temporais ocorridas no uso e cobertura da terra no município de Exu-PE, um dos que integram a bacia hidrográfica do rio Brígida.

Vale ressaltar que o avanço das áreas de Agricultura de Sequeiro é um fenômeno que se explica a partir das políticas, ou ausência delas, de desenvolvimento socioeconômico adotadas na região. Segundo Lopes et al. (2010), esse modelo de produção consiste na principal fonte de renda para a maior parte da população dos municípios que integram as bacias do Semiárido.

Outra prática muito comum é o desmatamento para a produção de lenha. Segundo Giota (2019), há na região Nordeste uma forte dependência desse elemento para a produção de energia, tanto para uso na indústria de cerâmicas e gesso, quanto para o próprio sustento das populações de baixa renda, que não dispõem de recursos para fazer uso de outros tipos de combustíveis.

Segundo Peña-arancibia et al. (2019), a remoção da vegetação nativa impõe importantes impactos sobre os recursos hídricos em bacias hidrográficas. Entre os efeitos, destaca-se o aumento do escoamento superficial, redução da infiltração de água no solo, redução das taxas de evapotranspiração, aumento da produção de sedimentos e assoreamento dos rios. Os efeitos recaem sobre a diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos, seja para correta manutenção dos processos hidrológicos das bacias hidrográficas, ou oferta para usos difusos. Em regiões de clima semiárido, como é o caso das áreas estudadas, os impactos causados por essas práticas podem ser irreversíveis, dadas as suas características físico-naturais e grau de vulnerabilidade do bioma.

De maneira geral, foi possível constatar que as bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú se encontram em contínuo processo de degradação de sua vegetação natural. Os impactos sobre os processos hidrológicos anteriormente citados podem estar ocorrendo na região, porém, o grau de magnitude exige um estudo com análises mais específicas, que podem ser norteadas a partir dos resultados aqui expostos.

5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Resultados pertinentes às diferentes etapas do processo de calibração e validação do modelo hidrológico para as duas bacias hidrográficas modeladas.

5.2.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros para calibração e validação do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

A análise de sensibilidade automática dos parâmetros para calibração foi realizada para apenas uma estação fluviométrica (4882000), localizada à montante, no município de Afogados da Ingazeira, como parte fundamental do teste à hipótese do presente estudo. Essa estação encontra-se no exutório da sub-bacia número 5, definido pelo SWAT. A área de influência sobre o escoamento superficial nesse trecho corresponde a 21% do total da superfície da bacia.

Nessa região é possível encontrar todas as classes de solos, uso e cobertura da terra e também declividade, distribuídas ao longo da bacia hidrográfica do rio Pajeú. Em relação à declividade, por exemplo, os maiores valores de inclinação são encontrados na porção mais ao norte, nas áreas de chapada. Esse padrão é observado ao longo de toda a bacia. Quanto ao uso e cobertura da terra, a classe Savana Estépica Arborizada também ocupa a maior parte (69,6%) da subárea utilizada na calibração. Esse intervalo percentual está próximo do encontrado para toda a bacia (73,5%). A segunda classe mais representativa é a de Agricultura de Sequeiro, que ocupa 29,3%, da região, ou seja, 6% menor do que o encontrado em toda a bacia.

A comparação realizada entre o padrão de dominância e distribuição das classes encontradas na área de influência do escoamento superficial sobre a estação fluviométrica utilizada na calibração, em relação ao encontrado em toda a área de estudo (bacia do rio Pajeú), evidencia que as semelhanças são importantes, com pequenas variações observadas para algumas áreas e classes.

Em relação à sub-bacia calibrada, essa apresenta vegetação predominantemente natural (Savana Estépica Florestada), reduzidas áreas de pastagem e pouca influência urbana. A vazão de seu rio, para o período de análise (1961 a 1974) não sofreu influência de reservatórios, seja por sua localização ou pelo ano de construção desses. Assim, o regime fluviométrico do rio nesse trecho é compreendido como natural.

Em relação aos parâmetros utilizados para análise de sensibilidade, dos identificados como sensíveis durante a simulação (20), cinco (Tabela 2) apresentaram maior nível de sensibilidade quando comparados aos demais. Percebeu-se que conforme os parâmetros perdiam importância na simulação, seus respectivos descartes, um a um, contribuíram para a melhora do desempenho do modelo quanto à resposta na alteração dos intervalos. Adotou-se, inicialmente, um intervalo de incertezas, quanto aos dados de entrada, variando entre -20% e 20%. Os demais variaram de acordo com o sugerido na literatura (ARNOLD et al., 2012b).

Tabela 4 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual em uma sub-bacia do rio Pajeú

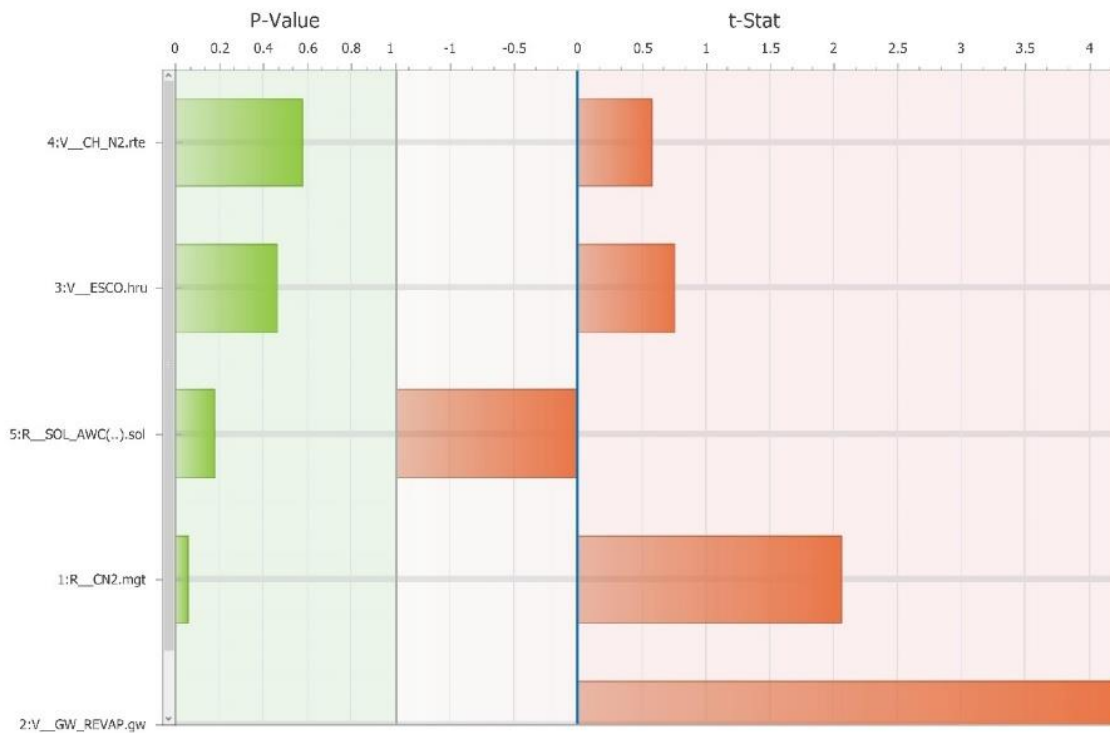
Parâmetros	Definição	Intervalo
r_CN2.mgt	Curva número do escoamento superficial (%)	-0,2 a 0,2
r_SOL_AWC().sol	Capacidade de água disponível por camada de solo (%)	-0,2 a 0,2
v_GW_REVAP.gw	Coeficiente de fluxo subterrâneo (adimensional)	0,02 a 0,2
r_CH_N2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm / h)	-0.01 a 500
V_ESCO.hru	Fator de compensação de água por plantas (adimensional)	0 a 1

Fonte: O autor (2021).

O nível de significância estatística para a importância de cada parâmetro utilizado na simulação da vazão pode ser visualizado na Figura 12. Observa-se que entre todos, o CN2 apresentou maior grau de influência para a simulação, e também para o consequente ajuste do modelo, visto que seu valor final se encontra dentro do intervalo de significância estatística ($P\text{-value} \leq 0,05$). Esse resultado corrobora estudos como os conduzidos por Moreira, Schwaback e Rigo (2018), e Paz et al. (2018). Vale ressaltar que, segundo Lelis et al. (2012), o parâmetro CN2 é, com frequência, o que apresenta maior importância para calibração da vazão na maior parte dos estudos.

Os demais parâmetros apresentaram intervalo de variação fora do limite de significância, porém, não foram excluídos pois isso resultou em perda de eficiência para simulação da vazão no trecho selecionado. O baixo número de parâmetros diverge de alguns estudos sobre análise de sensibilidade, como observado em Brighenti et al. (2019), Koo et al. (2020) e Qi et al. (2020). Porém, vale salientar que, anteriormente, Arnold et al. (2012) afirmaram que em muitos estudos é possível encontrar procedimentos de calibração que utilizam, com certas variações, os mesmos parâmetros encontrados no presente estudo.

Figura 12– Nível de significância estatística dos parâmetros mais sensíveis na simulação da vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú

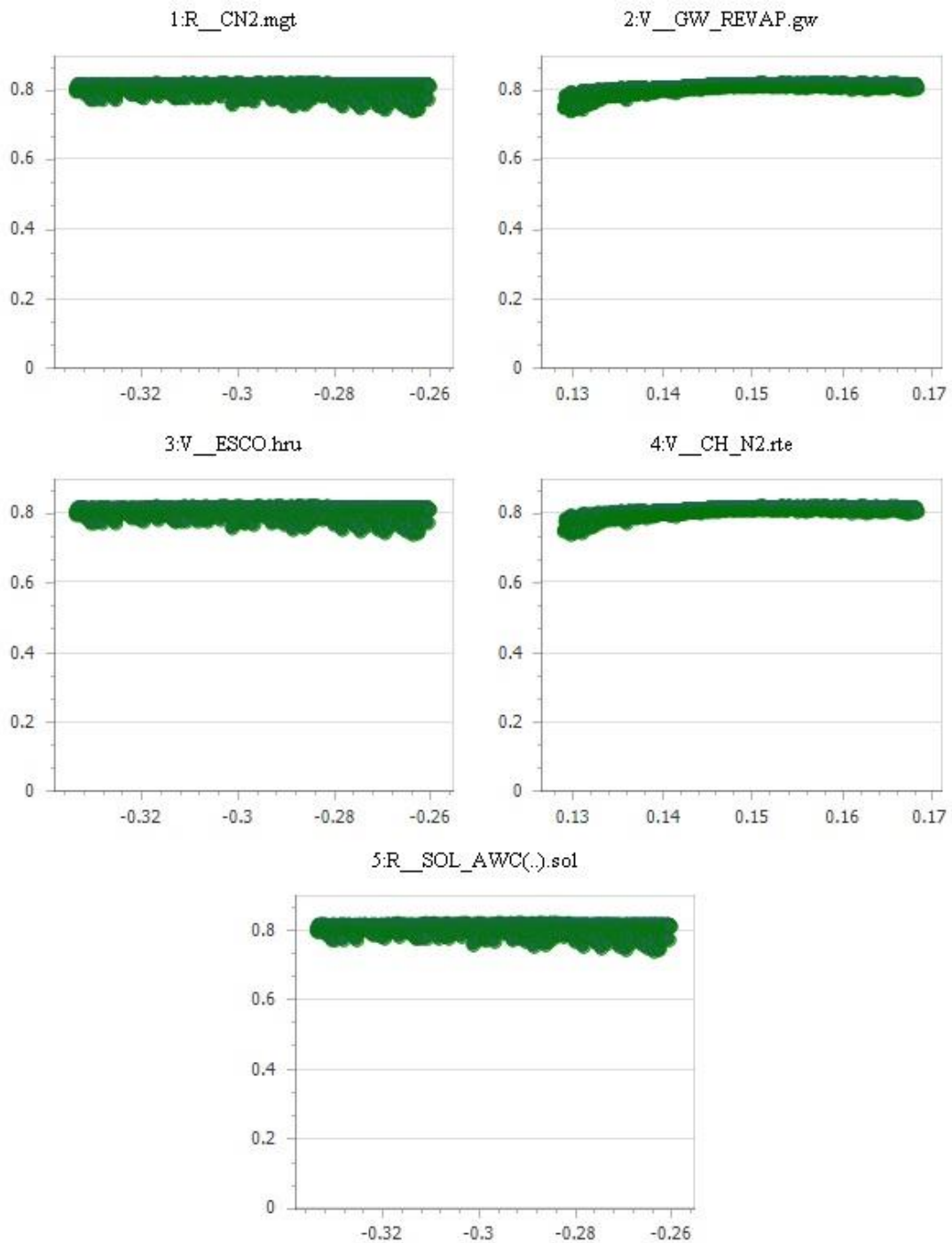


Fonte: O autor.

Após a identificação dos parâmetros mais sensíveis, buscou-se encontrar o intervalo de variação ideal para obter máximo desempenho do modelo. Ao todo, foram realizadas 1100 simulações. As primeiras 100 apenas com 20 iterações, e as demais com 1000. Ao alcançar o limite de testes com 20 iterações, obteve-se Nash-Sutcliffe de 0,80 e R^2 igual a 0,82. Os referidos valores indicam que o modelo é capaz de representar, com bom nível de confiança, os processos hidrológicos sub-bacia em questão.

