



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

**ESTUDO DO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO PAJEÚ UTILIZANDO O
MODELO SWIM**

Recife
2019

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

**ESTUDO DO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO PAJEÚ UTILIZANDO O
MODELO SWIM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Coorientador: Prof. Dr. Hagen Koch.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586e	Silva, Ana Lígia Chaves. Estudo do balanço hídrico na bacia do Rio Pajeú utilizando o modelo SWIM / Ana Lígia Chaves Silva. - 2019. 151 folhas, fig., qds., tabs. Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo. Coorientador: Prof. Dr. Hagen Koch. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019. Inclui Referências. 1. Engenharia Civil. 2. Modelagem hidrológica. 3. Uso da terra. 4. Mudanças climáticas. 5. Alocação da água. 6. Reservatórios. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientador). II. Koch, Hagen. (Coorientador). III. Título. UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2020-36
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**ESTUDO DO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO
RIO PAJEÚ UTILIZANDO O MODELO SWIM**

defendida por

Ana Lígia Chaves Silva

Considera a candidata APROVADA

Recife, 16 de dezembro de 2019

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – UFPE _____

Coorientador: Prof. Dr. Hagen Koch – PIK _____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo - UFPE
(Orientador)

Prof.^a Dr.^a Werônica Meira de Souza – UFPE
(Examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias – UFRPE
(Examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Martins Sobral – UFPE
(Examinadora interna)

Prof.^a Dr.^a Sylvana Melo dos Santos– UFPE
(Examinadora interna)

A Deus;

Aos meus queridos pais, Graça e Firmino;

A meu amado esposo João Régis;

Ao meu filho amado João Vitor.

AGRADECIMENTOS

A Deus e à virgem Maria, por estarem comigo em todas as horas, me dando forças para vencer cada dificuldade e por terem permitido passar por mais esta etapa da minha vida.

À minha família, em especial aos meus pais, por toda a educação, carinho e participação na minha vida;

Ao meu amado esposo por estar sempre presente em minhas decisões, me apoiando, incentivando e aconselhando da melhor forma possível, meu muito abrigado por fazeres parte de minha vida;

Ao meu filho amado por toda a compreensão nos momentos que precisei estudar ao invés de dar-lhe a atenção necessária.

Ao meu querido Professor Roberto Azevedo, pela orientação, conhecimentos transmitidos e compreensão ao longo destes anos de preparação desta pesquisa.

Ao meu Coorientador Professor Hagen Koch, por todo apoio, amizade, dedicação paciência e competência para resolver as dificuldades do trabalho;

Ao grupo do projeto INNOVATE, em especial a Professora Maria do Carmo Martins Sobral e ao Professor Fred Hattermann, pelo apoio durante o intercambio na Alemanha e pela disponibilização do programa SWIM e de todas as informações que foram de fundamental importância para o desenvolvimento da pesquisa;

Às examinadoras da banca, Professoras Werônica Meira de Souza, Ana Lúcia Bezerra Candeias e Sylvana Melo dos Santos por aceitarem o convite e pelas contribuições que darão ao trabalho;

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelo conhecimento transmitido. Aos Professores Maria do Carmo Martins Sobral, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Alfredo Ribeiro Neto e Suzana Maria Gico Lima Montenegro. Meu agradecimento especial a Você, Professor Roberto, ficando minha admiração e respeito. Obrigada por nunca ter desistido de mim;

À todas as pessoas que fazem parte do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE que de uma forma ou de outra ajudaram neste trabalho, em especial à Janaína, Gércica, Gabi, Claudinha, Jussara, Cris e Fabi pelas experiências vividas e pela vossa amizade.

A todos os colegas e amigos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, por toda compreensão e apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e às secretarias do PPGEC, Andréa, Cleide e Claudiana, por procurarem nos ajudar com presteza e atenção.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudos concedida no âmbito do programa de Doutorado Sanduíche para Alemanha.

À Agência Pernambucana de Água e Clima pelos dados fornecidos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Considerando a realidade das secas e dos baixos fluxos de vazão, presentes principalmente na região Nordeste do Brasil, se torna imprescindível estudar o balanço hídrico desta região, analisando os efeitos das mudanças do uso da terra, do clima e da gestão da água sobre as bacias hidrográficas. Para auxiliar nesta atividade, os modelos hidrológicos são bastante aplicados. Esta pesquisa tem o objetivo de estudar o balanço hídrico da bacia do Rio Pajeú, localizado do sertão do estado de Pernambuco, utilizando uma versão do modelo eco-hidrológico SWIM, desenvolvido para aplicações em regiões semiáridas, considerando as vazões naturais, a influência dos reservatórios e das retiradas de água e incluindo cenários de mudanças climáticas, além de estimar os efeitos causados pelas incertezas nos dados de entrada nas simulações. Também foi realizada uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas projetadas no fluxo dos rios formadores desta da bacia, para um futuro próximo (2021 a 2050) e para um futuro distante (2070 a 2099). Para alcançar este objetivo foram elaborados cenários com diferentes fontes e escalas de uso da terra, do tipo de solo e fontes de dados climáticos. Para isso, empregou-se o modelo SWIM, que foi configurado, calibrado e validado com os dados de vazões observados das estações fluviométricas da ANA. Os impactos das mudanças climáticas foram explorados aplicando os conjuntos de dados climáticos dos modelos de circulação global regionalizados, corrigidos pelo método de bias. Os resultados apontam a existência de interferência do uso da terra nas vazões simuladas, e de forma mais significativa indica a influência das diferentes fontes de dados climáticos nas simulações de vazão da bacia, o que comprova que as incertezas dos dados de entrada afetam as simulações. No tocante aos cenários que consideram os efeitos dos reservatórios e da alocação da água no balanço hídrico da bacia, percebe-se que, apesar de poucas informações de vazões observadas, o modelo apresenta bom desempenho nas simulações. Analisando as simulações feitas com uso de modelos de circulação global para gerar cenários climáticos futuros, observa-se uma maior influência na escolha dos modelos do que dos cenários climáticos RCP 2.6 e 8.5 do IPCC. Os resultados apresentados nesta pesquisa indicam que o modelo SWIM, adaptado para regiões semiáridas, mostrou-se uma ferramenta robusta e eficaz para o gerenciamento dos recursos hídricos, podendo auxiliar no processo de tomada de decisão.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Uso da terra. Mudanças climáticas. Alocação da água. Reservatórios.

ABSTRACT

Considering the reality of droughts and low flow rates, mainly present in the northeast region of Brazil, it is essential to study the water balance of these regions, analyzing the effects of changes in land use, climate and water management on the basins. To assist in this type of activity, hydrological models are widely applied. This research aims to study the water balance of the Pajeú River basin, located in the hinterland of the state of Pernambuco, using a version of the eco-hydrological model SWIM, developed for applications in semiarid regions, considering the natural flows and the influence of reservoirs and water allocation and including scenarios of climate change, as well as estimating the effects caused by uncertainties in the simulations input data. An assessment of climate change impacts on river basin flow was also undertaken for the near future (2021 to 2050) and for the distant future (2070 to 2099). To achieve this goal, scenarios were developed with different sources and scales of land use, soil type and climate data. For this, the SWIM model was used, which was configured, calibrated and validated with the observed flow data of ANA fluvimetric stations. The impacts of climate change were explored by applying regionalized and bias corrected climate data from global circulation models. The results indicate the existence of land use interference in simulated flows, and more significantly indicate the influence of different climate data sources on the basin flow simulations, which states that the uncertainty of the input data affects the simulations. Regarding the scenarios that consider the effects of reservoirs and water allocation on the water balance of the basin, it is clear that, despite little information on observed flows, the model presents good performance in simulations. Analyzing simulations using global circulation models results to generate future flows, shows a greater influence on the choice of models than IPCC RCP 2.6 and 8.5 climate scenarios. The results presented in this research indicate that the SWIM model, adapted for semi-arid regions, proved to be a robust and effective tool for water resources management, and can assist in the decision making process.

Keywords: Hydrological modeling. Land use. Climate changes. Water allocation. Reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do ciclo hidrológico.	25
Figura 2 - Evolução do desenvolvimento do modelo SWIM.	32
Figura 3 - Nível de desagregação implementado no SWIM.	33
Figura 4 - Estrutura do SWIM.	33
Figura 5 - Evolução das pesquisas utilizando o modelo SWIM.	35
Figura 6 - Localização da bacia do rio Pajeú.	43
Figura 7 - Hidrogeografia da bacia do rio Pajeú.	44
Figura 8 - Composição do solo da bacia do rio Pajeú.	45
Figura 9 - Modelo digital do terreno.	46
Figura 10 - Cobertura vegetal da bacia do rio Pajeú (2015).	47
Figura 11 - Principais açudes da bacia do rio Pajeú.	50
Figura 12 - Fluxograma metodológico.	52
Figura 13 - Células do WATCH ERA40 utilizadas na pesquisa.	56
Figura 14 - Localização das estações de coleta de dados.	60
Figura 15 - Estimativa do escoamento superficial, Q, da precipitação diária, PRECIP, para diferentes valores de CN.	66
Figura 16 - Correspondência entre CN1, CN2 e CN3.	67
Figura 17 - Comparação do método Turc-Ivanov modificado e Hargreaves.	72
Figura 18 - Processo de calibração e validação do modelo SWIM.	72
Figura 19 - Tela do modelo SWIM com parâmetros de calibração do arquivo “subcatch. bsn”.	73
Figura 20 - Tela do modelo SWIM com parâmetros de calibração do arquivo “subcatch. GW”.	74
Figura 21 - Tela do modelo SWIM com parâmetros referentes aos sub-regiões, reservatórios e a alocação de água.	77
Figura 22 - Sub-bacias (120) e sub-regiões (16) da bacia do rio Pajeú.	84
Figura 23 - Hidrotopes gerados no SIG MapWindow.	85
Figura 24 - IAC da bacia do rio Pajeú.	86
Figura 25 - Precipitação da bacia do rio Pajeú.	86
Figura 26 - Análise preliminar da temperatura máxima da estação de Serra Talhada.	89
Figura 27 - Análise preliminar da temperatura média da estação de Serra Talhada.	89

Figura 28 - Análise preliminar da temperatura mínima da estação de Serra Talhada.....	90
Figura 29 - Análise preliminar da umidade relativa do ar da estação de Serra Talhada.	90
Figura 30 - Análise dos dados brutos da precipitação da estação de Serra Talhada.	91
Figura 31 - Método de duplas massas aplicado na precipitação.	91
Figura 32 - Dados preenchidos da variável umidade relativa do ar da estação de Serra Talhada.	92
Figura 33 - Dados preenchidos da variável precipitação da estação de Serra Talhada.	93
Figura 34 - Dados preenchidos da variável temperatura máxima da estação de Serra Talhada.	93
Figura 35 - Dados preenchidos da variável temperatura média da estação de Serra Talhada.	93
Figura 36 - Dados preenchidos da variável temperatura mínima da estação de Serra Talhada.	94
Figura 37 - Precipitação anual para a bacia do rio Pajeú no período de 1964 a 2010.....	94
Figura 38 - Diferença entre a precipitação anual “WATCH ERA40” – “Observados” e “WATCH ERAInterim” – “Observados”.	95
Figura 39 - Precipitação mensal para a bacia do rio Pajeú com dados do “WATCH - ERA40” e “dados observados” (1971 e 1972).	95
Figura 40 - Análise das médias anuais de precipitação por sub-bacia.	96
Figura 41 - Análise das médias diárias da umidade relativa do ar por sub-bacia.....	97
Figura 42 - Análise das médias mensal (1964-2001) da precipitação por sub-bacia.	97
Figura 43 - Relação vazão observada, vazão simulada e precipitação observada na Estação de Flores.	104
Figura 44 - Calibração dos cenários 1, 2 e 3 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira	105
Figura 45 - Validação dos cenários 1, 2 e 3 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira	105
Figura 46 - Resposta do modelo às variações de precipitação	106
Figura 47 - Resposta do modelo às variações de precipitação	107
Figura 48 - Média de longos anos para a estação de Afogados da Ingazeira.....	107
Figura 49 - Escoamentos totais médios anuais (mm/ano) simuladas nos cenários 1, 2 e 3, por sub-bacia.....	108