Todavia, foi realizada uma simulação final com 1000 iterações, a fim de refinar o resultado através de um maior número de combinações de intervalos para cada um dos parâmetros selecionados. A distribuição do padrão de variação dos valores para cada parâmetro pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 - Intervalo de variação dos parâmetros utilizados para calibração do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú



Fonte: O autor (2021).

Observa-se que os pontos para os eixos x e y se concentram na parte superior dos gráficos, associados a valores de Nash-Sutcliffe abaixo e acima de 0,8. Isso indica que o limite de possibilidades para possível melhora do desempenho foi alcançado. Ainda assim, é possível constatar que houve melhora na performance do modelo em relação ao número de

iterações anteriores (20), em que o Nash-Sutcliffe passou de 0,80 para 0,84 e o R^2 0,82 para 0,91.

Ao final das simulações, foi obtido o valor ideal de calibração para cada um dos parâmetros, de modo a obter máxima eficiência na calibração do modelo. O resumo desses resultados pode ser visualizado na Tabela 3. De modo geral, os valores observados refletem o que comumente é encontrado na literatura quanto aos ajustes necessários em razão das incertezas relacionadas aos dados de entrada.

Por outro lado, chama a atenção o intervalo fixo ideal encontrado para parâmetros como o CN2, responsável pela curva do escoamento superficial e SOL_AWC, que responde à capacidade disponível de água no solo. Esses, encontram-se acima do intervalo adotado inicialmente no presente estudo (-20% - 20%). Na literatura é possível encontrar pesquisas que admitem níveis de incertezas, quanto às variáveis de entrada, que variam entre $\pm 20\%$ a $\pm 60\%$ (ALEGRE; CLARA; FRANCO, 2017; HEISTERMANN; MÜLLER; RONNEBERGER, 2006; SHAWUL; ALAMIREW; DINKA, 2013; VILAYSANE et al., 2015), ainda que o limite ideal seja em torno de 20%.

O acréscimo ao valor inicial foi atribuído automaticamente, conforme necessidade identificada pelo algoritmo SUFI-2. Todavia, essa resposta está alinhada às características dos dados de solos, por exemplo. Essa variável é uma das que possuem significativa importância para a curva do escoamento superficial. Na bacia hidrográfica do rio Pajeú, algumas informações pertinentes às características físico-químicas de determinadas classes de solos não foram encontradas. Assim, houve a necessidade de importar de áreas próximas essas informações, o que pode ter contribuído para o aumento das incertezas.

Tabela 5 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Pajeú

Parâmetros	Definição	Fixo
r_CN2.mgt	Curva número do escoamento superficial (%)	0,26
r_SOL_AWC().sol	Capacidade de água disponível por camada de solo (%)	0,25
v_GW_REVAP.gw	Coeficiente de fluxo subterrâneo (adimensional)	0,15
r_CH_N2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal(mm/h)	0,13
V_ESCO.hru	Fator de compensação de água por plantas (adimensional)	0 a 1

Fonte: O autor (2021).

5.2.2 Curva da vazão observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

O hidrograma representado na Figura 1 expõe a comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT, para a sub-bacia número 5 do rio Pajeú, localizada à montante. A análise sobre o resultado permite identificar que o modelo, a partir dos dados de entrada e parâmetros ajustados, consegue detectar bem o padrão de variação da vazão anual observada para todo o período de análise.

Levando em consideração o *p-factor* e *r-factor*, os resultados da simulação podem ser considerados satisfatórios, com valores de 0,10 e 0,17, respectivamente. São frequentemente utilizados para medir a força da calibração e podem servir como um forte indicativo de alta incerteza quanto aos dados de entrada quando seus valores se apresentam distantes do recomendado. Segundo Tang, Xu e Xu, (2012), um *p-factor* igual a 1 e *r-factor* próximo de zero, indicam um bom ajuste do modelo para predição do escoamento superficial.

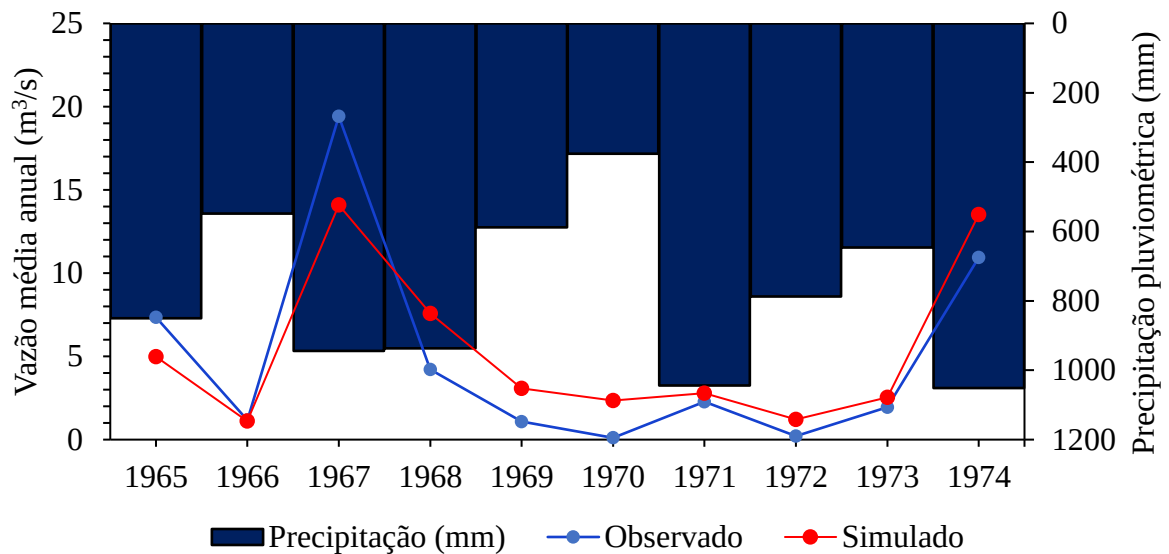
Quanto ao volume estimado em relação ao observado, a análise da Figura 12 indica que o modelo superestima o fluxo em 80% do período, seja com valores de vazão mais próximos ao pico (19,4 m/s) ou de zero. Esse resultado pôde ser constatado não só visualmente, mas também por meio do teste estatístico P-BIAS, para o qual obteve-se valor de -7,0%. Esse resultado é considerado muito bom, visto que, de acordo com LI et al. (2009), ele está dentro da variação tolerada, que vai de -25% a 25%.

Chama atenção, também, o atraso da resposta da vazão, seja observada ou simulada, em relação à precipitação pluviométrica. Isso é confirmado por meio do teste de correlação, para o qual obteve-se $R^2 = 0,62$. Por outro lado, é pertinente pontuar que os anos de 1971 e 1972 são os que mais se destacam em relação ao atraso na resposta. Quando excluídos da simulação, o R^2 salta para 0,85. O ano de 1971 se destaca entre os demais em relação esse aspecto, visto que é o segundo mais chuvoso dentro da série (1044 mm), porém é o que possui uma das menores vazões observadas ou simuladas (2,2 m³/s).

Esse padrão observado pode estar associado à irregularidade da distribuição espacial das chuvas, espacialização inadequada dos postos de precipitação pluviométrica, construção de novos reservatórios, ou até mesmo erro dos dados utilizados na modelagem. Vale ressaltar que essas são hipóteses que podem explicar o padrão discordante entre a vazão a precipitação pluvial para determinados anos, não uma afirmativa. Para tal, outros testes são necessários. Porém, isso demanda maior quantidade de informações e também foge ao escopo do que é proposto no presente estudo.

De modo geral, o resultado para a estimativa da vazão no trecho selecionado do rio Pajeú pode ser considerado muito bom. Ainda que o *p-factor* tenha apresentado um valor longe do limite considerado ideal, as outras análises construídas a partir de diferentes métodos estatísticos reforçaram que a simulação representa bem o que é observado na realidade.

Figura 14 - Variação da vazão média anual observada, código 4882000, e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia do rio Pajeú



Fonte: O autor (2021).

5.2.3 Extrapolação dos parâmetros e validação do modelo SWAT para a bacia do rio Pajeú

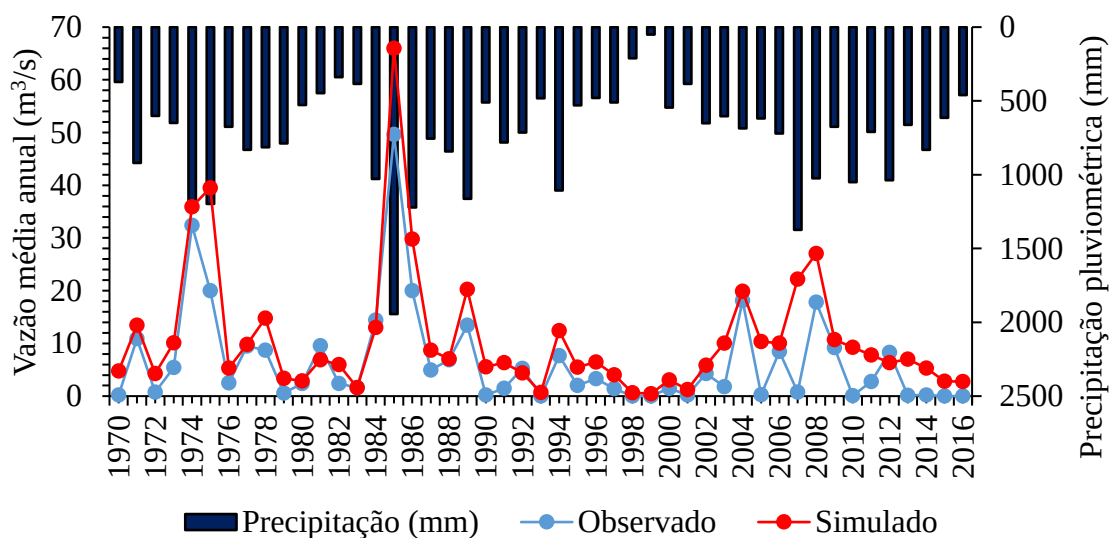
A bacia hidrográfica do rio Pajeú foi dividida em 34 sub-bacias, na qual o número 5 foi calibrada. Os parâmetros ajustados, por sua vez, foram exportados para as demais sub-bacias. Admitiu-se no presente estudo que a área apresenta, de maneira geral, certa homogeneidade sob o aspecto físico-natural. Dessa forma, as demais estações fluviométricas serviram como referência para a confirmação da calibração do SWAT, seguindo uma validação em “cascata”, ou seja, os dados de cada estação fluviométrica em direção à jusante foram comparados com os simulados pelo modelo.

A primeira estação fluviométrica mais à jusante, em relação a de calibração, essa está situada no município de Flores-PE, cujo código é 48830000 (sub-bacia número 13). Após análise e descarte dos anos com informações faltantes, delimitou-se uma série de escoamento superficial observado que se estende de 1970 a 2016, totalizando 46 anos. A comparação entre a curva da vazão observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT pode ser observada na Figura 13.

Para essa simulação, o Nash-Sutcliffe foi de 0,71, enquanto o R^2 alcançou 0,91, resultados que classificam o desempenho do modelo, quanto à predição da vazão, como muito bom. Por outro lado, o P-BIAS obtido nessa etapa de validação foi de -60%, intervalo que está acima do que é considerado ideal (-25% a 25%). Desse modo, verifica-se que há uma superestimativa do fluxo.

A análise comparativa entre as curvas de vazão (Figura 15) revela que a estimativa fica acima do dado observado em todo o período modelado. Entre os anos que mais contribuíram para o desvio, destacam-se os de 1975, 1985 e 2008. É importante ressaltar que esse comportamento também foi observado na etapa de calibração. Entre as possíveis causas de desvio de estimativa, destaca-se o uso de estações pluviométricas não tão bem representativas, incertezas quanto aos dados de entrada, estrutura conceitual do modelo, entre outros.

Figura 15 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4883000, município de Flores-PE



Fonte: O autor (2021).