Figura 50 - Vazões simuladas nos cenários 3, 4 e 5 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira.....	110
Figura 51 - Escoamentos totais médios anuais (mm/ano) simuladas nos cenários 3, 4 e 5, por sub-bacia.....	111
Figura 52 - Localização das retiradas de água outorgadas e solicitadas na bacia e incluídas na modelo SWIM.	112
Figura 53 - Simulações do cenário 7.	113
Figura 54 - Comparação das simulações dos cenários 6 e 7.	115
Figura 55 - Comparação das simulações dos cenários 7 e 8.	116
Figura 56 - Comparação das simulações dos cenários 7 e 8 para o reservatório de Cachoeira II.	117
Figura 57 - Comparação das simulações do cenário 7 com as vazões naturais do cenário 2 (Q natural).	117
Figura 58 - Médias de longo termo das precipitações geradas pelos ESM.	119
Figura 59 - Análise dos percentis das precipitações geradas pelos modelos.....	119
Figura 60 - Médias de longo termo das vazões geradas pelos ESM.	120
Figura 61 - Médias de longo termo das vazões naturais geradas pelo ESM HADGEM2-ES.....	122
Figura 62 - Médias de longo termo das vazões naturais geradas pelos MIROC-ESM-CHEM.....	123
Figura 63 - Projeções de escoamentos totais médios anuais (mm/ano) utilizando MCGs MIROC-ESM-CHEM e HADGEM2-ES.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais reservatórios da bacia do rio Pajeú.....	49
Tabela 2 - Dados de entrada no modelo SWIM	53
Tabela 3 - Descrição das estações vizinhas à área de estudo	59
Tabela 4 - Descrição da geração de dados climáticos	62
Tabela 5 - Valores das constantes para o ajuste da precipitação do WATCH-ERA40	63
Tabela 6 - Correções das precipitações para as diferentes regiões.....	63
Tabela 7 - Valores mensais do fator Ω para Alemanha.....	71
Tabela 8 - Estações Fluviométricas utilizadas na calibração e validação do modelo	73
Tabela 9 - Valores de “bff” em relação ao fluxo	74
Tabela 10 - Classificações gerais de desempenho estatístico.....	76
Tabela 11 - Fonte de dados para criação dos Cenários.....	76
Tabela 12 - Fonte de dados para criação dos cenários com reservatórios e alocação da água. 78	
Tabela 13 - Açudes considerados na modelagem.....	78
Tabela 14 - Açudes considerados na modelagem.....	79
Tabela 15 - Valores das constantes para o ajuste da precipitação dos ESM	81
Tabela 16 - Comparação dos tipos de uso da terra entre os hidrotopes.....	87
Tabela 17 - Análise estatística de regressão múltipla e teste t de Student.....	92
Tabela 18 - Desempenho do modelo para o Cenário 1.....	101
Tabela 19 - Desempenho do modelo para o Cenário 2.....	102
Tabela 20 - Desempenho do modelo para o Cenário 3.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIQ	Amplitude Interquartil
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Model
ANA	Agencia Nacional das Águas
APAC	Agencia Pernambucana de Águas e Clima
CBRSF	Comitê da Bacia do Rio São Francisco
CESM	Community Earth System Model
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project 5
CN	Número da Curva
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CREAMS	Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EAP	Áreas Elementares de Poluição
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator
ESM	Earth System Model
GCM	Modelo de Circulação Global
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2
GLEAMS	Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
GRH	Gestão de Recursos Hídricos
GSWP2	Global Soil Wetness Project
HadGEM2- ES	Met Office Hadley Centre -Earth System Models
HEC	Hydrologic Engineering Center
HRU	Unidades de Resposta Hidrológica
IAC	Índice de Anomalia de Chuva
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INNOVATE	Gestão Sustentável e Inovadora da Água e do Solo na Bacia do Rio São Francisco
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPA	Instituto Agronômico de Pernambuco
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution
ISI-MIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project
MCGA	Modelo de Circulação geral da atmosfera
MIROC-ESM- CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOHC	Centro Hadley do Met Office
NorESM1-M	Norwegian Climate Center's Earth System Model
NSE	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PEAKQ	Taxa de Pico de Escoamento
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PRH-SF	Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco
Q ₁	Primeiro Quartil
Q ₃	Terceiro Quartil
Q _{7,10}	Vazão mínima de sete dias de duração e 10 anos de tempo de retorno
Q _{min}	Vazão Mínima
R ²	Coeficiente de Determinação
ra _{sol}	Radiação Solar
RCPs	Representative Concentration Pathways
RI	Intensidade da Chuva
RSR	Erro Padrão Médio Normalizado
RUNC	Coeficiente de Escoamento
S	Desvio Padrão
SCS	Serviço de Conservação do Solo

SECTMA	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente
SiBCS	Sistema Brasileiro de classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGRH	Sistema Estadual Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos
SMX	Coeficiente de Retenção
SSARR	Streamflow Synthesis & Reservoir Regulation
SWAT	Ferramenta de Avaliação de Solo e Água
SWIM	Modelo Integrado Solo e Água
T	Temperatura
TC	Tempo de Concentração
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UP	Unidade de Planejamento
USDA	United States Department of Agriculture
WATCH	Water and Global Change
SWRRB	Simulation for Water Resources in Rural Basins

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.2	HIPÓTESES DO TRABALHO	21
1.3	OBJETIVOS.....	22
1.3.1	Objetivo Geral.....	22
1.3.2	Objetivos específicos	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	BALANÇO HÍDRICO	24
2.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	26
2.2.1	Definições de modelos hidrológicos.....	26
2.2.2	Classificação dos modelos hidrológicos	27
2.2.3	Evolução dos modelos hidrológicos.....	28
2.2.4	Modelos hidrológicos para regiões semiáridas.....	29
2.3	MODELO SWIM	31
2.3.1	Apresentação do modelo SWIM.....	31
2.3.2	Aplicação do modelo SWIM	35
2.4	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	39
2.4.1	Modelos Climáticos.....	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.1.1	Hidrogeologia.....	44
3.1.2	Solo.....	45
3.1.3	Relevo.....	46
3.1.4	Cobertura vegetal	47
3.1.5	Características climáticas	48
3.1.6	Reservatórios da bacia do rio Pajeú.....	48
3.1.7	Gestão da bacia do rio Pajeú	50
3.2	FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	51
3.3	PREPARAÇÃO DO MODELO SWIM	53
3.3.1	Preparação de dados de entrada	53

3.3.1.1	Tratamento de dados espaciais para entrada no modelo SWIM.....	54
3.3.1.2	Geração de arquivos de dados alfanuméricos.....	55
3.3.1.3	Análise de dados climáticos no modelo SWIM.....	55
3.3.1.3.1	<i>Análise preliminar</i>	56
3.3.1.3.2	<i>Preenchimento de falhas</i>	58
3.3.1.3.3	<i>Radiação solar</i>	61
3.3.1.3.4	<i>Geração de arquivos climáticos</i>	62
3.3.2	Criação da versão SWIM Pajeú	64
3.3.2.1	Cálculo do Balanço hídrico no modelo SWIM.	65
3.3.2.2	Escolha do método para o cálculo de Evapotranspiração no modelo SWIM.....	70
3.3.3	Calibração e validação do modelo SWIM	72
3.3.4	Desempenho do modelo	74
3.4	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS	76
3.5	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS COM RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO DA ÁGUA.....	77
3.6	CENÁRIOS COM DADOS DOS MODELOS CLIMÁTICOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA	79
3.7	PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1	PREPARAÇÃO DO MODELO SWIM	83
4.1.1	Preparação de dados de entrada no modelo SWIM	83
4.1.1.1	Tratamento de dados espaciais para entrada no modelo SWIM.....	83
4.1.1.2	Geração de arquivos de dados alfanuméricos.....	87
4.1.1.3	Análise de dados climáticos de entrada do modelo SWIM.....	87
4.1.1.3.1	<i>Preenchimento de falhas de dados climáticos observados</i>	88
4.1.1.3.2	<i>Análise das fontes de dados de precipitação</i>	94
4.1.1.3.3	<i>Análise dos dados climáticos no Modelo SWIM</i>	96
4.1.2	Criação da versão SWIM Pajeú	98
4.1.3	Calibração e validação do modelo SWIM	98
4.2	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS	108
4.3	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS COM RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO DA ÁGUA.....	111
4.4	PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS	118

4.4.1	Representação da dinâmica histórica das descargas pelo SWIM, impulsionada por modelos climáticos para o período de referência (1976 a 2005).....	118
4.4.2	Análise das vazões geradas sobre efeito das mudanças climáticas	121
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	127
5.1	CONCLUSÕES.....	127
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	128
	REFERÊNCIAS.....	129
	APÊNDICE A – ARQUIVOS DE ENTRADA DO SWIM.....	143
	APÊNDICE B – USOS DA TERRA NO SWIM.....	145
	APÊNDICE C – ALOCAÇÃO DA ÁGUA INCLUÍDOS NO MODELO SWIM.....	147
	APÊNDICE D – CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS UTILIZADAS NO ARQUIVO “RESERVOIR_CTRL” DO MODELO SWIM.....	150
	APÊNDICE E – PRINCIPAIS PARÂMETROS DO SWIM	151

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve de forma sucinta o problema que motivou a realização desta pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos e a divisão dos capítulos desta tese.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A crise hídrica, a seca e a escassez de água são expressões bastante noticiadas em todo o país, consequência das dificuldades enfrentadas no Brasil e no mundo em decorrência dos problemas relacionados a falta de água. Desta forma, promover a gestão adequada de recursos hídricos é um dos grandes desafios a serem superados nas próximas décadas.

Os conflitos no gerenciamento de recursos hídricos estão relacionados ao aumento da demanda, ocasionada a partir do crescimento populacional e da necessidade de atendimento aos usos múltiplos, como: geração de energia, indústria, agricultura, ecossistemas e consumo humano. A situação no nordeste brasileiro pode se tornar mais crítica por causa do desequilíbrio existente entre oferta e demanda de água, condição agravada em consequência das mudanças climáticas. Segundo o Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014), o semiárido nordestino poderá ter uma redução de até 20% de sua precipitação até 2040.

Na busca de soluções para o melhor uso da água, Silva et al., (2017) afirmam que estudos voltados para estimativa do balanço hídrico são uma ferramenta importante para avaliar o estado atual e as tendências da disponibilidade deste recurso em uma região ao longo de um período de tempo. Neste sentido, Rhoden et al., (2016) destacam que o estudo do balanço hídrico em bacias hidrográficas é fundamental para que se possa conhecer a disponibilidade de água e os momentos de estresse ou déficit hídrico, o que possibilita a elaboração de ações que visem um melhor planejamento na gestão destes recursos.