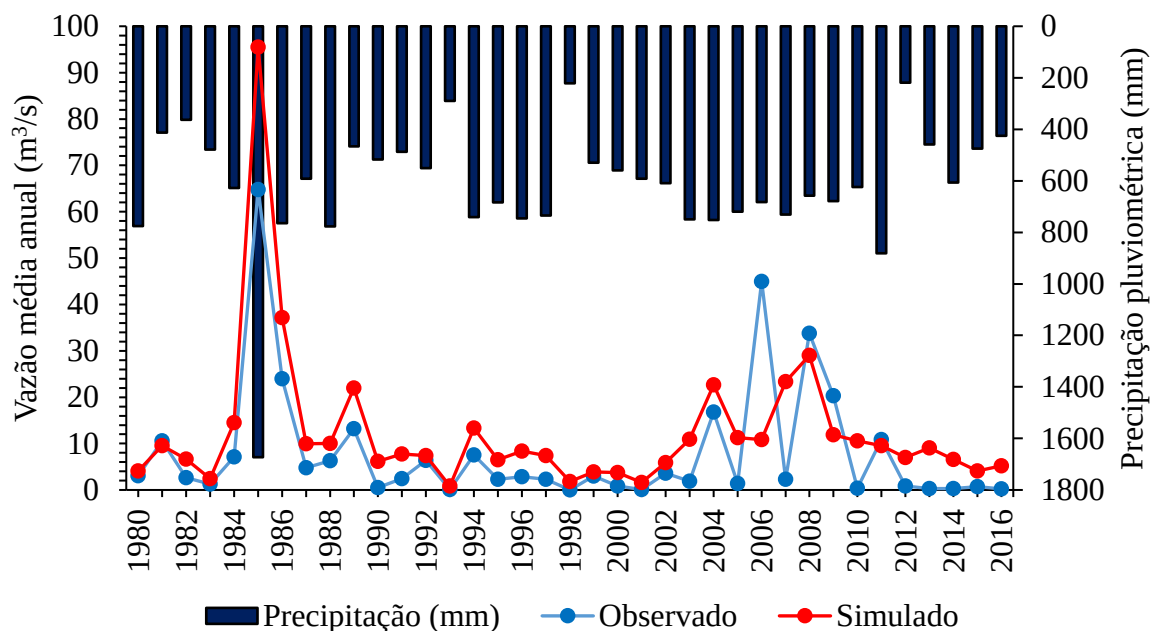
A estação fluviométrica seguinte utilizada para validação é a 4884000, localizada no município de Serra Talhada. Sua série temporal se estende de 1980 a 2016. A comparação entre a curva de vazão observada e simulada pelo SWAT pode ser visualizada na Figura 16.

Para a simulação nesse trecho do rio, o SWAT respondeu de maneira semelhante aos demais. O padrão de variação é bem detectado, porém, é perceptível que há superestimativa do fluxo para todos os anos. Em relação ao seu desempenho, o Nash-Sutcliffe encontrado foi de 0,60 e R^2 de 0,81. Quanto o P-BIAS, seu valor foi de -52%, resultado que se encontra fora

do intervalo considerado ideal e indica que o fluxo modelado foi superestimado em relação ao observado.

Os resultados estatísticos encontrados são suficientes para classificar o desempenho do modelo para simulação da vazão nesse trecho do rio como bom. A maior diferença encontrada entre o valor estimado e o observado foi de $30,7 \text{ m}^3/\text{s}$, justamente para o ano mais chuvoso da série histórica. Vale ressaltar que os modelos hidrológicos, de modo geral, apresentam certa dificuldade para detectar picos de vazão associados a eventos extremos de precipitação pluviométrica (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; MELO NETO et al., 2014).

Figura 16 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4884000, município de Serra Talhada-PE



Fonte: O autor (2021).

A penúltima estação fluviométrica (4885000) empregada na validação, está localizada no município de Serrinha-PE, sub-bacia número 21, conforme Figura 17. Nesse trecho do rio, a estimativa do SWAT quanto à predição da vazão se destacou negativamente em relação às demais. Ainda que o padrão de variação tenha sido encontrado pelo SWAT para a maior parte do período, conforme indica o R^2 , que alcançou um intervalo de 0,86, seu desempenho é classificado como muito ruim devido ao valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (-0,05) e P-BIAS igual a -78,8%.

Em relação ao coeficiente de Nash-Sutcliffe, é importante ressaltar que a ocorrência de valores negativos em análises de séries temporais modeladas indica que a variância do erro de estimativa é significativamente superior ao da variância dos dados observados. Assim, em

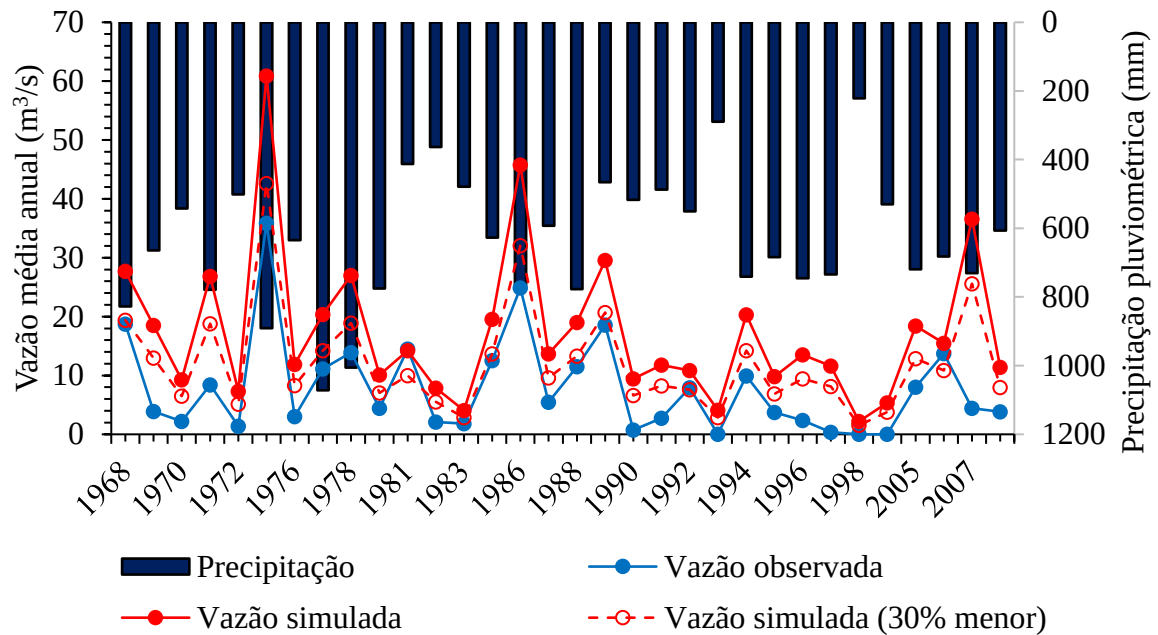
situações em que o coeficiente $\epsilon < 0$, a média observada passa a ser um preditor melhor do que o modelo em questão (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

Outro ponto importante quanto ao resultado refere-se à diferença de desempenho atestada pelo Nash-Sutcliffe (muito ruim) e pelo R^2 (muito bom). À nível de critérios adotados por cada coeficiente, tal comportamento se explica a partir da abordagem de cada um. O primeiro, leva em consideração não só os valores de correlação, mas a distância do dado simulado em relação ao observado, assim como o atraso ou antecipação da curva, enquanto o R^2 , basicamente, se limita a atestar o grau de relacionamento entre duas variáveis.

Por outro lado, os resultados encontrados não enquadram a simulação como inaceitável. Isto porque, esse trecho do rio recebe a influência de reservatórios que não foram considerados na simulação, dada a ausência de dados fundamentais como capacidade de armazenamento, área e, até mesmo, localização. Assim, quando essa realidade é considerada, percebe-se que a simulação respondeu de maneira que pode ser classificada satisfatória, visto que o maior problema observado foi relacionado a distância do dado simulado em relação ao observado.

Outra questão é que quando se analisa a série inteira, percebe-se que problemas relacionados a atrasos na resposta ou antecipação não foram recorrentes, o que ajuda a reforçar o peso da superestimativa para configuração de desempenho. Para confirmar a hipótese de que a distância entre o valor simulado para o observado foi fator determinante, a vazão estimada pelo SWAT foi reduzida em 30%, intervalo de incerteza adotado, para cada ano do período. O resultado encontrado revela que o Nash-Sutcliffe passou de -0,05 para 0,71 e o R^2 se manteve em 0,86. Quanto ao P-BIAS, esse foi reduzido de -78,8% para -53%. Se a redução da distância for de 40%, os novos valores são de 0,82, 0,86 e -31,8%. Desse limiar em diante, o SWAT passa a perder eficiência.

Figura 17 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4885000, município de Serrinha-PE



Fonte: O autor (2021).

Quanto à última estação fluviométrica utilizada na validação do SWAT (4886000), localizada no município de Floresta-PE, sub-bacia número 33, essa está instalada muito próxima do exutório principal da bacia hidrográfica. A série de vazão se inicia em 1977 e vai até 2012, conforme Figura 18. Por outro lado, para esse posto em especial, os dados apresentaram elevado número de falhas. Para não comprometer os resultados e posterior análise, os anos que apresentaram meses sem registros foram descartados, ainda que essas falhas fossem mínimas. Desse modo, a série conta com 12 anos.

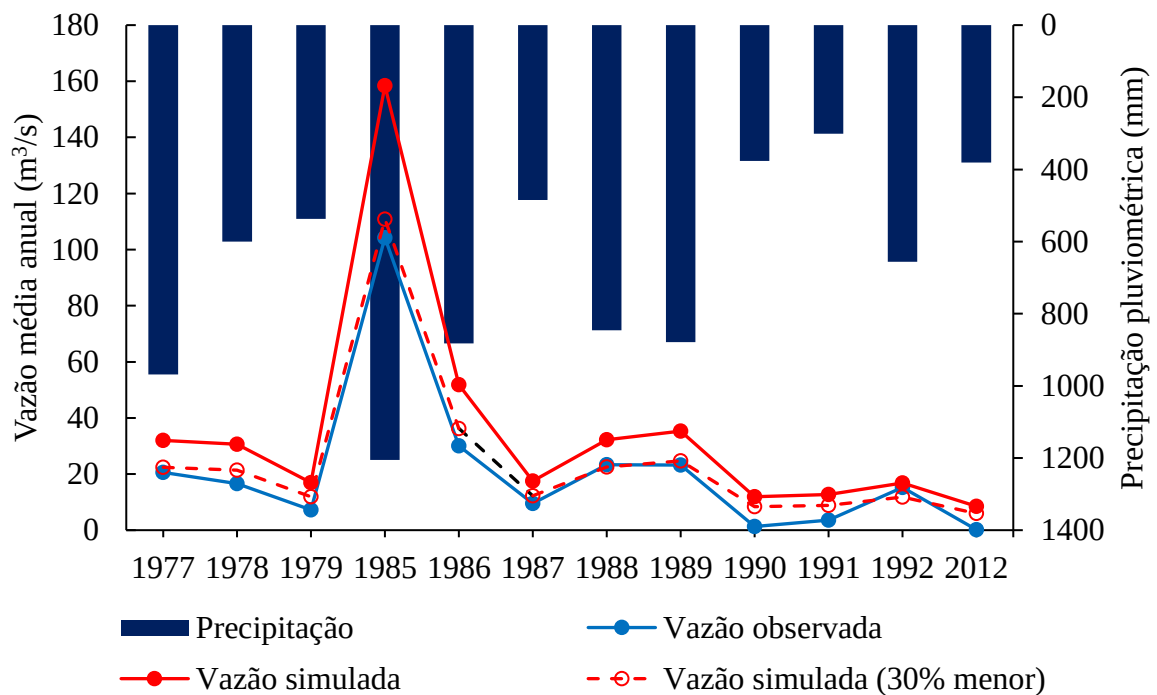
A variação da vazão observada ao longo do período foi detectada em todos os anos pelo SWAT. Na análise estatística, o desempenho do modelo pode ser classificado como bom, uma vez que o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de 0,68, enquanto o R^2 foi igual a 0,99. Quanto ao P-BIAS, esse novamente variou fora do intervalo classificado como ideal e indicou que a simulação é superestimada em relação ao dado observado.

Esse resultado chama a atenção porque a referida estação fluviométrica é subsequente a que está no trecho em que o modelo apresentou pior desempenho entre as estações de validação. Isso reforça que a ausência de informações naquela localidade, relacionadas principalmente aos reservatórios, pode ter sido determinante para o resultado encontrado. Outro ponto que pode ser levado em consideração também é a precipitação pluviométrica. Segundo Arnold et al. (2012), o uso de estações não representativas da realidade de uma bacia

hidrográfica, ou mesmo numa dada região da mesma, pode impactar negativamente no que diz respeito à qualidade do resultado.

Quando se realiza o mesmo procedimento hipotético de redução da vazão em cerca de 30%, percebe-se que há uma resposta semelhante ao trecho anterior do rio. Dentro dessa nova configuração, há uma melhor do coeficiente de análise estatística. O Nash-Sutcliffe, por exemplo, passa de 0,68 para 0,98, enquanto o R^2 se mantém em 0,99. Ou seja, isso reforça a hipótese de que a perda da distribuição espacial dos dados de precipitação e inexistência de dados para os reservatórios localizados naquele trecho da bacia foram determinantes para a perda de eficiência do SWAT na predição de vazão. Isso acontece porque o modelo “ignora” o fato de que parte da água precipitada deveria ser retida nas bacias hidráulicas, o que não ocorre devido à ausência de informações.

Figura 18 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma sub-bacia, localizada no do rio Pajeú, código 4886000, município de Serrinha-PE.



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, os resultados encontrados indicam que o SWAT teve sua validação alcançada para simulação do escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Pajeú. O uso de quatro estações fluviométricas, em diferentes pontos da bacia, indica que o modelo é capaz de representar os processos hidrológicos no tempo e no espaço de maneira consistente. O

único destaque negativo quanto ao teste de eficiência foi observado para o trecho localizado no município de Serrinha-PE, porém apresenta coerência dada a realidade dos dados.