Diante desta situação, cientistas pesquisam alternativas que contribuam para a gestão destes recursos. Na tentativa de obter melhores resultados nas pesquisas, os modelos hidrológicos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e no clima e prever alterações futuras nos ecossistemas. Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade.

Dentre os vários modelos encontrados na literatura o modelo eco-hidrológico SWIM vem sendo bastante utilizado em pesquisas do mundo todo, em especial na Europa, onde o modelo foi criado. E os resultados dessas pesquisas apresentam bons desempenhos do modelo, a exemplo das pesquisas realizadas por Yang et al., (2017), Lobanova et al., (2017), Silva e Moraes (2018) e Koch et al., (2018a).

Visando a melhoria dos resultados das simulações, os pesquisadores se deparam com alguns obstáculos, como as incertezas presentes nos dados de entrada (a exemplo de escassez das estações de monitoramento, tanto pluviométricas como fluviométricas, e as falhas nas séries históricas das estações existentes), nos parâmetros e na estrutura do modelo, conferindo aos resultados da modelagem limites de adoção que devem ser avaliados pelo planejador e/ou pelo gestor da área de recursos hídricos. É evidente a necessidade de se avaliar essas incertezas, não somente para tornar claro os limites de aplicabilidade dos resultados simulados, mas, sobretudo, porque pode lhes atribuir maior confiabilidade (CABRAL et al., 2017).

No tocante a Bacia do rio Pajeú, as incertezas podem levar a respostas distintas nos resultados das simulações. Esta afirmação pode ser observada em simulações anteriores, a exemplo do Plano Estadual de Recursos Hídricos, onde a vazão estimada foi de 26,2 m³/s, encontrada nas simulações realizadas por SECTMA (1998) para o período de 1964 a 1982. Já nos planos de recursos hídricos da Bacia do Rio São Francisco (PRH-SF) na versão 2004 a 2013 e a respectiva atualização do PRH-SF (2016 a 2025), a disponibilidade hídrica superficial foi estimada em 44 m³/s na versão antiga, para o período de 1931 a 2001, e na versão 2016 a 2025 foi estimada em 14,2 m³/s para o período de 1931 a 2015 (CBHSF, 2016).

Os resultados encontrados em pesquisas anteriores, para a bacia do rio Pajeú, indicam variações muito altas na disponibilidade hídrica simulada em diferentes cenários, o que reforça a necessidade de ampliar o cuidado com as incertezas durante a modelagem hidrológica.

O desafio dos pesquisadores ainda consiste em aprimorar os modelos para que possam representar, o mais próximo possível, a realidade das bacias hidrográficas, principalmente, em regiões que não dispõem de muitos dados observados, como as regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. Essas regiões carentes de estações de monitoramento hidrológico e com grandes desafios a enfrentar no tocante a gestão dos recursos hídricos, por conta da escassez deste recurso.

O motivo da escolha da bacia do rio Pajeú para o desenvolvimento da pesquisa se deveu ao fato desta bacia ser a maior do estado de Pernambuco e ser um afluente do rio São

Francisco, de grande importância para o país, principalmente para as regiões semiáridas. Segundo dados do CBHSF (2016), referentes ao Plano da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025, a bacia do rio Pajeú apresenta classificação crítica em relação à disponibilidade de água, por isso, requer uma maior pesquisa voltada para gestão desse recurso.

Esta situação pode ficar ainda mais preocupante, quando associada às situações de eventos climáticos extremos. Realidade do semiárido nordestino, que é uma região bastante afetada, principalmente pelas secas. Estudos presentes no quinto relatório IPCC sobre mudanças climáticas (IPCC, 2015) apontam impactos como déficit hídrico, aumento da temperatura e maior evapotranspiração. O que justifica a necessidade de pesquisas voltadas para estudos de vazão e mudanças climáticas em bacias hidrográficas brasileiras, principalmente as localizadas nas regiões semiáridas do país, onde se encontra a bacia do rio Pajeú.

A escolha do modelo SWIM se justifica por este modelo ser capaz de associar dados hidrológicos, de usos da terra e tipos de solo com informações de alocação de água e de gestão de reservatórios nas simulações dos atuais e futuros cenários. O que possibilita um melhor desempenho nas simulações do balanço hídrico da bacia.

A conclusão desta pesquisa possibilitou uma melhor compreensão da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Pajeú, por meio do estudo do balanço hídrico, item essencial para o planejamento hídrico estratégico, o que poderá subsidiar as políticas públicas. A importância desta pesquisa é evidenciada pelo fato desta região não dispor de tantas estações de dados observados, a exemplo de dados de clima e vazão, necessitando de novas alternativas para melhorar o desempenho dos modelos.

1.2 HIPÓTESES DO TRABALHO

A versão do modelo SWIM, criado para aplicação em regiões semiáridas, com a projeção de cenários atuais e futuros do clima e do uso da água, apresenta um bom desempenho no estudo do balanço hídrico de bacias hidrográficas destas regiões, contribuindo para a tomada de decisão, principalmente, no tocante a alocação de água e gestão de reservatórios.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa foram divididos em geral e específicos, conforme descrito a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como finalidade avaliar o balanço hídrico na bacia do rio Pajeú-PE com base na projeção de cenários futuros do clima e do uso da água, utilizando uma adaptação do modelo eco-hidrológico SWIM para bacias de médio porte.

1.3.2 Objetivos específicos

- Simular os processos hidrológicos para gerar estimativas diárias, mensais e anuais de escoamento superficial, vazão, infiltração e evapotranspiração com base nos dados do atual cenário climático e de uso e cobertura da terra;
- Comparar as simulações utilizando os dados climáticos do WATCH e os dados climáticos observados;
- Estimar os efeitos causados pelas incertezas nos dados de entrada nas simulações;
- Analisar os efeitos dos reservatórios e da alocação da água no balanço hídrico da bacia estudada;
- Projetar cenários climáticos com o modelo SWIM estimando seus efeitos sobre o comportamento hidrológico da bacia;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresenta o estudo do balanço hídrico na bacia do rio Pajeú utilizando o modelo SWIM adaptado. Esta tese foi dividida em capítulos, que estão organizados da seguinte forma:

Neste capítulo I tem-se uma breve introdução, justificativa técnica para realização deste trabalho e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo II foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, apresentando um levantamento histórico sobre a modelagem hidrológica principalmente o modelo SWIM. O objetivo deste capítulo é fundamentar conceitualmente a discussão do tema.

O capítulo III refere-se à descrição da região escolhida para o estudo, a bacia hidrográfica do rio Pajeú, mostrando as características fisiográficas da área, e a metodologia utilizada na pesquisa, abordando as etapas de coleta, aquisição e tratamento dos dados necessários para a análise, destacando o estudo estatístico realizado, a descrição do modelo e os métodos adotados no estudo.

O capítulo IV apresenta os resultados e discussões relevantes encontrados, atendendo aos objetivos do trabalho.

O capítulo V apresenta a conclusão da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

E finaliza-se este trabalho com uma lista de referências pesquisadas. Além disso, são apresentados os apêndices, descrevendo os arquivos de entrada no modelo, os usos da terra incluídos no SWIM, os dados de alocação da água incluídos no modelo SWIM, as características dos reservatórios utilizadas no modelo, os principais parâmetros do SWIM e as principais publicações da Autora desta pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, destacando pontos importantes referentes à modelagem hidrológica, que serviram como base para realização do trabalho, auxiliando na escolha da metodologia e na discussão dos resultados.

2.1 BALANÇO HÍDRICO

A disponibilidade hídrica está sendo afetada pela crescente demanda de água, principalmente no setor agrícola, e pelo conjunto de fatores meteorológicos, que estão contribuindo para uma maior irregularidade na distribuição espacial e temporal deste recurso (LOPES et al., 2017). Esta situação exige, cada vez mais, planejamento e otimização nas ações de gestão dos recursos hídricos, buscando elevar a eficiência do uso da água.

Neste contexto, Silva et al., (2017) afirmam que a estimativa do balanço hídrico é uma ferramenta importante, estabelecendo a capacidade de armazenamento de água de um determinado solo, através da contabilidade de seus ganhos e perdas hídricas. Arroio Júnior (2016) destaca que através da aplicação do princípio de conservação das massas em uma bacia hidrográfica é possível interpretar matematicamente o conceito do ciclo hidrológico, aplicando a equação do balanço hídrico.

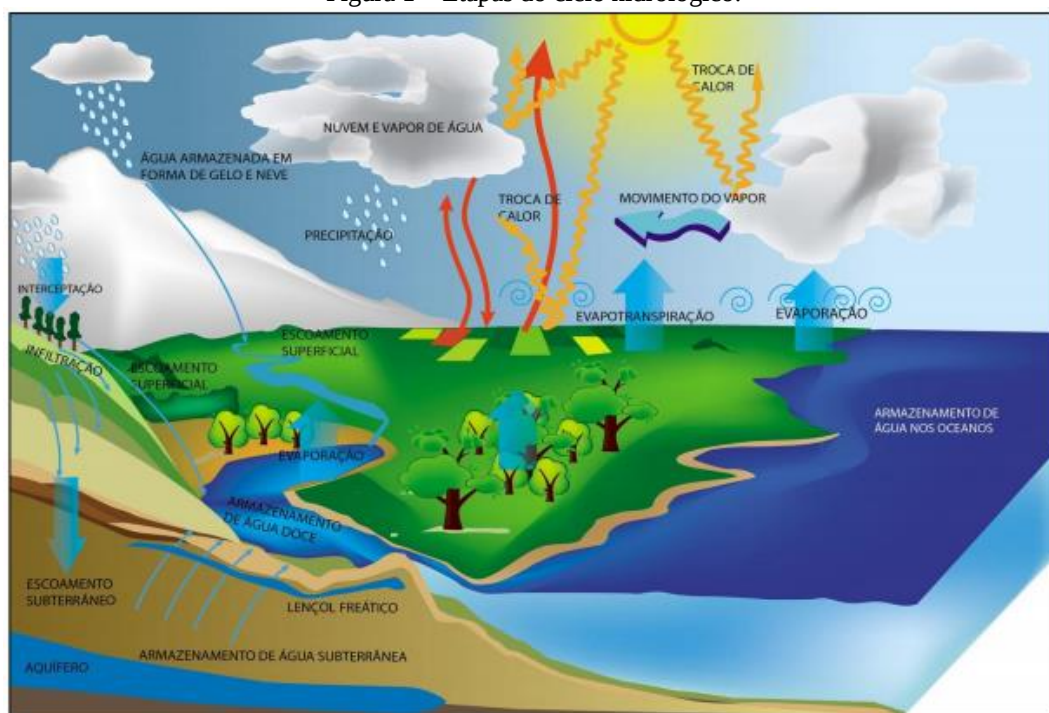
De acordo com Serrão (2018), o conceito de ciclo hidrológico está ligado ao movimento e a troca de água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera.

De forma resumida, pode-se descrever o ciclo iniciando pela precipitação, esta ocasionada pela condensação da água presente na atmosfera, onde, através da dinâmica das massas de ar, ocorre a transferência da água da atmosfera para a superfície. Neste trajeto, parte da água é interceptada seja por obstáculos naturais, como árvores, ou artificiais, como prédios. Quando a água atinge o solo, parte pode infiltrar (ROCHA e SANTOS, 2018).