Esse resultado pode ser melhorado através de uma nova calibração, realizada apenas nesse trecho do rio, com a possível escolha de novos parâmetros e mudanças nos intervalos dos atuais. Todavia, tal procedimento implicaria em um “forçamento do modelo”, visto que ele tende a eliminar as incertezas decorrentes da ausência de dados. Isso provocaria um “super ajuste”, o que produziria sensibilidade para responder a possíveis mudanças em variáveis como uso e cobertura da terra, variabilidade e mudanças climáticas, entre outros.

5.3 CALIBRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA

Os parâmetros utilizados para a calibração da bacia hidrográfica do rio Brígida foram importados da bacia do rio Pajeú, com o mesmo intervalo de incertezas. Sem que fosse realizado nenhum ajuste adicional, o SWAT apresentou um bom desempenho estatístico quanto à simulação da vazão do rio. O Nash-Sutcliffe foi de 0,88, enquanto o R^2 e P-BIAS alcançaram o intervalo de 0,92 e -23,7%, respectivamente. Esses resultados são suficientes para classificar o modelo como calibrado, ou seja, atesta sua capacidade de prever com bom nível de confiança a dinâmica de escoamento superficial da bacia hidrográfica em questão.

Todavia, é importante admitir que apesar das semelhanças físicas entre as bacias hidrográficas, como relevo, vegetação, características físico-químicas dos solos, clima, entre outros, é importante admitir que existem também certas peculiaridades que as separam. Desse modo, foi realizado um processo de ajuste mais específico nos parâmetros da bacia do rio Brígida, considerando apenas sua realidade. Os novos intervalos de variação podem ser visualizados na Tabela 4, que também conta com os encontrados definidos para a bacia do Pajeú, para efeito de comparação.

É possível constatar que dos cinco parâmetros utilizados para as calibrações, apenas dois apresentaram diferenças significativas (SOL_AWC.sol) e GW_REVAP.gw), porém a maior diferença foi observada para o GW_REVAP.gw. Os demais parâmetros não apresentaram distância maiores que 20%, o que reforça o peso das características que aproximam as duas bacias hidrográficas em questão. Em relação ao desempenho do modelo, esse foi melhorado substancialmente uma vez que os foram obtidos coeficientes de Nash-Sutcliffe = 0,91, R^2 = 0,93 e P-BIAS = -5,4%.

Tabela 6 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Brígida e Pajeú

Parâmetros	Fixo (Brígida)	Fixo (Pajeú)
r__CN2.mgt	0,27	0,26
r__SOL_AWC().sol	0,15	0,25
v__GW_REVAP.gw	0,81	0,15
r__CH_N2.rte	0,10	0,13
V__ESCO.hru	0,82	0,74

Fonte: O autor (2021).

Esses resultados, em geral, divergem do que foi encontrado por Ferreira e Souza (2020), que calibraram o modelo SWAT, com as mesmas entradas e configurações do presente estudo, para a bacia hidrográfica do rio Brígida. A divergência mais importante refere-se ao número de parâmetros utilizados. Enquanto no presente estudo o modelo foi calibrado com apenas cinco parâmetros, os autores lançaram mão de oito.

Vale ressaltar que a simples redução do número de parâmetros não significa necessariamente que houve uma melhora quanto ao procedimento metodológico, todavia é um resultado promissor, pois tende a diminuir a complexidade do modelo durante a etapa de ajuste, o que acaba por reduzir, também, o nível de interferência do pesquisador sobre os dados de entrada.

Outro ponto observado no estudo citado diz respeito à extrapolação dos parâmetros realizada pelos autores para toda a região. A estação fluviométrica calibrada pelos mesmos se encontra próxima a jusante do rio, porém, só registra o fluxo que é influenciado pelos canais que se encontram na porção oeste da unidade. O que elenca o seguinte questionamento: é possível admitir que os parâmetros calibrados possam ser considerados para toda a bacia? De acordo com os resultados encontrados no presente estudo, tal procedimento não só é possível, como foi provado a partir da calibração e validação indireta da bacia do rio Pajeú e extrapolação de seus parâmetros para a do rio Brígida.

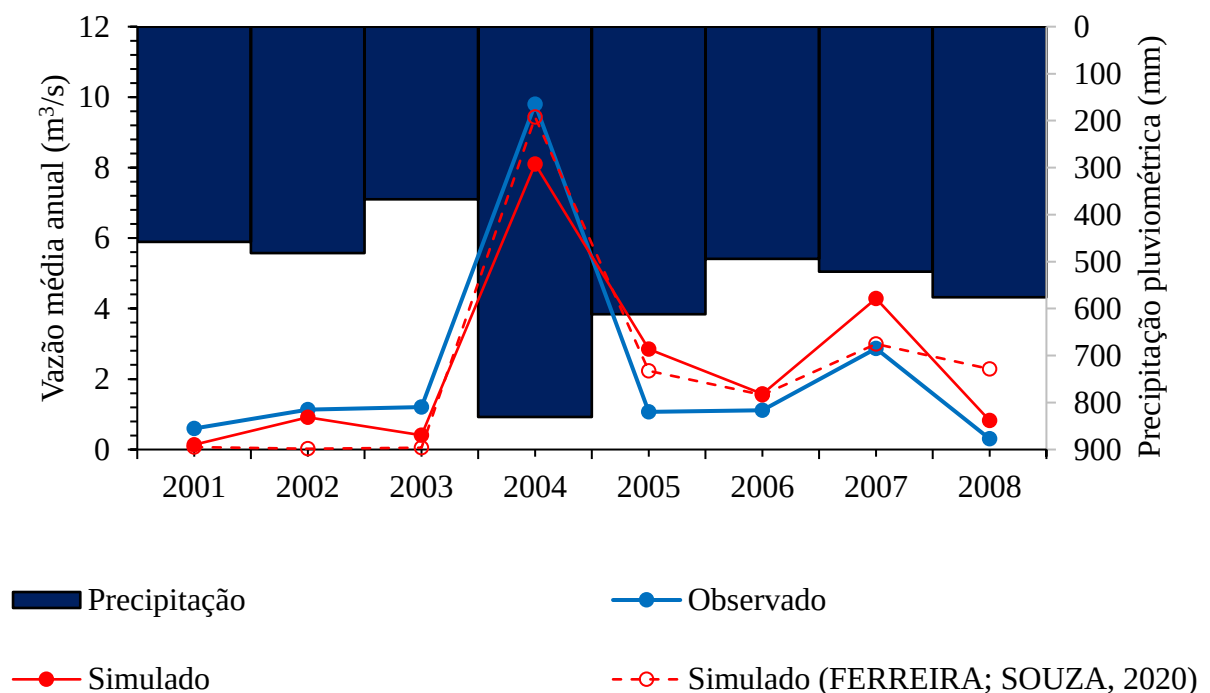
5.3.1 Comparação entre a vazão observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida

A comparação entre a curva da vazão observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida pode ser visualizada na Figura 19. Também é

possível visualizar os resultados encontrados por Ferreira e Souza (2020) para o mesmo procedimento.

Nas duas simulações fica claro que o SWAT foi capaz de representar o padrão de variação da vazão observada, embora, sob esse aspecto, essa detecção tenha sido mais eficiente para os resultados encontrados no presente estudo. As diferenças mais importantes se referem ao erro de estimativa ano a ano. Enquanto a curva simulada por Ferreira e Souza foi mais eficiente para simular os extremos (2004), o que não é algo comum para modelos hidrológicos, os resultados do presente estudo representaram melhor os volumes mais baixos, entre 0 e 2 m³/s, associados a vazões de estiagem, o que também foge do que geralmente é encontrado na literatura (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; WANG et al., 2009).

Figura 19 - Variação da vazão média anual observada e simulada pelo modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, percebe-se que nos dois estudos em questão alcançaram resultados que confirmam a capacidade do modelo SWAT em simular o escoamento superficial da bacia com alto nível de confiabilidade. A diferença entre os parâmetros escolhidos, assim como os intervalos de variação, foi suficiente, apenas, para modificar a sensibilidade do modelo em relação aos eventos a detecção das vazões de estiagem e eventos hidrológicos considerados extremos, como o ocorrido em 2004.

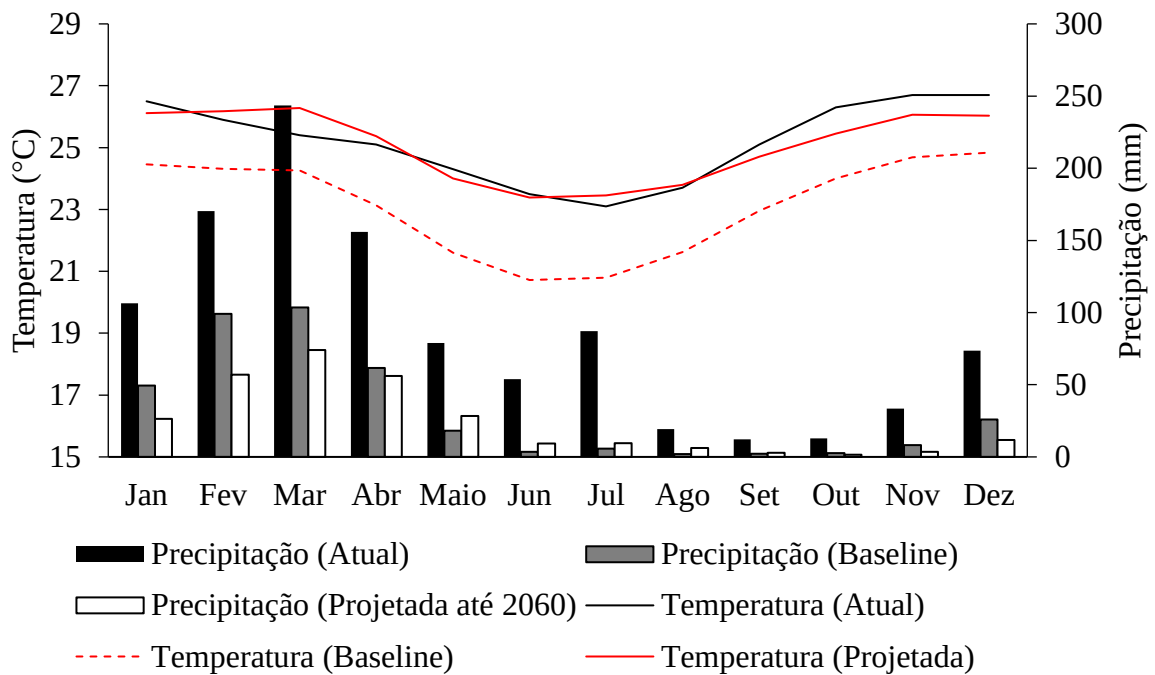
5.4 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Resultados encontrados para os cenários de mudanças climáticas para as bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú

5.4.1 Padrão atual e futuro de temperatura e precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

O padrão de temperatura do ar e precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, assim como os cenários futuros, baseados em projeções do modelo climático regional Eta, pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Projeção climática para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, baseada em variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica.



Fonte: O autor (2021).

Observa-se que a comparação entre o padrão atual de temperatura e o simulado pelo modelo em questão, para avaliação do seu desempenho, revelou que o mesmo é capaz de representar tanto o padrão de temperatura anual quanto o de chuvas. Por outro lado, é importante frisar que existem diferenças significantes no que diz respeito à distância entre os valores que representam a última normal climatológica e o que é indicado pelo Eta.

A diferença média entre o *baseline* do simulador climático em relação ao padrão atual é de 2 °C. Por outro lado, os resultados para diferentes métodos estatísticos empregados para avaliação do desempenho do Eta na simulação do clima atual revelaram que suas projeções são consistentes. Em relação ao R^2 , alcançou-se um valor de 0,96, Nash-Sutcliffe de 0,99 e P-BIAS de 0,74%. Esse último coeficiente indica que o modelo subestima, de modo geral, os valores de temperatura para o cenário atual. Por outro lado, o intervalo de variação encontra-se dentro do aceitável.

Quanto à precipitação pluviométrica, também foram encontrados valores que apontam para um ajuste classificado como satisfatório, porém com menor grau de eficiência ($R^2 = 0,93$, Nash-Sutcliffe = 0,64, P-BIAS = 51, 2%) se comparada a temperatura. Esse resultado está dentro do esperado para esse tipo de previsão, conforme trabalho de correção das simulações do modelo Eta/CPTEC – HADCM3, desenvolvido por Silva et al. (2020). Resultados semelhantes foram encontrados por Ferreira e Souza (2020), que projetaram diferentes cenários climáticos para a bacia hidrográfica do rio Brígida, baseados em modelos climáticos de escala global.

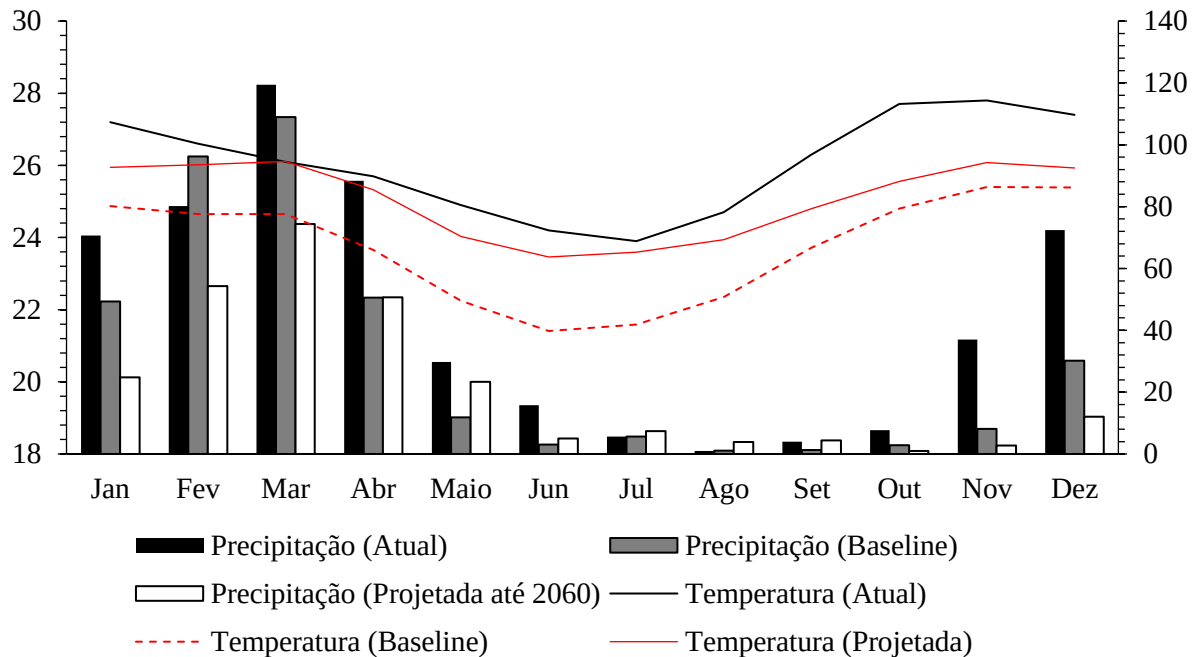
Quanto à projeção climática que corresponde ao período de 2020 a 2060, os resultados indicam que houve um leve aumento da temperatura média para os meses de fevereiro, março, abril, julho e agosto. Para os demais, verificou-se resfriamento. Não houve aumento ou diminuição superior a 0,5 °C. Para a precipitação pluviométrica, a redução média mensal foi de 63,3 mm. Em relação à temperatura, o aumento é considerado pequeno se comparado às projeções encontradas nos relatórios do IPCC para o Nordeste. Por outro lado, os impactos sobre a precipitação são significativos, sobretudo para o período chuvoso, que conforme o exibido no climograma, se estende de janeiro a abril.

De modo geral, é possível concluir que o modelo adotado para previsão do clima futuro na bacia hidrográfica do rio Pajeú apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à análise de desempenho. Quanto às previsões, estas estão alinhadas com o que é, geralmente, encontrado na literatura, conforme do último estudo supracitado.

5.4.2 Padrão atual e futuro de temperatura e precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Brígida

Em relação ao padrão e projeção climática da bacia hidrográfica do rio Brígida, o resumo dos resultados pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Projeção climática para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, baseada em variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica.



Fonte: O autor (2021).

É possível observar que em relação à predição do clima atual, para a variável temperatura média do ar, o modelo Eta indica temperaturas mais baixas, em média, 2,3 °C. Para a precipitação pluviométrica, a diferença média mensal é de 13,5 mm.

Entretanto, assim como o que fora observado para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, o desempenho do modelo pode ser classificado como satisfatório, com resultados ainda mais consistentes. Para a temperatura, foram encontrados valores de $R^2 = 0,96$, Nash-Sutcliffe = 0,99 e P-BIAS = 1,2%. Em relação à precipitação pluviométrica, os valores observados para os coeficientes empregados foram de $R^2 = 0,9$, Nash-Sutcliffe = 0,86 e P-BIAS = 19,1%.

As projeções para as duas variáveis climáticas indicam condições bem distintas. O padrão de variação da temperatura média do ar é mantido ao longo do período, porém, não indica aquecimento para os meses em questão, uma vez que na maior parte do intervalo verificam-se reduções da média térmica.

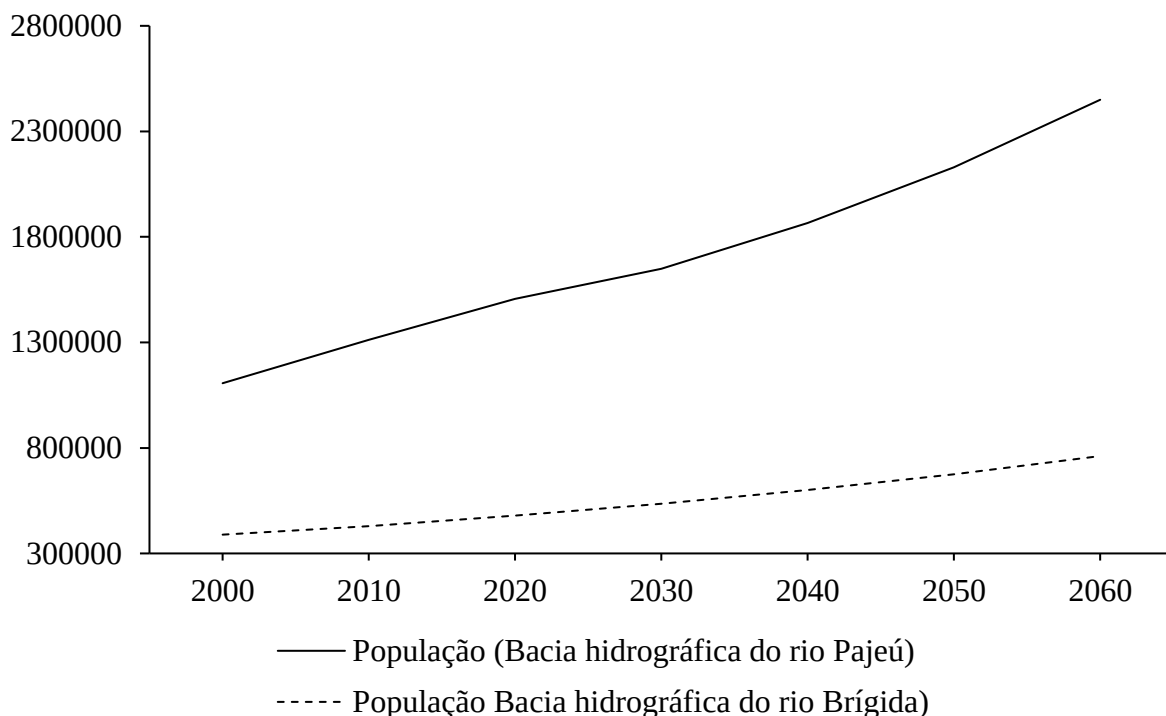
As maiores alterações foram encontradas para a precipitação pluviométrica. Ainda que se verifique manutenção do padrão de distribuição ao longo do ano, houve significativa redução do volume de chuvas, com média mensal de 22,3 mm. Como observado para a bacia do rio Pajeú, as maiores perdas são constatadas para a pré-estação chuvosa e inverno. Os meses de dezembro, janeiro e março foram os mais afetados, com quedas de 60,3, 45,9 e 45 mm, respectivamente.

Em geral, as maiores mudanças para o cenário futuro foram observadas para a precipitação pluviométrica, o que de fato está alinhado com os últimos relatórios do IPCC. Por outro lado, em relação à temperatura, o padrão praticamente indica que pode haver uma espécie de “resfriamento”, o que se destoa dos resultados encontrados por Ferreira et al. (2017b); Ferreira e Souza (2020), sob diferentes abordagens, para a própria região.

5.5 CENÁRIOS DE EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA

Na Figura 22 encontram-se as projeções demográficas para as bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida. O período analisado se estende de 2000 a 2060. É importante ressaltar que o contingente populacional observado entre 2000 e 2020, nas duas bacias em questão, representam censos realizados por IBGE (2000 e 2010) e projeção (2020). A projeção se deve a impossibilidade de realização do censo demográfico face à pandemia do novo coronavírus (BORGES; NEPOMUCENO, 2020).

Figura 22 - Projeção populacional da população absoluta das bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú, para o período entre 2000 e 2060.



Fonte: O autor (2021).

Para validação do método proposto por Rocha, Brito Filho e Silva (2011), para projeção populacional, baseada em uma progressão geométrica, utilizou-se o ano de 2010

como referência, cujos dados levantados a partir do recenseamento foram comparados com o modelado a partir da equação proposta pelos referidos autores.

Na análise de desempenho, foram encontrados valores de $R^2 = 0,998$, Nash-Sutcliffe = 0,99 e erro de estimativa em torno de -0,01. Outro teste foi realizado para o ano de 2019, a fim de comparar os dados populacionais estimados por meio de equações calibradas pelo próprio IBGE e a empregada no presente estudo, indicou resultados muitos semelhantes aos observados para o ano de 2010. As diferenças se resumem a pequenas variações decimais em relação ao exposto anteriormente.

Quanto aos resultados da evolução populacional, o padrão da curva reflete um crescimento progressivo, o que é esperado devido à natureza do método e da própria dinâmica da população mundial. Proporcionalmente, houve maior crescimento na bacia hidrográfica do rio Brígida, em torno de 51%, contra os 45,1% observados na bacia do rio Pajeú. Porém, em termos absolutos, a bacia do rio Pajeú se destaca devido ao seu maior contingente populacional, que em 2000 é quase três vezes maior do que o constatado para bacia do rio Brígida. Apesar de serem as duas maiores bacias da região, a diferença se dá principalmente em razão da maior área e número de municípios da unidade de observação em destaque.

Os resultados sobre a projeção são diferentes dos encontrados por Ferreira e Souza (2020) para a bacia do rio Brígida. A diferença mais significativa recai sobre a percepção dos autores em manter a taxa de crescimento de 2040 para os anos posteriores, com o argumento de que, segundo dados da ONU, o ritmo de crescimento deve diminuir em função da queda nas taxas de natalidade, devido à melhora da condição de vida da população em geral e maior planejamento por parte das famílias.

A linha de raciocínio e análise dos autores de fato corresponde à realidade e pode ser constatada a partir de estudos como o conduzido por Laborde Debucquet e Martin (2018). Por outro lado, é importante destacar que em países não desenvolvidos a taxa de crescimento populacional deve ser capaz de manter o atual ritmo de crescimento. No caso do Brasil, que se enquadra na realidade de um país em desenvolvimento, às regiões interioranas, cujas condições socioeconômicas ainda demandam importante atenção, devem ser as últimas a assemelharem ao que é constatado para o mundo.

De modo geral, o modelo utilizado se mostrou promissor para predição de cenários populacionais para intervalos de 10 anos. Nas duas bacias hidrográficas em questão houve significativo crescimento populacional, que mediante a ausência de políticas adequadas de desenvolvimento socioeconômico e preservação e conservação dos recursos naturais, pode resultar em um colapso estrutural, capaz de aumentar as desigualdades sociais.

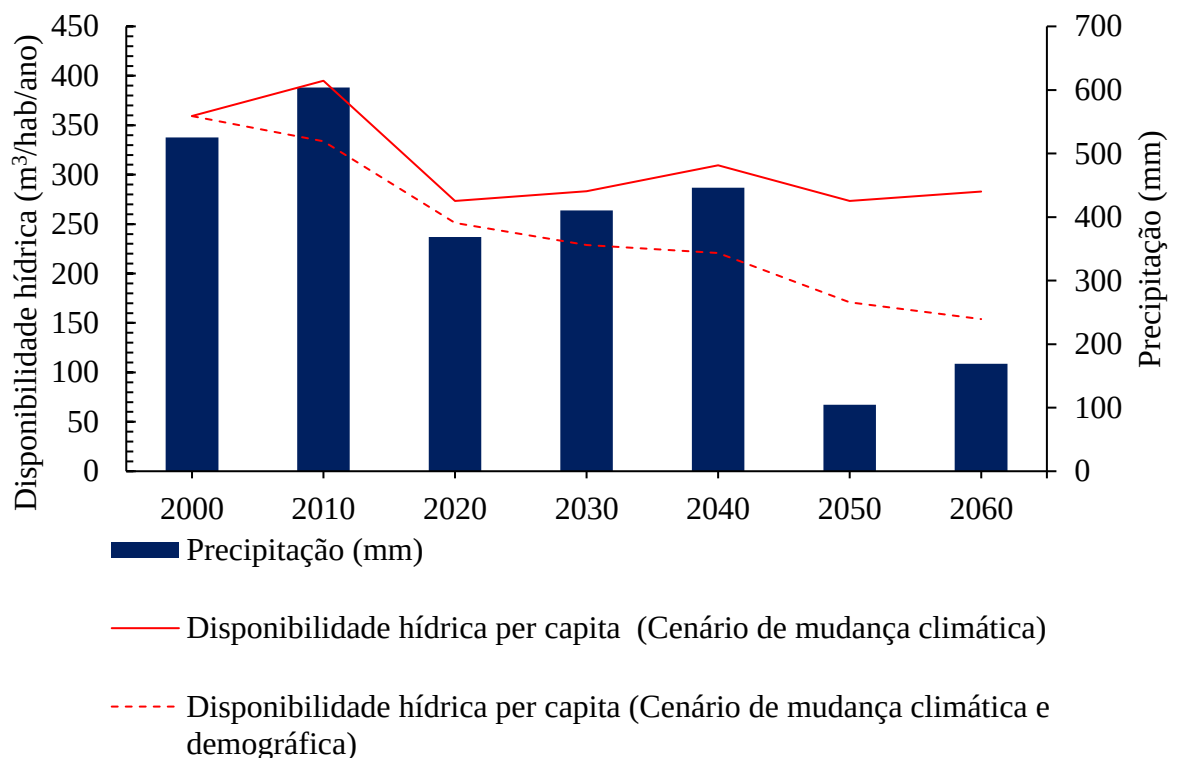
5.6 CENÁRIOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Seção destinada aos resultados encontrados para a projeção dos efeitos das mudanças climática sobre a disponibilidade hídrica.