Segundo Tucci (2012) a partir do momento da saturação do solo a infiltração decresce até a taxa residual, com o excesso da precipitação, que não infiltrou, ocorre o escoamento superficial, o mesmo é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas.

Ainda segundo o mesmo autor, durante a circulação da água na superfície terrestre esta evapora para a atmosfera, quando a perda de água para atmosfera é realizada pelas plantas, o fenômeno é conhecido como transpiração. Associando a evaporação e a transpiração tem-se a evapotranspiração, fenômeno que fecha o ciclo (Figura 1).

Figura 1 – Etapas do ciclo hidrológico.



Fonte: Serrão (2018).

Rocha e Santos (2018) afirmam que a maioria dos estudos do ciclo hidrológico ocorrem na bacia hidrográfica. Esta última é considerada como um sistema físico onde a entrada de água é o volume precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório e o volume evapotranspirado.

Tucci (2012) lembra que a variabilidade do regime hidrológico é controlada por diversos elementos que caracterizam a bacia hidrográfica, tais como litologia, relevo, solos, cobertura vegetal e também por fatores climáticos, tais como precipitação, radiação solar e evaporação.

Ao longo do tempo, várias pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de estudar o balanço hídrico. Estudos desse sistema podem ser aplicados a setores como: agricultura, turismo, construção de barragens e estradas, planejamento urbano entre outros, que envolvam o manejo e a manutenção dos recursos hídricos.

Estudos recentes corroboram com este pensamento, como os de Brito et al., (2018), Cárdenas et al., (2017), Madani et al., (2018), Bennett et al., (2018) e Anand et al., (2018) que investigam as alterações no balanço hídrico em florestas e regiões com modificação da paisagem natural. Além das pesquisas já citadas, Gimeno et al., (2018) analisaram a interferência das altas concentrações de CO₂ em uma floresta de eucalipto. Já Lavenne e Andréassian (2018) examinaram o impacto hidrológico da sazonalidade da precipitação e

evaporação máxima, os mesmos afirmaram que a sazonalidade é, após a aridez, um determinante de segunda ordem do rendimento da água de captação.

Para estudar o balanço hídrico, muitos pesquisadores como: Narasimhan et al., (2017), Kollet et al., (2017), Bernard (2017) e Rakovec et al., (2017) utilizaram modelos hidrológicos que agilizaram os trabalhos, por serem capazes de combinar variáveis e utilizar recursos de geoprocessamento durante o processo de simulação.

2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Ferreira e Uagoda (2017) destacam que a modelagem hidrológica vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação dos processos hídricos, sendo aplicada nos estudos de avaliação ambiental, desenvolvimento de cenários futuros, estimativa da magnitude das alterações a serem causadas pelas atividades estabelecidas ou outras a serem desenvolvidas.

Muitos modelos trabalham em diferentes escalas espaciais e temporais. Alguns processos podem ser simulados considerando-se intervalos de tempo pequenos (minutos, horas e dias) e escalas espaciais muito detalhadas (determinada espécie de planta), ou serem gerados para intervalos de tempo maiores (meses, estações, anos, décadas) e escalas espaciais menos detalhadas (regiões). Por isso, quanto menor a escala de tempo dos modelos, mais dados serão necessários, porém os resultados incluem processos que não são incluídos nos modelos mensais e mais detalhados são os resultados das simulações (RENNÓ, 2003).

2.2.1 Definições de modelos hidrológicos

Campos, (2009) definiu um modelo como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou comportamento de um sistema físico pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades de um sistema. Os modelos são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

O modelo físico representa o sistema através de um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos. Os analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos para modelar o processo desejado, no sistema mais conveniente (TUCCI, 2005). E os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas. Estes modelos são os mais versáteis, porque pode-se, facilmente, modificar a

sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da rápida velocidade de resposta (SANTOS, 2013).

O modelo que representa os processos hidrológicos, de acordo com Tucci, (2005), é o modelo hidrológico, este é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

Não obstante, Santos, (2013) afirmou que os modelos hidrológicos buscam integrar os diferentes processos do ciclo hidrológico, descrevendo a distribuição temporal e espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evapotranspiração, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação, escoamento superficial e subsuperficial.

Desta forma, os modelos surgiram da necessidade de responder às diferentes questões práticas e científicas, tentando explicar a relação entre a precipitação e a infiltração, o escoamento e a evapotranspiração, integrando os diferentes componentes causais da natureza com os fatores antrópicos. Estes modelos apresentaram grandes avanços com a inclusão do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, destacando a evolução dos modelos distribuídos e a representação da diversidade física da bacia hidrográfica (TUCCI, 2005).

Outro fator importante, referente ao modelo hidrológico, está na sua capacidade de representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica, através da equacionalização dos processos (TUCCI, 2012), sendo a bacia hidrográfica o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos (RENNÓ e SOARES, 2000). A utilização destes modelos, segundo Marinho Filho et al., (2012), tem sido bastante difundida, e suas aplicações no estudo de bacias hidrográficas têm apresentado bons resultados.

2.2.2 Classificação dos modelos hidrológicos

Segundo Moreira (2005), os modelos hidrológicos são classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre as variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Almeida e Serra (2017) classificam os modelos estocásticos como os que fazem uso das séries observadas de vazões em determinados pontos e, a partir de hipóteses sobre seu comportamento, permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de

modelos normalmente utilizados. Para os autores, os modelos determinísticos ou conceituais, tem objetivo de representar o sistema físico natural, isto é, os processos do ciclo hidrológico, de modo que, a partir de dados de entrada, tais como os volumes precipitados e evaporados, condições iniciais de umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, possam ser fornecidas as séries de vazões.

2.2.3 Evolução dos modelos hidrológicos

Os primeiros modelos surgiram na década de 1930, e buscavam descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico, como infiltração, elaborado por Horton; o escoamento em rios, com o Modelo Muskingum, criado por MacCarthy; e Puls para o escoamento em reservatório. Estes eram elaborados para solucionar problemas específicos. Somente na década de 1950, com a evolução computacional, surgiram os primeiros modelos hidrológicos que reuniam os vários processos para descrever a transformação da precipitação em vazão como os modelos SSARR (ROCKWOOD, 1958). Nas décadas de 60 e 70, surgiram outros modelos como o Stanford IV, que introduziu a distribuição espacial na avaliação da infiltração. Destacam ainda o modelo de Dawdy e O'Donnell e HEC-1, que surgiram em 1965. O Ibbitt, criado em 1973, introduziu a otimização dos parâmetros do modelo hidrológico.

Em meados da década de 1970, em resposta à Lei da Água Limpa, a Pesquisa Agrícola do USDA Service (ARS) reuniu uma equipe de cientistas interdisciplinares para desenvolver um modelo de simulação de fonte não pontual. A partir desse esforço, um modelo em escala de campo chamado CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) foi desenvolvido (KNISEL, 1980) para simular o impacto do manejo da terra na água, nos sedimentos e nutrientes.

Na década de 1980, vários modelos foram desenvolvidos com origens do modelo CREAMS. Um deles, o modelo GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (LEONARD et al., 1987) concentraram-se na carga de pesticidas e nutrientes às águas subterrâneas. Outro modelo chamado EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (WILLIAMS et al., 1989) foi originalmente desenvolvido para simular o impacto da erosão sobre produtividade das culturas e evoluiu para um modelo abrangente de escala de campo agrícola que objetivou a avaliação de manejo agrícola e de fontes não pontuais. Mais um modelo, também com base em CREAMS, é o modelo OPUS para estimar os efeitos de diferentes práticas de manejo em fontes de poluição não pontuais (SMITH, 1992). Estes três

modelos podem ser aplicados para as áreas de escala de campo ou para pequenas áreas homogêneas das bacias hidrográficas.

Outros esforços envolveram a modificação de CREAMS para simular bacias hidrográficas complexas com solos, uso e manejo da terra, o que resultou no desenvolvimento de vários modelos, como AGNPS (YOUNG et al., 1989), SWRRB (ARNOLD et al., 1990) e MATSALU (KRYSAANOVA et al., 1989).

Na década de 90, ocorreram avanços nos modelos distribuídos, na escala da bacia hidrográfica, principalmente, através do uso do geoprocessamento, que permitiu a identificação espacial das variáveis de entrada e de atributos físicos das bacias.

Nos últimos anos, a interação entre recursos hídricos e ecossistemas se tornou um tema central entre os cientistas, consequência do importante papel da dinâmica da vegetação na bacia e no ciclo da água (ASBJORNSEN et al., 2011). Por um lado, a água controla o crescimento da vegetação, a fotossíntese, a respiração e o ciclo de nutrientes. Por outro, existem as influências da vegetação no ciclo da água, através de processos bioquímicos e biofísicos como: evapotranspiração e interceptação da chuva (CHEN et al., 2015). Os modelos eco-hidrológicos integram hidrologia e processos ecológicos, e fornecem um quadro onde a complexa inter-relação entre a dinâmica da vegetação e os fluxos de água podem ser bem investigados (ASBJORNSEN et al., 2011).

Tang et al., (2018) afirmaram que os modelos dinâmicos contínuos que combinam conceitos e descrições das características hidrológicas, físicas e biogeoquímicas, a exemplo da transmissão de água, do calor, do fluxo de carbono e da energia, são chamados modelos eco-hidrológicos. Comumente usados em pesquisa científica, suas aplicações incluem modelos bem conhecidos como o SWAT (ARNOLD et al., 1993 e ARNOLD et al., 1994), SWIM (KRYSAANOVA et al., 1998 e KRYSAANOVA et al., 2000), RHESSYS (BAND et al., 1993 e TAGUE e BAND, 2004), e Tethys-Chloris (FATICHI et al., 2012). Devido ao desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e tecnologia de sensoriamento remoto, observa-se um crescimento nos estudos envolvendo modelos eco-hidrológicos.

2.2.4 Modelos hidrológicos para regiões semiáridas

De acordo com Cirilo (2007), existe uma variedade de tipos de modelos hidrológicos que podem ser aplicados às regiões semiáridas. O autor destaca que muitos são modelos concentrados, ou seja, consideram propriedades médias da bacia hidrográfica e/ou indicadores

que integram essas propriedades, desconsiderando a variação espacial das mesmas. Dentre estes estão os modelos GRH, MODHAC e SMAP MODIFICADO.

Alguns modelos distribuídos também são bastante utilizados na região semiárida do Brasil como: AÇUMOD, MIKE SHE e MGB-IPH. Pesquisas mais recentes, como a de Fernandes, (2015), Fontes Júnior e Montenegro, (2019), utilizam o modelo distribuído SWAT para modelar as bacias hidrográficas.

Dentre os modelos distribuídos, citados anteriormente, o modelo AÇUMOD é um modelo hidrológico que foi bastante utilizado no período de 2000 a 2010, desenvolvido por professores e alunos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba (CIRILO, 2007). Este modelo permite na sua calibração a utilização das informações disponíveis de água nos açudes simulados e observações de vazão efetuadas em postos fluviométricos que são influenciados pela existência de açudes a montante. O mesmo considera regras de operação dos açudes na estimativa do balanço hídrico e divide o espaço geográfico pesquisado em uma malha retangular formada por quadrículas.

Outro modelo utilizado em pesquisas na região semiárida é o MIKE SHE (GÓES, 2009), este transforma a chuva em vazão e os processos físicos do ciclo hidrológico são representados por módulos, sendo eles: módulo de fluxo superficial, fluxo do canal, evapotranspiração, fluxo de zona saturada e fluxo de zona não saturada, cada módulo pode ser calculado separadamente ou de forma integrada e permite tanto a modelagem de eventos quanto a modelagem contínua para um período de até 36 anos de registro.