5.6.1 Cenários de disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Brígida

Na Figura 23 é possível visualizar os diferentes cenários de disponibilidade hídrica per capita para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, frente aos efeitos das mudanças climáticas e da evolução populacional.

Figura 23 – Cenários de disponibilidade hídrica per capita para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, frente a cenários de mudanças climáticas e evolução demográfica



Fonte: O autor (2021).

Sobre a oferta de água para cada habitante, é importante destacar que de acordo com a UNESCO (2003), a disponibilidade hídrica per capita corresponde à razão entre a quantidade de água disponível no sistema pelo contingente populacional. O resultado desse cálculo indica

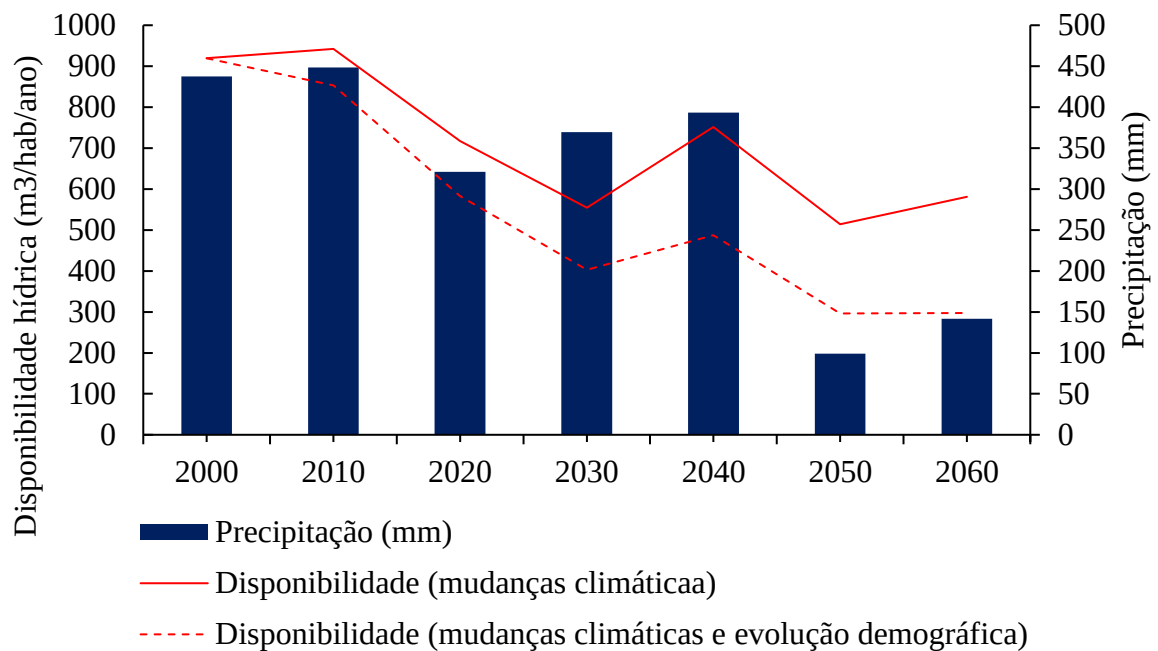
a situação hídrica dos habitantes de uma dada região. Intervalos em que a disponibilidade per capita é menor que $500 \text{ m}^3/\text{habitante/ano}$, indicam a uma condição de escassez hídrica, enquanto valores entre 500 e $1700 \text{ m}^3/\text{habitante/ano}$ são classificados como situação de estresse hídrico. A faixa considerada segura (conforto hídrico), corresponde aos intervalos superiores a $1700 \text{ m}^3/\text{habitante/ano}$.

Quando o exposto é confrontado com os resultados encontrados para estimativa da disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Pajeú, observa-se que, para todo o período (cenário atual e futuro), a região se encontra ou se encontrará em situação de escassez hídrica. Em um primeiro momento, quando considerados apenas os cenários de mudanças climáticas, no qual se descarta o crescimento populacional desde os anos 2000, verifica-se que há uma tendência de diminuição da disponibilidade hídrica, que apresenta menor quantidade por volta de 2050 ($273 \text{ m}^3/\text{habitante/ano}$). Porém, nota-se que há uma clara resposta da disponibilidade de água em relação à precipitação pluviométrica, alternando entre décadas mais úmidas ou secas.

Quando considerados os cenários de evolução demográfica, verifica-se uma queda média de $63,4 \text{ m}^3$ (25,1%) por década em relação ao cenário anterior. Nessa conjuntura, percebe-se que a variação de precipitação pluviométrica não produz alterações tão importantes quando consideradas apenas as mudanças climáticas. O crescimento populacional força a curva de disponibilidade para uma tendência negativa, estatisticamente significativa ($p\text{-valor} \leq 0,05$).

No tocante a bacia hidrográfica do rio Brígida, os cenários projetados entre os anos 2000 e 2060 podem ser visualizados na Figura 24.

Figura 24 - Cenários de disponibilidade hídrica per capita para a bacia hidrográfica do rio Brígida, frente a cenários de mudanças climáticas e evolução demográfica



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, a disponibilidade hídrica per capita na bacia é superior à do rio Pajeú. Isso se deve ao menor contingente populacional e área, assim como à presença de reservatórios com grande capacidade de armazenamento, como o Entremontes (339.334.000 m³).

Em relação aos diferentes cenários de disponibilidade hídrica per capita, quando considerados apenas os efeitos das mudanças climáticas, os intervalos indicam que a população enfrentaria uma situação de estresse hídrico mais amena em relação ao de escassez hídrica observada para o Pajeú, mas ainda sim bastante preocupante. As décadas de 2050 e 2060 são as que apresentaram menores volumes de precipitação pluviométrica e, por conseguinte, menor oferta hídrica.

Ao inserir nas análises as mudanças demográficas, constatou-se que a partir de 2030 a população sai de uma situação de estresse hídrico e entra em um estado de escassez hídrica. Esse panorama se mantém até o final do período analisado, quando a disponibilidade de água cai para patamares inferiores a 400 m³/habitante/ano.

É possível verificar que nas duas bacias hidrográficas em questão, o crescimento populacional tem maior peso na redução da disponibilidade de água. Esse mesmo efeito foi observado por Singh e Kumar (2019), que utilizaram uma metodologia semelhante à do presente estudo para estimativa da disponibilidade hídrica frente a cenários de mudanças

climáticas e demográficas na Índia. Eles concluíram que em regiões mais áridas, o fator crescimento populacional é preponderante em relação às alterações climáticas, ainda que essas possuam potencial importante em relação aos possíveis impactos sobre os recursos hídricos.

Outro estudo que merece destaque foi desenvolvido por Ferreira e Souza (2020), também para a bacia hidrográfica do rio Brígida. Esse pode ser compreendido como uma referência central para os resultados encontrados até aqui. Os autores utilizaram dois modelos climáticos para projetar cenários de disponibilidade hídrica per capita entre os anos de 2050 e 2064. O primeiro, CCCMA indicava aumento da temperatura e das condições de umidade, enquanto o segundo, o MIROC, projetou um cenário de aumento da temperatura e redução das condições de umidade. Vale salientar que os dois modelos em questão simulam o clima em escala global, diferente do empregado no presente estudo, que deriva de uma escala regional.

Os autores supracitados pontuam que em uma análise de desempenho sobre a capacidade dos modelos em representar o clima atual, o MIROC apresentou resultados mais consistentes. Dessa forma, as projeções realizadas a partir desse simulador são mais confiáveis em relação à estimativa da disponibilidade hídrica. Nesse ensaio em questão, a disponibilidade de água por habitante, por ano, variou entre 400 e 600 m³, ou seja, situações de escassez e estresse hídrico.

É importante ressaltar que o método proposto para estimativa da disponibilidade hídrica per capita não leva em consideração questões como o acesso à água, distanciamento das fontes, perda por contaminação, entre outros. Nesse sentido, se trata de uma disponibilidade bruta, para fins de planejamento geral. Outro ponto é que por se tratarem de valores brutos, os usos consuntivos e os conflitos pelo uso da água também não são considerados. Ou seja, se tratam de predições, no mínimo, otimistas, visto que existe nas bacias reservatórios que são destinados à irrigação ou de uso misto (irrigação e abastecimento humano).

Um bom exemplo do exposto é quando se converte a disponibilidade hídrica de m³/habitante para litros por habitante. No cenário mais extremo, que é para o ano de 2050, a quantidade média de água por habitante, por ano, corresponde a cerca de 171 m³. Isso corresponderia a 171 mil litros por habitante, por ano, algo em torno de 14 mil litros por mês, ou 468,4 litros por dia. Considerando apenas a escala diária, esse valor é cerca de quatro vezes o recomendado pela ONU. Porém, como pontuado anteriormente, outros fatores precisam ser considerados.

De modo geral, os resultados se mostraram consistentes quando comparados a outros estudos. As duas bacias hidrográficas analisadas, que juntas ocupam a maior parte do semiárido pernambucano, enfrentam atualmente importantes problemas relacionados à escassez hídrica. As mudanças climáticas e o crescimento populacional tendem a agravar ainda mais a situação.

Diante do exposto, fica evidente que as ações que envolvam o planejamento e gestão dos recursos hídricos devem partir de análises integradas, envolvendo diversos campos de saber. É primordial que esse comporte não só a realidade físico-natural da região, mas também a socioeconômica e cultural.

O aquecimento global é, por muitas vezes, posto como fator determinante para o agravamento de uma série de problemas ambientais, entre os quais destaca-se o da escassez hídrica. Entretanto, foi exposto aqui que os investimentos direcionados ao aumento da disponibilidade água em regiões sertanejas não podem excluir fatores importantes como as mudanças no uso e cobertura da terra, o crescimento populacional e a própria vocação econômica da região.

Aumentar a disponibilidade de água na região semiárida não é uma ação simples. Uma das propostas comuns é a construção de novas bacias hidráulicas que podem contribuir com o aumento do armazenamento de água, como apontado por Ferreira (2020) em sua conclusão. Entretanto, em determinadas realidades esse tipo de intervenção não é suportado pelo ambiente em questão, seja pela inviabilidade técnica ou até mesmo pela falta de saúde dos rios, que em sua maioria se encontram assoreados e com baixa capacidade de transporte.

Nesse sentido, é importante que antes que se realize intervenções de grande magnitude, entenda-se que um primeiro passo deve ser no sentido de desenvolver políticas públicas voltadas para a conservação ambiental, assim como aquelas direcionadas ao gerenciamento dos conflitos pelo uso da água, que devem se intensificar face aos resultados aqui expostos.

6 CONCLUSÕES

A consistência dos resultados encontrados passou pela delimitação precisa de um objetivo geral, que abarcasse os principais componentes que envolvem o tema central da pesquisa, assim como os desafios técnicos e lacunas metodológicas que ainda precisam ser preenchidas nas diferentes fases do conhecimento científico. Para que isso se tornasse possível, foi necessário alcançar diferentes objetivos específicos, que além de uma fundamentação teórica bem elaborada, demandaram também certo nível de reflexão para procedimentos inovadores dentro da perspectiva da modelagem de sistemas ambientais.

O primeiro objetivo específico proposto referiu-se à determinação das mudanças espaciais e temporais do uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú. Ao atingi-lo, foi possível constatar que as técnicas de obtenção e processamento dos dados de superfície para diferentes regiões do Brasil, empreendidas pelo MapBiomas, a partir de imagens de série do satélite Landsat, se mostraram consistentes. Foi possível não só distinguir os alvos presentes na superfície, com diferentes propriedades físico-químicas, mas observar, também, as mudanças ao longo do intervalo de tempo determinado.

Sob a perspectiva ambiental, os resultados para o mapeamento das bacias hidrográficas selecionadas revelaram um progressivo processo de degradação da vegetação nativa, convertida principalmente para uso agrícola e áreas de pastagem. Esse tipo de intervenção, causada pela ação humana, contribui para a intensificação das mudanças climáticas e aumento da escassez hídrica, processos considerados objeto de estudo central desta pesquisa. No tocante às mudanças climáticas, a diminuição das áreas de vegetação reduz o potencial de sequestro de carbono por parte das plantas, além de contribuir para a elevação da temperatura de superfície e, por conseguinte, do ar.