Já o modelo de grandes bacias, MGB-IPH, foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH/UFRGS (SCHUSTER, 2019), é composto por algoritmos de balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem. A bacia é subdividida em células quadradas, com cerca de 10x10 km, ligadas entre si por canais de drenagem. As células são divididas em blocos de uso do solo sem considerar sua localização interna.

Na literatura brasileira, existem muitos trabalhos utilizando o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), pesquisa realizada por Bressiani et al., (2015a) aponta que a utilização do modelo no Brasil, na escala das bacias hidrográficas, aumentou muito durante a última década. Os autores identificaram mais de cem estudos utilizando o SWAT, dentre as áreas escolhidas está a região semiárida do nordeste brasileiro.

Nesta pesquisa será utilizado o modelo SWIM, sua criação foi baseada em duas ferramentas anteriormente desenvolvidas, o SWAT (ARNOLD et al., 1993 , ARNOLD et al.,

1994), e o MATSALU (KRYSANOVA e BECKER, 1999 ; KRYSANOVA et al., 1999). Como o modelo não foi criado para uso em regiões semiáridas, não existe na literatura brasileira muitos trabalhos utilizando o modelo SWIM. Nestas regiões, os trabalhos desenvolvidos foram: Silva, (2014), Silva e Moraes, (2018) Koch et al., (2018a) e Koch et al., (2018b). Por este motivo e para esta pesquisa, uma versão modificada do SWIM foi criada com o objetivo de incluir, em suas rotinas, dados específicos de regiões semiáridas do Brasil visando viabilizar o uso e melhorar o desempenho das simulações do modelo para a região estudada.

2.3 MODELO SWIM

Nesta seção será apresentado o modelo SWIM utilizado nesta pesquisa.

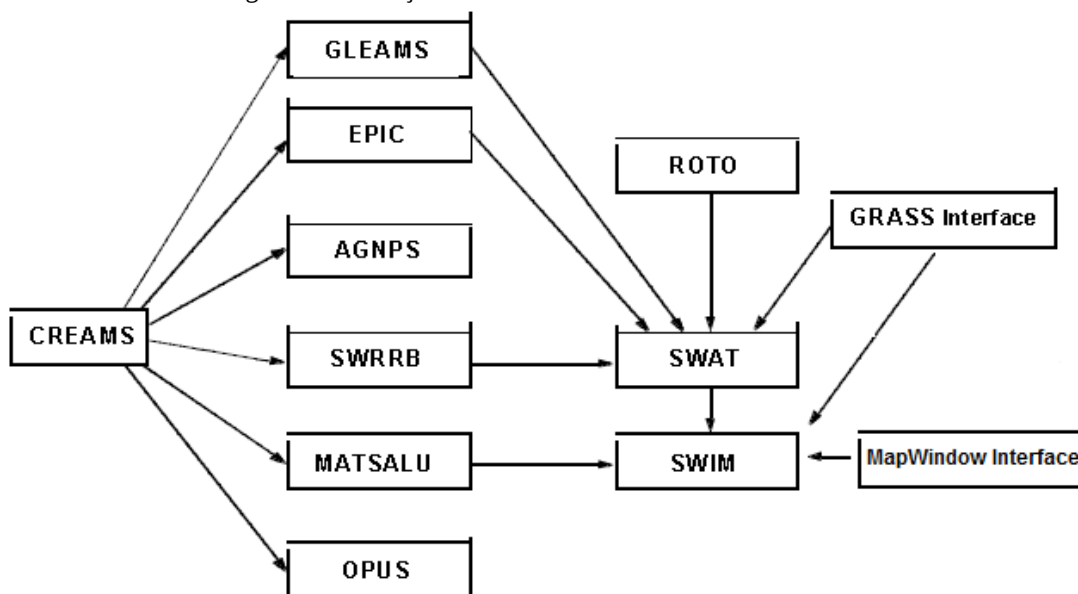
2.3.1 Apresentação do modelo SWIM

O modelo SWIM foi desenvolvido para o uso, principalmente na Europa e em áreas temperadas. Entretanto, existe a possibilidade da sua adaptação para outras regiões (KRYSANOVA et al., 2000). Criado utilizando os melhores recursos do SWAT e MATSALU, o código do modelo foi baseado principalmente no SWAT, já o esquema de desagregação espacial mais abrangente, de três níveis, foi retirado do MATSALU. O próximo passo foi ajustar o modelo para o uso em condições europeias, onde a disponibilidade de dados é diferente. Isso exigiu alguns esforços para modificar a entrada de dados. Além disso, segundo Krysanova et al., (2000), vários módulos foram excluídos do SWAT a fim de evitar a superparametrização, como: pesticidas e qualidade da água do lago.

O SWAT é um modelo de bacias hidrográficas de simulação distribuída em tempo contínuo, desenvolvido para prever os efeitos de decisões de gestão alternativas sobre a água, sedimentos e defensivos agrícolas. A simulação hidrológica com este modelo, conforme abordado na pesquisa de Teixeira, (2017), é dividida em duas etapas, sendo que a primeira representa o ciclo hidrológico terrestre, que calcula a quantidade de água, sedimento, nutriente e de pesticida que o canal de drenagem principal contribui em cada sub-bacia. E a segunda etapa que controla o direcionamento do ciclo hidrológico, desses mesmos componentes, da rede de drenagem até o exutório. O cálculo desses processos é dividido nas fases de precipitação-intercepção, escoamento superficial, infiltração na zona de solo e raiz, e do fluxo de águas subterrâneas.

O MATSALU foi desenvolvido na Estônia para a bacia agrícola da Baía de Matsalu, com a área de cerca de 3.500 km², a fim de avaliar diferentes cenários de gestão para controlar a eutrofização da baía (KRYSANOVA et al., 2000). O modelo consiste em quatro submodelos acoplados, que simulam: a hidrologia das bacias hidrográficas, a geoquímica das bacias hidrográficas, o transporte fluvial de água e nutrientes, e a dinâmica de nutrientes no ecossistema da Baía. Semelhante ao SWRRB (ARNOLD et al., 1990), os componentes foram essencialmente baseados na abordagem CREAMS. A desagregação espacial em MATSALU é baseada na sobreposição de três camadas de mapa: um mapa de bacias hidrográficas elementares com uma área média de 10 km², um mapa de uso da terra e um mapa de solos, para obter as chamadas Áreas Elementares de Poluição (EAP). Conceitualmente, os EAPs são semelhantes às Unidades de Resposta Hidrológica (HRU) ou hidrótopes, que foi acoplado ao modelo SWIM. A evolução do modelo SWIM está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Evolução do desenvolvimento do modelo SWIM.



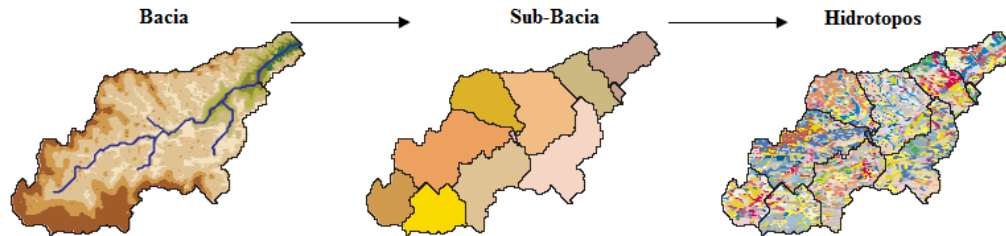
Fonte: Adaptado de Krysanova et al. (2000).

O modelo SWIM visa proporcionar a modelagem hidrológica e da qualidade da água, em mesoescala, para grandes bacias hidrográficas (de 1.000 a mais de 1.000.000 km²). Trata-se de um modelo semi-distribuído, baseado no Sistema Informação Geográfica (SIG), com esquema de desagregação em três níveis: bacia, sub-bacias, e hidrotopes (KRYSANOVA et al., 2005), (Figura 3).

Os domínios dos modelos semi-distribuídos não são representados em forma de quadrícula, mas por manchas na paisagem com comportamento hidrológico uniforme, chamados hidrotopes (CONRADT et al., 2013). Estes são subáreas quase uniformes,

configurando unidades de resposta hidrológicas (MONTEIRO; VIADANA, 2009).

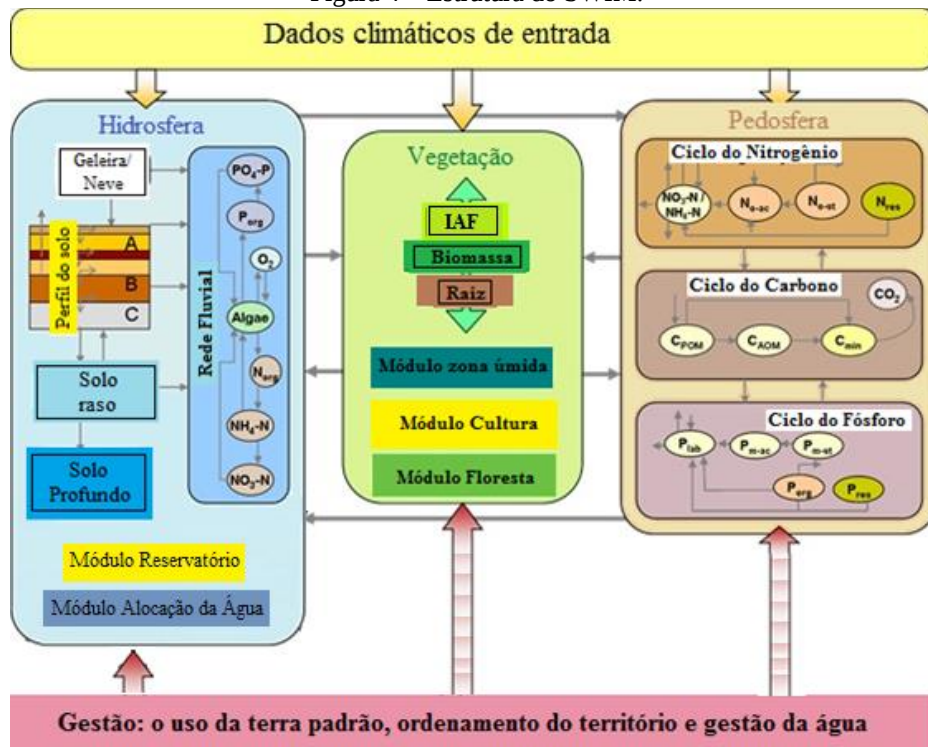
Figura 3 – Nível de desagregação implementado no SWIM.



Fonte: Silva (2014).

Além disso, este modelo integra a dinâmica hidrológica, vegetação, erosão e fluxo de nutrientes. Baseado na equação do balanço hídrico, que utiliza dados de precipitação, evapotranspiração, percolação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial para a coluna de solo (Figura 4).

Figura 4 – Estrutura do SWIM.



Fonte: Adaptado de Silva (2014).

A dinâmica hidrológica é representada no módulo hidrológico, baseado na equação do balanço hídrico. Koch et al., (2015) afirmam que este sistema de simulação hidrológica se divide em quatro volumes de controle: a superfície do solo, a zona radicular do solo, o

aquífero raso, e o aquífero profundo. A zona radicular do solo é subdividida em várias camadas de acordo com a base de dados dos solos.

O balanço de água para o aquífero raso inclui recarga de águas subterrâneas, a ascensão capilar para o perfil do solo, o fluxo lateral e a percolação para o aquífero profundo. O balanço hídrico para a superfície do solo e coluna de solo, no modelo, inclui a precipitação, o escoamento superficial, evapotranspiração, o escoamento subsuperficial e a percolação (CONRADT et al., 2013).

Koch et al., (2013) destacam que o módulo de reservatórios foi desenvolvido para o SWIM com o objetivo de contribuir para os estudos de impacto em bacias hidrográficas e a representação adequada de processos naturais e dos processos influenciados pela gestão da terra e da água. Esse módulo tem a finalidade de simular os impactos da operação dos reservatórios, e possui três opções de gerenciamento: (i) volume mínimo e máximo do reservatório, vazões mínimas (Q_{min}); (ii) descarga para geração de eletricidade; (iii) e descarga variando com o nível da água (volume); podendo ser “negativos” ou “positivos”.

Além do módulo de reservatórios, Lobanova et al. (2017) destacam o desenvolvimento do módulo de alocação da água, que permite a retirada de volumes de água de seções de rios ou reservatórios. A demanda de água pode ser incluída com dados diários ou mensais. Volumes abstratos podem ser alocados para usuários de água, tais como esquemas de irrigação ou abastecimento público, fora do sistema (bacia hidrográfica) ou para usuários de água dentro do sistema.

A representação das culturas agrícolas e vegetação natural se apresenta como uma interface importante entre o clima, a hidrologia e os nutrientes, este permite simular todas as culturas como: trigo, cevada, milho, batata, alfafa, e outros, utilizando os valores dos parâmetros únicos para cada cultura, que foram obtidos em diferentes estudos de campo. Permite também simular o crescimento da cultura em uma estrutura distribuída para modelar grandes bacias e regiões (KOCH et al., 2015).

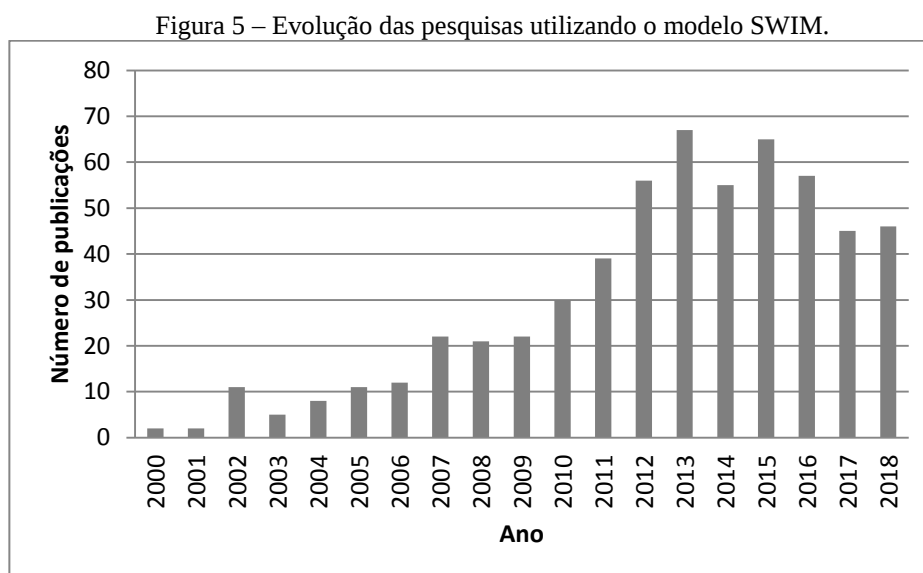
O módulo de nitrogênio inclui as seguintes opções: nitrato, nitrogênio orgânico ativo e estável, nitrogênio orgânico no resíduo vegetal, enquanto o módulo de fósforo inclui: fósforo instável, fósforo mineral estável e ativo, fósforo orgânico e fósforo no resíduo vegetal. A saída de nutrientes para as águas superficiais e lixiviação para as águas subterrâneas são mais importantes para o nitrogênio, ao passo que o fósforo é transportado principalmente com a erosão (KRYSANOVA et al., 2015).

2.3.2 Aplicação do modelo SWIM

Krysanova et al., (2015) afirmam que o modelo SWIM foi amplamente testado em grandes bacias hidrográficas para processos hidrológicos (descarga e águas subterrâneas), nutrientes, eventos extremos (inundações e baixos fluxos), rendimento de culturas e erosão. Os autores, ainda, destacam que vários módulos foram desenvolvidos (zonas úmidas e dinâmica de neve) ou introduzidos (glacial e reservatórios).

Krysanova et al., (2000) destacam que o SWIM apresenta melhor desempenho do que os outros modelos no tocante à simulação do ciclo hidrológico na escala da bacia hidrográfica, com descrição melhor e mais detalhada do processo do que nos modelos terrestres de escala continental e nos modelos de recursos hídricos em larga escala; na simulação de processos de vegetação, considerando processos dinâmicos de vegetação, dados importantes nos estudos de mudança climática devido às inter-relações entre os processos de água e vegetação e na simulação do uso da terra, gestão da agricultura, rendimento das culturas e retroalimentação das mudanças no uso do solo e do clima.

A literatura apresenta uma evolução na aplicação deste modelo para simulações hidrológicas em outros países, a Figura 5 mostra publicações disponíveis na plataforma de periódicos CAPES desde 2000, quando foi criado o modelo, até 2018.



Fonte: A Autora (2019).

Das pesquisas que aplicaram o modelo eco-hidrológico SWIM em bacias hidrográficas Brasileiras a maioria foram desenvolvidas pelo projeto INNOVATE envolvendo

Brasil e Alemanha, sendo a Universidade Federal de Pernambuco parceira deste projeto. Entre as pesquisas estão os estudos de Silva, (2014) que utilizou o modelo SWIM para estudos de evapotranspiração, Silva e Moraes, (2018) estudaram as decisões econômicas de gestão de recursos hídricos na bacia do rio São Francisco e Koch et al., (2018a) pesquisaram a mudança no fluxo natural provocada pela geração integrada de energia hidroelétrica e eólica no Submédio e Baixo do rio São Francisco.

As pesquisas encontradas na literatura aplicando o modelo eco-hidrológico SWIM são voltadas para os seguintes estudos:

- i. Escoamento de bacias hidrográficas, realizado por Yang et al., (2017) e Hattermann et al., (2017);
- ii. Umidade do solo associado a intrusão salina elaborado por Kumar et al., (2017);
- iii. Demandas econômicas e hídricas por Lobanova et al., (2016) e Lobanova et al., (2017);
- iv. Controle de cheias e inundações, apresentado por Kauffeldt et al., (2016) e Aich et al., (2016);
- v. Agricultura e vegetação natural, investigado por Huang et al., (2015) e Hanasaki et al., (2013);
- vi. Evapotranspiração, investigado por Conradt et al., (2013) e Silva (2014);
- vii. Mudanças Climáticas, desenvolvidas por Hattermann et al., (2011), Němečková et al., (2011), Krysanova et al., (2017) Teklesadik et al., (2017) e Samaniego et al., (2017);
- viii. Qualidade de água, elaborado por Huang et al., (2009) e Hesse et al., (2008);
- ix. Gestão das águas, pesquisado por Conradt et al., (2007);
- x. Lixiviação de nutrientes do solo, realizado por Krysanova e Haberlandt (2002) e Haberlandt (2010);
- xi. Dinâmica do lençol freático, analisado por Hattermann et al., (2002).

Analisando os relatos dos pesquisadores, identificados neste trabalho, que aplicaram o modelo SWIM, percebe-se que o modelo SWIM apresentou um bom desempenho na opinião dos mesmos. Dentre as pesquisas pode-se citar:

Hanasaki et al., (2008) desenvolveram um modelo global e integrado de recursos hídricos, composto por seis módulos: hidrologia de superfície, caminhamento do rio, crescimento da cultura, operação do reservatório, estimativa da necessidade de fluxo ambiental e retirada de água por atividades antrópicas, cujo objetivo foi avaliar os recursos hídricos do mundo. Este trabalho utilizou o modelo SWIM no módulo de crescimento da

cultura. A simulação foi realizada utilizando a estrutura do Global Soil Wetness Project (GSWP2). Os autores destacaram que a simulação do escoamento e da vazão foram validados por comparação com as observações e trabalhos anteriores, e o desempenho foi semelhante aos melhores estudos realizados. Este resultado indicou a aplicabilidade do modelo.

Abordando o tema qualidade da água, Hesse et al., (2008), utilizaram o SWIM para modelar a qualidade da água em mesoescala do rio Rhin, sub-bacia do rio Elba. O objetivo desta pesquisa foi responder a algumas questões específicas relativas à identificação de fontes pontuais e difusas de poluição por nutrientes na bacia hidrográfica, avaliar as possíveis influências do clima e mudanças de uso da terra sobre a qualidade da água, sugerindo possíveis medidas a serem tomadas, a fim de alcançar um "bom estado ecológico". A pesquisa simulou, no SWIM, o fluxo de nutrientes no solo, a vegetação, bem como o transporte de água e nutrientes para dentro da rede fluvial. A calibração do modelo apresentou resultados satisfatórios.

A pesquisa de Huang et al., (2010) aplicou o modelo sequencialmente para cinco bacias hidrográficas da Alemanha (Ems, Weser, Elba, Alto Danúbio e Baixo Reno) para simular a dinâmica e os componentes da água. Os autores apontaram como uma importante vantagem do SWIM a integração do ciclo hidrológico com a vegetação e as interações entre os fluxos da água e os ecossistemas. Destacaram ainda, que o modelo permite a mudança sazonal de estágios de crescimento da planta em condições de temperaturas elevadas. Por isso, representa mais uma ferramenta viável para a avaliação do impacto do clima em comparação com outros modelos hidrológicos. Após a calibração e validação o modelo apresentou eficiência de 0,6 a 0,9 em 80% dos casos.

Conradt et al., (2013) realizaram uma pesquisa na bacia do rio Elba, localizada na Europa central, esta bacia abrange 148.268 km², cerca de um terço da área desta bacia encontra-se na República Checa e os dois terços restantes, na Alemanha. Este trabalho comparou três métodos de estimativa da evapotranspiração: o modelo SWIM sem qualquer calibração espacial, aplicando o método de Turc-Ivanov modificado para estimativa da ETo; o método utilizando sensoriamento remoto e o método do balanço hídrico. A bacia do rio Elba foi dividida, no modelo SWIM, em hidrotopes, estes foram modelados em escala diária, identificando o crescimento da vegetação e o fluxo de água e de nutrientes. Os resultados da calibração do modelo indicaram valores de NSE de 0,87 para dados diários. Os autores observaram ainda uma boa correlação entre o modelo SWIM e o método com sensoriamento remoto, nas 72 sub-bacias alemãs. Mas, o mesmo desempenho não pôde ser observado ao

comparar os resultados do SWIM e do sensoriamento remoto com o método do balanço hídrico.

Outra pesquisa na bacia do rio Elba, utilizando o modelo SWIM, foi realizada por Nied et al., (2013). Neste trabalho, os autores investigaram a relação entre padrões de umidade do solo e ocorrência de inundações na bacia do rio Elba, os resultados mostraram um bom desempenho do modelo.