Nesse sentido, o primeiro resultado demonstra, por si só, o nível de complexidade associado à gestão dos recursos hídricos. Nesse caso em específico, está se destacando apenas um dos atributos ambientais até aqui analisados, o qual muitas vezes é ignorado em pesquisas mais específicas envolvendo a modelagem de bacias hidrográficas. Ou seja, constata-se a necessidade de que a gestão dos recursos hídricos na região leve em consideração a importância de estabelecer medidas para controle do desmatamento, a fim de favorecer a conservação dos recursos naturais como um todo.

Quanto ao segundo objetivo específico, que consistiu na calibração e validação, direta e indireta, do modelo hidrológico SWAT para estimativa das vazões dos rios Brígida e Pajeú, os resultados para esse procedimento, podem ser considerados promissores, principalmente

quando se leva em consideração os métodos adotados para alcançar a confirmação da hipótese sustentada no presente estudo.

A bacia do rio Pajeú, considerada estratégica para o procedimento proposto, dispõe de uma quantidade aceitável de dados de vazão, que foram imprescindíveis, conforme sua distribuição, para ajuste do modelo SWAT. As simulações realizadas para validação dos resultados do modelo se mostraram seguras, o que indica que esse é capaz de prever os processos hidrológicos da referida unidade com elevado grau de confiança.

A extrapolação dos parâmetros da região calibrada para as demais sub-bacias, assim como para a bacia hidrográfica do rio Brígida, confirmou a hipótese de que em dadas sub-regiões do Semiárido, é possível considerar que há certa homogeneidade dos principais atributos físicos considerados na modelagem de bacias hidrográficas. Isso responde, positivamente, ao primeiro questionamento que surgiu a partir do estudo para o qual se propôs dar continuidade.

Além disso, diante da escassez de dados para ajustes de modelos hidrológicos, o método aqui proposto serve como referência para superar, talvez, um dos maiores desafios no campo da modelagem de bacias hidrográficas. Obviamente, esse é um dos primeiros passos nesse sentido. Desse modo, novos estudos e testes devem ser incentivados, a fim de encontrar ampliar as novas possibilidades para enfrentamento das adversidades no campo da pesquisa científica.

O terceiro objetivo específico correspondeu à projeção de cenários climáticos futuros para as duas bacias em questão. O modelo climático regional utilizado confirmou as previsões divulgadas em diferentes estudos e relatórios. O Semiárido pernambucano pode enfrentar significativa redução da precipitação pluviométrica já para a segunda metade do presente século, caso se confirmem os prognósticos.

Isso deve favorecer o aumento da escassez de água para usos difusos, e resultar em novos impactos ambientais, cujos efeitos devem alimentar as causas, dentro de um sistema de retroalimentação. Ou seja, diante do atual estágio de desenvolvimento socioeconômico da região, a recorrência de secas mais intensas e prolongadas, em razão do aquecimento global, lançará a população a uma situação insustentável, com risco iminente de desabastecimento de água e escassez de alimentos.

Assim, é importante que as ações no tocante à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas levem em consideração a emergência de cenários extremos. A população semiárida convive com a seca há séculos. Ou seja, é um problema não resolvido e que pode ser agravado diante do que se desenha para as próximas décadas.

Quanto ao quarto objetivo específico, esse referiu-se à projeção populacional das duas bacias hidrográficas modeladas. Essa é uma das variáveis mais importantes nos planos de gestão em que recursos como a água recebem certa centralidade. O crescimento populacional resulta em aumento da demanda hídrica, seja ela direta (abastecimento para usos diversos) ou indireta (necessidade de aumentar a capacidade produção de alimentos e atividades industriais).

Evidentemente, aumento do contingente populacional não pode ser entendido como um problema em si, ainda que algumas das teorias demográficas apresentadas na estrutura de revisão sugiram isso. A pressão sobre os recursos naturais, por exemplo, tem relação com o tamanho da população, mas esse não é um fator determinante. O modelo de consumo estabelecido pela lógica de capital, assim como o nível de desenvolvimento socioeconômico e políticas adotadas na região, são decisivos para o maior ou menor grau de degradação e escassez de um dado recurso.

Em relação ao quinto e último objetivo específico, esse foi direcionado para a estimativa da disponibilidade hídrica per capita nas bacias hidrográficas dos rios Brígida e Pajeú, frente a cenários de mudanças demográficas e climáticas. A separação dos cenários climáticos e demográficos, assim como a combinação deles foi fundamental para avaliação da magnitude dos possíveis efeitos sobre a oferta e demanda hídrica.

Os resultados em si demonstraram que independentemente do tipo de mudança que ocorrerá, os efeitos serão significativos do ponto de vista da disponibilidade hídrica. Em nenhum período da série analisada, a quantidade de água por habitante chegou próxima do que é recomendado pelas entidades competentes ligados à ONU. Mesmo para o que se considera o cenário atual, ainda sem grandes mudanças, o nível de escassez é suficiente para avaliar que a população se encontra em risco. Nesse sentido, as intervenções do ponto de vista do planejamento e gestão ambiental são urgentes e precisam oferecer respostas não só para os cenários futuros, mas sobretudo para a realidade atual.

Os cenários encontrados para as bacias dos rios Brígida e Pajeú são semelhantes sob vários aspectos, sejam esses técnicos ou de ordem ambiental. Tal panorama sugere que a extrapolação dessa realidade para as demais bacias da região, de menor dimensão territorial, é possível, visto que as unidades de observação mencionadas são as mais representativas. Isso responde ao segundo questionamento norteador desta tese, que levanta a possibilidade de extrapolação da tendência de redução da disponibilidade hídrica frente à cenários demográficos e climáticos para outras bacias da região. Isso é fundamental para entender o

padrão futuro de disponibilidade hídrica em localidades onde não se dispõe de informações estratégicas.

É importante ressaltar que, ao alcançar o objetivo geral, confirmar a hipótese norteadora e responder positivamente aos questionamentos elencados, pode-se concluir que o presente estudo reúne condições para subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas adequadas à realidade socioambiental não só das bacias hidrográficas modeladas, mas das que se encontram no entorno da região. Essa é, talvez, uma das principais contribuições nesse sentido.

Diante do exposto até aqui, ao concluir o presente estudo, propõe-se que haja maior investimento na aparelhagem das bacias hidrográficas do Semiárido pernambucano. Ainda que alguns dos problemas associados a essa realidade tenham sido contornados, por meio da proposta metodológica aqui sugerida, ainda é preciso que novos testes, análises e avaliações sejam realizadas, o que demanda informações estratégicas para que se prossiga avançando nesse sentido.

Outro ponto constatado é que se tornou imperativo o desenvolvimento de estudos e planos de gestão cuja metodologia contemple uma abordagem integrada, dos fenômenos e processos socioambientais. As questões associadas à escassez de água no Semiárido pernambucano não escapam a essa demanda e isso ficou demonstrado a partir desta terminação.

Os resultados alcançados na presente tese trouxeram importantes contribuições para a gestão e monitoramento das bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, em especial, das localizadas na região do Semiárido. Este ensaio ofereceu respostas não só para os questionamentos elencados na fase inicial de desenvolvimento, mas também promoveu o avanço em relação às pesquisas que envolvem temas como modelagem hidrológica, mudanças climáticas, dinâmica populacional e o monitoramento de bacias hidrográficas, dentro de um contexto de escassez de dados ambientais para análise e aplicação de modelos preditivos.

Por fim, conclui-se que no presente estudo foi possível trazer novas contribuições no campo metodológico e para a gestão dos recursos hídricos em regiões de clima semiárido. As respostas aqui alcançadas preencheram algumas das lacunas observadas no ensaio inicial, ainda dentro de um projeto de dissertação. No entanto, outras análises podem e devem ser desenvolvidas, no sentido de testar novas hipóteses e procedimentos, com vistas a contribuir com a gestão ambiental.

REFERÊNCIAS

- 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, 2015.
- ABDALLA, M. et al. Simulating the impacts of land use in Northwest Europe on Net Ecosystem Exchange (NEE): The role of arable ecosystems, grasslands and forest plantations in climate change mitigation. **Science of the Total Environment**, v. 465, p. 325–336, 2013.
- ALCAMO, J.; HENRICHS, T.; RÖSCH, T. **World Water in 2025 - Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century**Kassel **World Water Series 2**. [s.l: s.n.].
- ALEGRE, P.; CLARA, A.; FRANCO, L. Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. v. 22, n. 35, 2017.
- ALLAM, M.; BAKR, N.; ELBABLY, W. Multi-temporal assessment of land use/land cover change in arid region based on landsat satellite imagery: Case study in Fayoum Region, Egypt. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 14, n. February, p. 8–19, 2019.
- ANJUM, M. N.; DING, Y.; SHANGGUAN, D. Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 227, n. January, p. 233–248, 2019.
- APAC. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=13>. Acesso em: 4 abr. 2016. Acesso em: 22 de novembro de 2020.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012a.
- ARNOLD, J. G. et al. **Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012**Texas Water Resources Institute, TR-439. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2020
- ARRIETA, I. . Evaluation and diagnosis of General Circulation Climate Models (GCMs). **EOLO Research Group on Meteorology, Climate and Environment. University of the Basque Country: Basque Country**, 2012.
- ASCHE, F.; SMITH, M. D. Viewpoint: Induced Innovation in Fisheries and Aquaculture. **Food Policy**, v. 76, n. January, p. 1–7, 2018.
- ASSIS, J. M. .; SOUZA, W. .; SOBRAL, M. C. M. Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the são francisco river basin based on the rain anomaly index. **Revista Brasileira de Ciências**, v. 2, n. 1, p. 188–202, 2015.
- BAI, Y.; OCHUODHO, T. O.; YANG, J. Impact of land use and climate change on water-

related ecosystem services in Kentucky, USA. **Ecological Indicators**, v. 102, n. July 2018, p. 51–64, 2019.

BATES, B. et al. **El Cambio Climático y el Agua**. Ginebra: Secretaría del IPCC, 2008.

BEVEN, K. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 17, p. 3447–3460, 2004.

BHATTA, B. et al. Modelling the impact of past and future climate scenarios on streamflow in a highly mountainous watershed: A case study in the West Seti River Basin, Nepal. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140–156, 2020.

BORGES, G. M.; NEPOMUCENO, M. R. A contribuição da demografia para os estudos de mortalidade em tempos de pandemia. **Revista Brasileira de Estudos de Populacao**, v. 37, n. 716323, p. 1–9, 2020.

BRESSIANI, D. DE A. et al. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BRIGHENTI, T. M. et al. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. **Ecological Engineering**, v. 127, n. November 2018, p. 103–113, 2019.

BRITO, B. N. DE; SILVA, E. B. DA. Análise multitemporal de uso e cobertura da terra na Reserva da Biosfera do Cerrado. **Ateliê Geográfico**, v. 13, n. 2, p. 73–91, 2019.

BRUNET, R.; FERRAS, R. **Les monts de la Geographie: dictionnaire critique**. 2ed. 2reim ed. [s.l.: s.n.].

CHEN, Y. et al. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models. **Journal of Hydrology**, v. 573, n. December 2018, p. 486–500, 2019.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2. ed. São Paulo: 2004, 2004.

COPERTINO, M. et al. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 4, p. 04–05, 2019.

DE MIRANDA, R. A. C.; DE OLIVEIRA, M. V. S.; DA SILVA, D. F. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109–119, 2010.

DEVARAJU, N. et al. Quantifying the Relative Importance of Direct and Indirect Biophysical Effects of Deforestation on Surface Temperature and Teleconnections. **Journal of Climate**, v. 31, n. 10, p. 3811–3829, 15 maio 2018.

DISTEFANO, T.; KELLY, S. Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. **Ecological Economics**, v. 142, p. 130–147, 2017.

FALKENMARK, F. The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed. **Ambio**, v. 12, n. 2, p. 112–118, 1989.

FARAMARZI, M. et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 85–101, 2013.

FERNANDES, J. G. **Estimativa De Vazão e Produção de Sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

FERREIRA, P. D. S. et al. As perspectivas e divergências acerca do aquecimento global antropogênico. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 51, p. 728–747, 2017a.

FERREIRA, P. DOS S. et al. Avaliação Da Tendência Espaço-Temporal Da Precipitação Pluviométrica Em Uma Região Semiárida Do Estado De Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 113–134, 2017b.

FERREIRA, P. DOS S.; SOUZA, W. M. Modelagem Hidroclimática E Demográfica Para Estimativa Da Disponibilidade Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Brígida. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 16, p. 181–196, 2020.

GABIRI, G. et al. Modelling the impact of land use management on water resources in a tropical inland valley catchment of central Uganda, East Africa. **Science of the Total Environment**, v. 653, p. 1052–1066, 2019.

GALLANT, A.; KAROLY, D.; GLEASON, K. Consistent trends in modified climate extremes index in the U.S.A., Europe and Australia. **Journal of Climate**, v. 27, p. 1379–1394, 2014.

GAO, L. et al. Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation. **Atmospheric Research**, v. 205, p. 60–69, 2018.

GEOFFROY, O. et al. Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part I: Analytical solution and parameter calibration using CMIP5 AOGCM experiments. **Journal of Climate**, v. 26, n. 6, p. 1841–1857, 2013.

GIODA, A. Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil. **Estudos Avancados**, v. 33, n. 95, p. 133–149, 2019.