A pesquisa de Aich et al., (2016) onde os autores avaliaram o futuro risco de inundação na Bacia do rio Níger (NRB), pela primeira vez considerando os efeitos simultâneos das alterações climáticas previstas e das mudanças de uso da terra. As simulações para futuros riscos de inundação foram realizadas com um conjunto de 18 (dezoito) modelos climáticos. Os resultados da modelagem mostram aumentos de inundações quando comparado um futuro próximo (2021 a 2050) com um período base (1976 a 2005).

A trabalho realizado por Hattermann et al., (2017), comparou as alterações hidrológicas simuladas por 9 (nove) modelos hidrológicos globais (CLM, DBH, H08, LPJmL, Mac-PDM.09, MATSIRO, MPI-HM, PCR-GLOBWB, WaterGAP2) e 9 (nove) regionais (ECOMAG, HBV, HYMOD, HYPE, mHM, SWAT, SWIM, VIC, WaterGAP3), para 11 (onze) grandes bacias hidrográficas em todos os continentes. O foco do estudo está nas execuções de validação de modelo e na sensibilidade de descarga anual à variabilidade climática no período de referência.

Um dos principais resultados desta pesquisa mostra que os modelos hidrológicos globais são ferramentas úteis quando se investiga os impactos em grande escala das alterações e variabilidades climáticas. Sempre que o interesse for avaliar os impactos de uma bacia ou região hidrográfica específica ou para aplicações complexas de gerenciamento de água, os modelos de escala regional devem ser usados.

Recentemente, Koch et al., (2018a) aplicaram o módulo de reservatório do modelo SWIM para investigar se a geração de energia eólica, com pico na estação seca, pode ajudar a alcançar um regime de fluxo mais ecológico na Bacia do Submédio e Baixo São Francisco. Os autores observaram que, a lacuna existente na geração de eletricidade só pode ser parcialmente preenchida por energia eólica. Atualmente, uma grande parte precisa ser gerada por usinas térmicas ou oriundas de outras regiões do Brasil. Os mesmos destacaram ainda que o aumento planejado da capacidade de energia eólica pode mudar esse quadro, e a demanda por eletricidade, gerada por usinas térmicas e trazidas de outros lugares do Brasil, diminuirá. Adotando uma abordagem integrada para geração de energia hidrelétrica e eólica, o regime de

vazões na Bacia do Submédio e Baixo São Francisco pode ser modificado para melhorar o estado ecológico do sistema fluvial.

Koch et al., (2018b) analisaram os índices de baixo fluxo para vazões observadas e simuladas para a bacia do rio São Francisco no Brasil, mostrando que durante os anos úmidos, normais e moderadamente secos, o sistema de reservatórios existente é capaz de aumentar os baixos fluxos enquanto durante secas fortes o sistema atinge seus limites. Os autores destacam que este efeito também é representado nas simulações usando o modelo eco-hidrológico SWIM, que foi adaptado para considerar as características específicas da região de uso da terra e gestão da água. As simulações apresentaram um desempenho de bom a muito bom na calibração e validação para a maioria dos medidores.

Diante dos trabalhos encontrados na literatura pôde-se observar, que, de uma forma geral, a aplicação do modelo SWIM apresentou bons desempenhos para as regiões estudadas, e nas diversas áreas de aplicação do modelo, desde estudo de mudanças climáticas a identificação da qualidade da água.

2.4 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Segundo Lobanova, (2018), os regimes de vazão dos rios estão sendo modificados em todo o mundo por impactos antrópicos, como operações de gestão da água e mudanças no uso da terra. Algumas medidas colocam os recursos de água doce em estresse significativo, e as mudanças climáticas devem alterar ainda mais as condições hidrológicas, colocando pressão adicional sobre os recursos hídricos e os ecossistemas aquáticos. Os efeitos das mudanças climáticas devem ser entendidos, quantificados e incorporados às estratégias de gestão da água em nível regional (DÖLL et al., 2014). Todas as medidas de adaptação, devem basear-se em um sólido entendimento da situação atual e possíveis tendências futuras (HARDING et al., 2014), tanto a longo quanto a curto prazo. A modelagem hidrológica é a principal ferramenta para obter projeções sobre como as mudanças climáticas afetariam os recursos hídricos e os padrões hidrológicos das bacias hidrográficas.

O tema mudanças climáticas vem sendo bastante debatido pela comunidade científica, gestores públicos e sociedade em geral. A preocupação com a questão encontra-se atrelada aos possíveis impactos que o referido fenômeno pode causar sobre os sistemas naturais e socioeconômicos (FERREIRA et al., 2018).

As mudanças climáticas trarão profundas repercussões para os recursos hídricos, no tocante à disponibilidade do uso da água, sob aspectos quantitativos e qualitativos, no

decorrer do século XXI. Pachauri et al., (2014) afirmam que o último relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), o AR5, discute o assunto com base nas evidências mais recentes. No Brasil, o relatório do PBMC (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas) dedicou um capítulo aos impactos sobre os recursos naturais, com destaque para a questão da água (PBMC, 2014).

Segundo o IPCC, (2015), em muitas regiões as alterações de precipitação e o derretimento de geleiras estão alterando os sistemas hidrológicos, afetando os recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade. Os impactos de eventos climáticos extremos, como secas e cheias, entre outros, revelam o alto grau de vulnerabilidade de alguns ecossistemas e de sistemas humanos à variabilidade climática já existente. Ainda segundo o mesmo relatório, no século XXI, as mudanças climáticas implicam em risco significativo de impactos negativos sobre os recursos de água doce do planeta. Projeta-se redução na disponibilidade de água de superfície e nos aquíferos na maioria das regiões tropicais secas. Nestas regiões, provavelmente a frequência de secas vai aumentar. As mudanças climáticas podem acarretar redução na disponibilidade de água bruta, com riscos sobre a disponibilidade de água potável, além de piorar a qualidade da água.

As mudanças climáticas são um fenômeno global, mas seus impactos se manifestam na escala regional (IPCC, 2015). Uma visão global sobre os impactos das mudanças climáticas é importante para quantificar os efeitos agregados na região em estudo. A escala regional, por outro lado, é onde a maioria das medidas de adaptação são planejadas e implementadas e onde a interação com as partes interessadas são mais intensas (KRYSAKOVA et al., 2005; HATTERMANN et al., 2011). Como resultado, estudos globais e regionais fornecem informações valiosas para a tomada de decisões e compreensão científica.

2.4.1 Modelos Climáticos

Os Modelos de Circulação Global (GCM) ou Modelos do Sistema Terrestre (ESM) simulam toda a atmosfera da Terra, levando em consideração processos relacionados, como efeitos da química atmosférica e dos aerossóis, interações com a superfície terrestre, ciclo do carbono e crescimento da vegetação (LOBANOVA, 2018).

Nos modelos climáticos globais, o globo terrestre é dividido horizontalmente em uma grade, com células (com lado da ordem de 100 a 300 km) que abrangem toda a superfície

do planeta, a atmosfera e os oceanos, e verticalmente em camadas que abrangem de 19 a 38 níveis na atmosfera e de 20 a 40 níveis nos oceanos (GOOSSE, 2015).

Para estudos regionais, não é recomendada a utilização isolada dos GCMs, em virtude da capacidade de resolução espacial bastante limitada, esta pode ser contornada pelo downscaling, seja pela aplicação de modelos dinâmicos regionais ou por técnicas empíricas, que consistem na transferência das informações meteorológicas para escalas de maior detalhamento (REBOITA et al., 2018). Os Modelos Climáticos Regionais (RCMs) possuem resolução entre 10 e 50 km, o que permite a aplicação em cenários de mudanças climáticas em bacias médias e pequenas, detectando as variações e particularidades de uma determinada região, o que melhora a compreensão de impactos em pequenas bacias (OLIVEIRA et al., 2015).

Analizando a evolução dos modelos, observou-se que os primeiros modelos de circulação geral da atmosfera (MCGAs) foram derivados diretamente de modelos numéricos da atmosfera, desenhados para prever o tempo para curto período (um a três dias, no máximo). A primeira simulação numérica de maior prazo (cerca de um mês), com um MCGA, foi realizada por Phillips, em 1956, que utilizou o modelo quase-geostrófico, com dois níveis na vertical (SAMPAIO e DIAS, 2014).

A partir do final de 1994, com a implantação do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil começou a utilizar um MCGA para realizar previsões numéricas do tempo. Segundo Sampaio e Dias, (2014), nos últimos vinte e nove anos houve uma grande evolução do conhecimento dos diversos elementos do sistema climático, além de melhorias nos sistemas de observações, na capacidade de assimilação de dados, em técnicas numéricas e no aumento da resolução dos modelos e da capacidade computacional. Os mesmos autores afirmam que estes acontecimentos melhoraram o desempenho dos modelos, possibilitando prever o tempo com dias de antecedência da ordem de uma semana com índices de acerto muito altos. Em algumas situações tem sido possível prever mudanças significativas no tempo com cerca de 10 a 15 dias de antecedência.

Atualmente, várias pesquisas utilizam modelos climáticos, a exemplo do estudo de Ribeiro Neto et al., (2016) que avaliaram os impactos dos cenários de mudança climática do IPCC AR5 sobre os recursos hídricos e processos hidrológicos em todo o território brasileiro. Simulações hidrológicas foram realizadas em área total de drenagem de cerca de 11.535.645 km² e vazão média de cerca de 272.460 m³/s, nesta pesquisa foram utilizados downscaling de duas simulações dos modelos climáticos globais, HadGEM2-ES e MIROC5.

Em outro estudo utilizando modelos climáticos, Senior et al., (2016) simularam mudanças climáticas com o modelo físico de clima, HadGEM3-GC2 do Centro Hadley do Met Office (MOHC) e comparou os resultados com simulações do modelo anterior do MOHC, HadGEM2-ES.

Os autores identificaram que, embora, a mudança no feedback da nuvem líquida entre HadGEM3 e HadGEM2 seja relativamente pequena, há uma mudança no sinal de sua onda longa e um fortalecimento de seus componentes de ondas curtas. Em escala global, há pouco impacto do aumento na resolução atmosférica sobre o futuro sinal de mudança climática e, mesmo em uma ampla escala regional, muitas características são robustas, incluindo mudanças nas chuvas tropicais.

Lobanova, (2018) investigou os impactos hidrológicos dos cenários de mudanças climáticas moderados e avançados do aquecimento global na Europa, este estudo de impacto climático foi aplicado em oito bacias representativas da Europa detre elas a do Tejo na Península Ibérica; Emån e Lule na Escandinávia; Reno, Danúbio e Teteriv na Europa Central e Oriental; Tay na Ilha da Grã-Bretanha e do norte da Dvina, no nordeste da Europa.

Para alcançar os objetivos da pesquisa, a mesma Autora, utilizou os cenários do ISI-MIP, que são baseados nos resultados da simulação dos GCMs do projeto de intercomparação de modelos acoplados (CMIP5): HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M e NorESM1-M. Estes cenários, em vez de usar o modelo climático regional para uma escala dinâmica descendente, eles empregaram o método estatístico de redução de escala e correção de bias, garantindo a preservação das tendências das variáveis climatológicas. Inicialmente, as saídas dos GCMs foram bi-linearmente interpoladas em uma grade de meio grau do conjunto de dados WATCH ERA40 e, em seguida, corrigidas pelo método de bias usando os dados do WATCH ERA40 como referência. Uma descrição mais detalhada desse método de correção de bias e suas limitações podem ser encontradas em Hempel et al., (2013).