GOMES DA SILVA, M. L. et al. Análise Espaço-Temporal Do Uso E Cobertura Da Terra No Município De Exu – Pe. **CLIO – Arqueológica**, v. 31, n. 3, p. 193, 2016.

GONZÁLEZ-ZEAS, D. et al. Linking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 2577–2586, 2019.

GUDE, V. G. Desalination and water reuse to address global water scarcity. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 591–609, 2017.

HEISTERMANN, M.; MÜLLER, C.; RONNEBERGER, K. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 114, n. 2–4, p. 141–158, 2006.

HOUSPANOSSIAN, J. et al. Surface albedo raise in the South American Chaco: Combined effects of deforestation and agricultural changes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 118–127, 2017.

IBGE. **Censo demográfico 2010 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.**, 2010.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.** [s.l.: s.n.]. Disponível em:
<<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>. Acesso em: 26 de março de 2019

IPCC. **Global Warming of 1.5 °C.** Disponível em:
<http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf, %3CAcessado em 19 de agosto%3E>.

JIANG, J. H. et al. Evaluation of cloud and water vapor simulations in CMIP5 climate models Using NASA “A-Train” satellite observations. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 14, 2012.

JIMÉNEZ, A. A. et al. Analysis of the land use and cover changes in the metropolitan area of Tepic-Xalisco (1973–2015) through landsat images. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 6, 2018.

KETEMA, H. et al. Quantifying smallholder farmers’ managed land use/land cover dynamics and its drivers in contrasting agro-ecological zones of the East African Rift. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, p. 15, 2020.

KHOCHIANI, R.; NADEMI, Y. Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth in the United States, China, and India: A wavelet coherence approach. **Energy and Environment**, v. 31, n. 5, p. 886–902, 2020.

KOO, H. et al. A global sensitivity analysis approach for identifying critical sources of uncertainty in non-identifiable, spatially distributed environmental models: A holistic analysis applied to SWAT for input datasets and model parameters. **Environmental Modelling and Software**, v. 127, n. November 2019, p. 104676, 2020.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources. **Environmental Science and Policy**, v. 79, n. October 2017, p. 1–8, 2018.

LABORDE DEBUCQUET, D.; MARTIN, W. Implications of the global growth slowdown for rural poverty. **Agricultural Economics (United Kingdom)**, v. 49, n. 3, p. 325–338, 2018.

LEGESSE, D.; VALLET-COULOMB, C.; GASSE, F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study south central Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 275, n. 1–2, p. 67–85, 2003.

LEJEUNE, Q. et al. Historical deforestation locally increased the intensity of hot days in northern mid-latitudes. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 5, p. 386–390, 2018.

LELIS, T. A. et al. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 2, p. 623–634, 2012.

LI, Q. et al. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. **Catena**, v. 147, p. 789–796, 2016.

LI, Z. et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 35–42, 2009.

LIAN, H. et al. CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 2020. v. 177, p. 115767. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2020

LOPES, H. L. et al. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1210–1219, 2010.

LÓPEZ-MORENO, J. I. et al. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Arago’n River, Spanish Pyrenees. **Science of the Total Environment**, v. 493, p. 1222–1231, 2014.

LUO, P. et al. Impact of forest maintenance on water shortages: Hydrologic modeling and effects of climate change. **Science of the Total Environment**, v. 615, p. 1355–1363, 2018.

MA, J. et al. Responses of the Tropical Atmospheric Circulation to Climate Change and Connection to the Hydrological Cycle. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 46, n. 1, p. 549–580, 2018.

MAPBIOMAS. VISÃO GERAL DA METODOLOGIA. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>>. Acesso em: 27 set. 2020.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**. Brasília: [s.n.].

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31–44, 2015.

MELO NETO, J. O. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2003, p. 177–188, 2014.

MITCHARD, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 527–534, 2018.

MOGES, E.; DEMISSIE, Y.; LI, H. Uncertainty propagation in coupled hydrological models using winding stairs and null-space Monte Carlo methods. **Journal of Hydrology**, v. 589, p. 125341, out. 2020.

MOREIRA, L. L. M.; SCHWAMBACK, D.; RIGO, D. Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. **Revista Ambiente e Agua**, v. 13, n. 6, p. 2–12, 2018.

MUNOTH, P.; GOYAL, R. Impacts of land use land cover change on runoff and sediment yield of Upper Tapi River Sub-Basin, India. **International Journal of River Basin Management**, v. 18, n. 2, p. 177–189, 2020.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models - Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool -Theoretical Documentation**, 2009.

NEVES, A. K. et al. Assessment of TerraClass and MapBiomas data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. **Acta Amazonica**, v. 50, n. 2, p. 170–182, 2020.

NKHONJERA, G. K. Understanding the impact of climate change on the dwindling water resources of South Africa, focusing mainly on Olifants River basin: A review. **Environmental Science and Policy**, v. 71, p. 19–29, 2017.

NOGUÉS-BRAVO, D. et al. Cracking the Code of Biodiversity Responses to Past Climate Change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 33, n. 10, p. 765–776, 2018.

NORTHEY, S. A. et al. The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. **Global Environmental Change**, v. 44, n. March, p. 109–124, 2017.

NOSCHANG, P. G.; SCHELEDER, A. F. P. A (in)sustentabilidade hídrica global e o direito humano à água. **Seqüência: Estudos Jurídicos e Políticos**, v. 39, n. 79, p. 119–138, 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: [s.n.].

O’SULLIVAN, J. N. The social and environmental influences of population growth rate and demographic pressure deserve greater attention in ecological economics. **Ecological Economics**, v. 172, n. June 2019, p. 106648, 2020.

OHLSSON, L. Water conflicts and social resource scarcity. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, n. 3, p. 213–220, 2000.

OP DE HIPT, F. et al. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using

SHETRAN. **Science of the Total Environment**, v. 653, p. 431–445, 2019.

PAZ, Y. M. et al. Sensitivity analysis and calibration of the SWAT model for a basin in northeastern Brazil using observed and reanalysis climatic data. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 1, p. 371–389, 2018.

PEÑA-ARANCIBIA, J. L. et al. Forests as ‘sponges’ and ‘pumps’: Assessing the impact of deforestation on dry-season flows across the tropics. **Journal of Hydrology**, v. 574, n. December 2018, p. 946–963, 2019.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, v. 37, p. 859–869, 2013.

PHALKE, A. R. et al. Mapping croplands of Europe, Middle East, Russia, and Central Asia using Landsat, Random Forest, and Google Earth Engine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 167, n. February, p. 104–122, 2020.

PREVEDELLO, J. A. et al. Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. **PLoS ONE**, v. 14, n. 3, p. 1–18, 2019.

QI, J. et al. Effects of surface runoff and infiltration partition methods on hydrological modeling: A comparison of four schemes in two watersheds in the Northeastern US. **Journal of Hydrology**, v. 581, p. 124415, 2020.

RAFIEI EMAM, A. et al. Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms. **Frontiers of Earth Science**, v. 12, n. 4, p. 661–671, 2018.

RIDWANSYAH, I. et al. The impact of land use and climate change on surface runoff and groundwater in Cimanuk watershed, Indonesia. **Limnology**, n. 0123456789, 2020.

RODRIGUES, T. M. DE F.; SENNA, M. C. A.; CATALDI, M. Simulation of climatic impacts of desertification in Northeast Brazil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 1037–1047, 2019.

ROUSTA, I. et al. Spatiotemporal analysis of land use/land cover and its effects on surface urban heat Island using landsat data: A case study of Metropolitan City Tehran (1988-2018). **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 12, p. 25, 2018.

SAATH, K. C. DE O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195–212, 2018.

SAINI, S.; SHARMA, M.; KUMAR, A. Global Warming and Climate Change: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology. **International Journal of Life science & Pharma Research**, v. 8, n. 2, p. 1–16, 2018.

SALMAN, S. A. et al. Selection of climate models for projection of spatiotemporal changes in temperature of Iraq with uncertainties. **Atmospheric Research**, v. 213, p. 509–522, 2018.

SCHUOL, J. et al. Modeling blue and green water availability in Africa. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, p. 1–18, 2008.

SCOTT, C. E. et al. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2018.

SETEGN, S. G. et al. Modeling hydrological variability of fresh water resources in the Rio Cobre watershed, Jamaica. **Catena**, v. 120, p. 81–90, 2014.

SHARMILA, S. et al. Future projection of Indian summer monsoon variability under climate change scenario: An assessment from CMIP5 climate models. **Global and Planetary Change**, v. 124, p. 62–78, 2015.

SHAWUL, A. A.; ALAMIREW, T.; DINKA, M. O. Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 11, p. 13955–13978, 2013.

SHEN, M. et al. Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 10–24, 2018.

SHI, P. et al. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. **Catena**, v. 151, p. 182–190, 2017.

SHI, P. et al. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China. **Science of The Total Environment**, v. 664, p. 984–994, maio 2019.

SHIRMOHAMMADI, B. et al. Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. **Land Use Policy**, v. 90, n. October 2019, p. 104299, 2020.

SHRESTHA, D. L.; KAYASTHA, N.; SOLOMATINE, D. P. A novel approach to parameter uncertainty analysis of hydrological models using neural networks. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 7, p. 1235–1248, 2009.

SIKORSKA, A. E.; RENARD, B. Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges. **Advances in Water Resources**, v. 105, p. 51–66, 2017.

SILVA, R. O. B. DA; LIMA MONTENEGRO, S. M. G.; SOUZA, W. M. DE. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de pernambuco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 579–589, 2017.

SILVA, J. G. et al. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 350–363, 2020.

SINGH, R.; KUMAR, R. Climate versus demographic controls on water availability across India at 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C global warming levels. **Global and Planetary Change**, v. 177, n. March, p. 1–9, 2019.

SONG, X. et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, n. 225, p. 739–757, 2015.

SOUZA, V. A. S. DE et al. Dinâmica do desmatamento na Amazônia e seus impactos na hidrologia: bacia do Rio Machadinho – Rondônia/Brasil. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1004, 2019.

STRANDBERG, G.; KJELLSTRÖM, E. Climate Impacts from Afforestation and Deforestation in Europe. **Earth Interactions**, v. 23, n. 1, p. 1–27, 1 fev. 2019.

TABARI, H.; TALAEI, P. H. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. **Journal of Hydrology**, v. 396, n. 3–4, p. 313–320, 2011.

TAMM, O. et al. Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model. **Catena**, v. 167, n. April, p. 78–89, 2018.

TAN, M. L. et al. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. **Atmospheric Research**, v. 189, p. 1–10, 2017.

TANG, F. F.; XU, H. S.; XU, Z. X. Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, n. 2011, p. 1760–1770, 2012.

TEKLAY, A. et al. Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia. **CATENA**, v. 172, p. 65–75, jan. 2019.

THAVHANA, M. P.; SAVAGE, M. J.; MOELETSI, M. E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 105, n. June, p. 115–124, 2018.

TONG, S.; EBI, K. Preventing and mitigating health risks of climate change. **Environmental Research**, v. 174, n. February, p. 9–13, 2019.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre-RS:ABRH, 2005.

VILAYSANE, B. et al. Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. **Procedia Environmental Sciences**, v. 28, p. 380–390, 2015.

WANG, J. et al. Understanding the Water Crisis in Northern China: What the Government and Farmers are Doing. **International Journal of Water Resources Development**, v. 25, n. 1, p. 141–158, 2009.

WANG, J. et al. Growing water scarcity, food security and government responses in China. **Global Food Security**, v. 14, n. August 2016, p. 9–17, 2017.

WANG, Q. et al. Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. **Atmospheric Research**, v. 236, n. 163, 2020.

WANG, Z. et al. Drying tendency dominating the global grain production area. **Global Food**

Security, v. 16, n. February, p. 138–149, 2018.

WELLMANN, T. et al. Green growth? On the relation between population density, land use and vegetation cover fractions in a city using a 30-years Landsat time series. **Landscape and Urban Planning**, v. 202, n. May, p. 103857, 2020.

WINCKLER, J. et al. Nonlocal Effects Dominate the Global Mean Surface Temperature Response to the Biogeophysical Effects of Deforestation. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 2, p. 745–755, 28 jan. 2019.

WOLDESENBET, T. A. et al. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 724–741, 2017.

YAN, X. et al. Quantifying contributions of climate change and local human activities to runoff decline in the upper reaches of the Luanhe River basin. **Journal of Hydro-Environment Research**, p. 67 - 74, 2018.

YANG, J. et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, p. 1–23, 2008.

ZAIDI, S. M. et al. Landsat-5 time series analysis for land use/land cover change detection using NDVI and semi-supervised classification techniques. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 26, n. 6, p. 2833–2840, 2017.

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, n. March, p. 124822, 2020.

ZHANG, S. et al. Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation. **Catena**, v. 179, February, p. 129–138, 2019a.

ZHANG, S. et al. Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation. **Catena**, v. 179, p. 129–138, ago. 2019b.

ZHAO, F. et al. Parameter uncertainty analysis of the SWAT model in a mountain-loess transitional watershed on the Chinese Loess Plateau. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 6, p. 1–16, 2018.

ZHU, H. et al. Evaluation and hydrological application of satellite-based precipitation datasets in driving hydrological models over the Huifa river basin in Northeast China. **Atmospheric Research**, v. 207, n. February, p. 28–41, 2018.