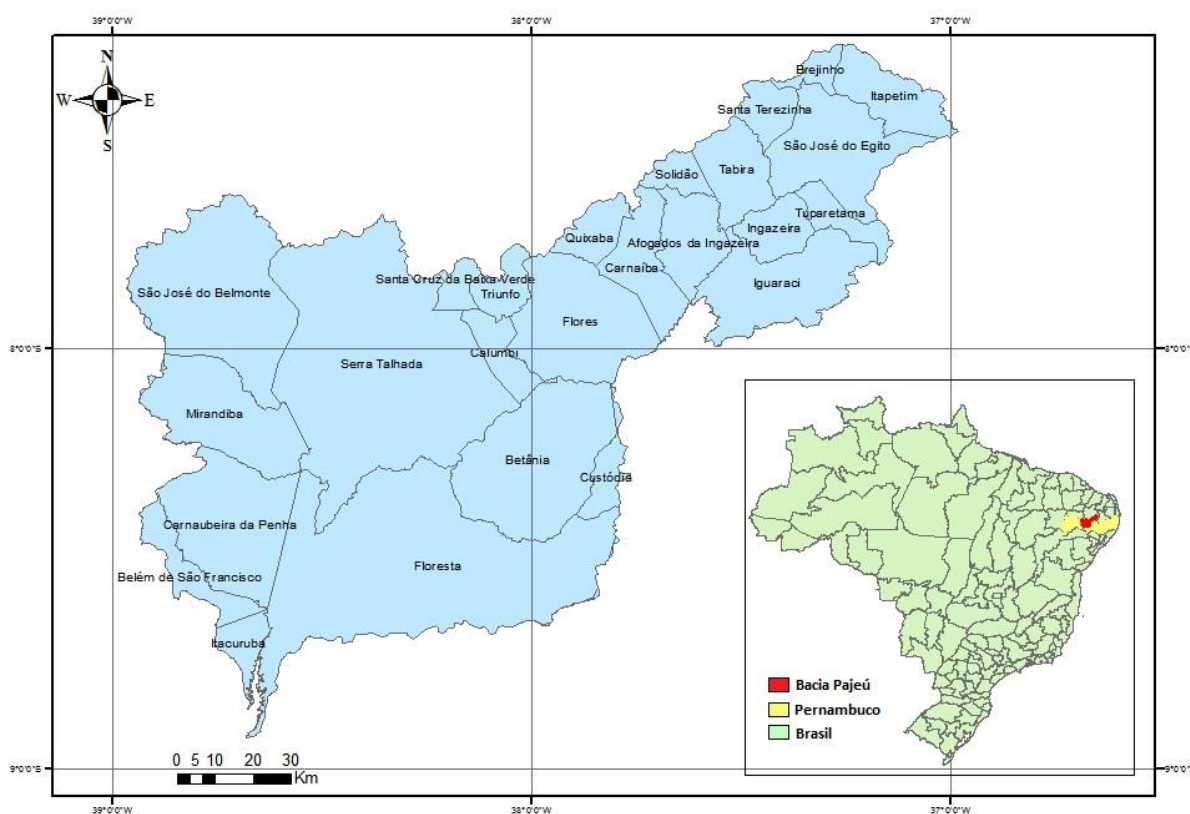
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o procedimento metodológico utilizado para realização desta pesquisa, descrevendo as características fisiográficas e climatológicas da bacia do rio Pajeú, área de estudo desta pesquisa, localizada no estado de Pernambuco no Brasil, bem como as etapas de tratamento de dados, calibração e análise do modelo SWIM e simulações com base nos cenários futuros.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Pajeú foi escolhida por ser a maior do estado de Pernambuco e ser um afluente do rio São Francisco, de grande importância para o país, principalmente para as regiões semiáridas. De acordo com afirmações de Diaz et al., (2018), é a maior bacia do Estado de Pernambuco, com uma área de 16.686 km², correspondendo a 17% da área do Estado e situa-se na zona fisiográfica do Sertão de Pernambuco entre as coordenadas de 07°16'20" e 08°56'01" de latitude Sul, e 36°59'00" e 38°57'05" de longitude Oeste (Figura 6).

Figura 6 - Localização da bacia do rio Pajeú.



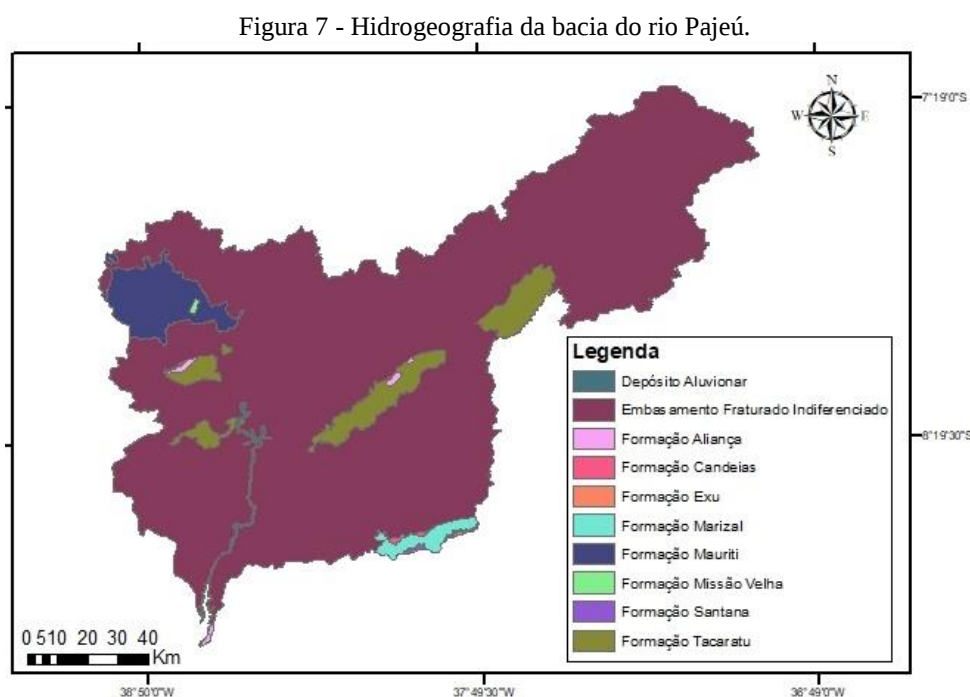
Fonte: A Autora (2019).

A área de drenagem da bacia envolve vinte e sete municípios dos quais sete possuem suas sedes inseridas na bacia (Carnaíba, Carnaubeira da Penha, Floresta, Igaraci, Itacuruba, Mirandiba e São José do Belmonte), com população de aproximadamente 385.000 habitantes. A bacia do rio Pajeú é a Unidade de Planejamento (UP) número 9 do estado de Pernambuco, limita-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba, ao sul com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 3 - GI3 (UP22) e a bacia do rio Moxotó (UP8), a leste com a bacia do rio Moxotó e o estado da Paraíba, e a oeste com a bacia do rio Terra Nova (UP10) e o grupo de bacias de pequenos rios interiores 4 - GI4 (UP23) (FRANÇA, 2017).

O rio Pajeú possui regime fluvial intermitente e percorre uma extensão de 347 km desde a nascente na serra do Balanço, município de Brejinho, a uma altitude em torno de 800 m, até o reservatório de Itaparica no rio São Francisco (CBHSF, 2016).

3.1.1 Hidrogeologia

Segundo Beltrão et al., (2005), aproximadamente 86% da bacia hidrográfica do rio Pajeú é representada pelos diversos tipos líticos cristalinos, a bacia está inserida no domínio de rochas cristalinas e cristalofilianas do embasamento Pré-Cambriano nordestino; os depósitos de bacia sedimentar ocupam aproximadamente 12% da área da bacia, o restante é ocupado pelos depósitos recentes, principalmente aluviais, como ilustra a Figura 7.



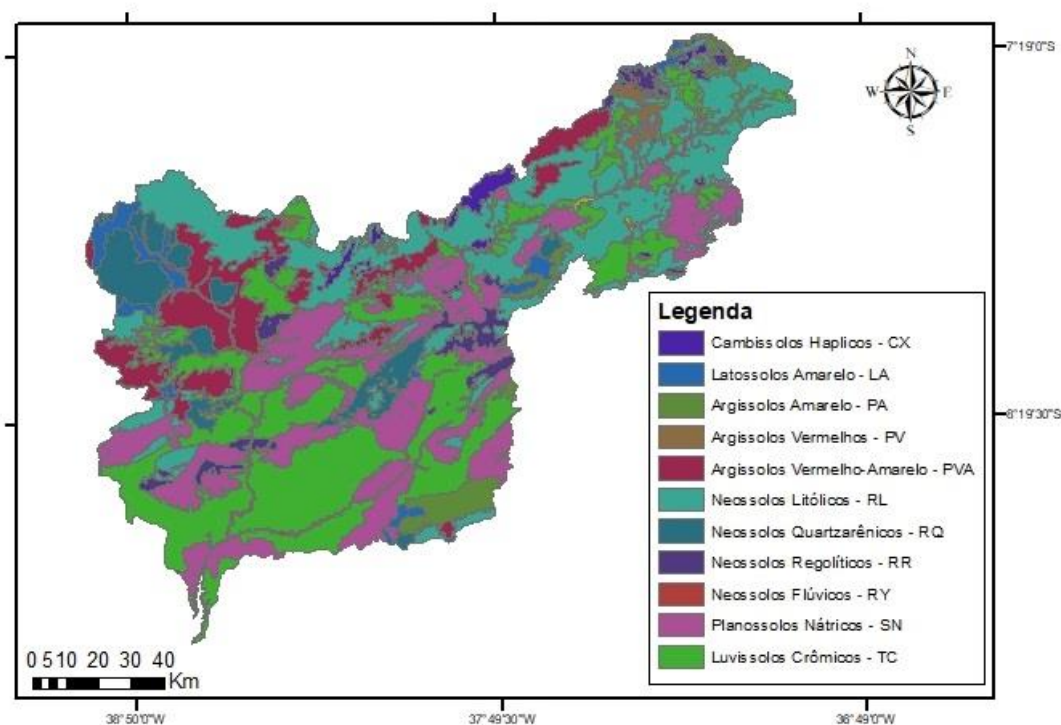
Fonte: Adaptado de CPRM (2007).

A formação sedimentar mais antiga da bacia é a Tacaratú, de idade Siluro-Devoniana é constituída por arenitos grosseiros com níveis de caulim e leitos conglomeráticos, localmente silicificados; a formação Aliança, de idade Jurássica, é constituída por folhelhos e argilitos com intercalações de arenitos e níveis de calcário; outra formação presente na bacia é a Candeias do Cretáceo Inferior, é representada por arenitos, folhelhos, siltitos e níveis de calcário; já a formação Marizal, do Cretáceo Inferior, é constituída de arenitos, folhelhos, siltitos e conglomerado; por fim o grupo Araripe, do Cretáceo Inferior, que é representado pelas formações Santana - calcário, marga e folhelhos - e Exu - arenitos argilosos finos a médios, com intercalações de arenitos grosseiros a conglomeráticos (GOMES et al., 2001).

3.1.2 Solo

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2006), a bacia do rio Pajéu possui 50% de sua superfície coberta pelas classes: Luvisolos e Neossolos, principalmente na área central, em menor proporção ocorrem Latossolos e Cambissolos no limite norte (Figura 8).

Figura 8 - Composição do solo da bacia do rio Pajéu.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2006).

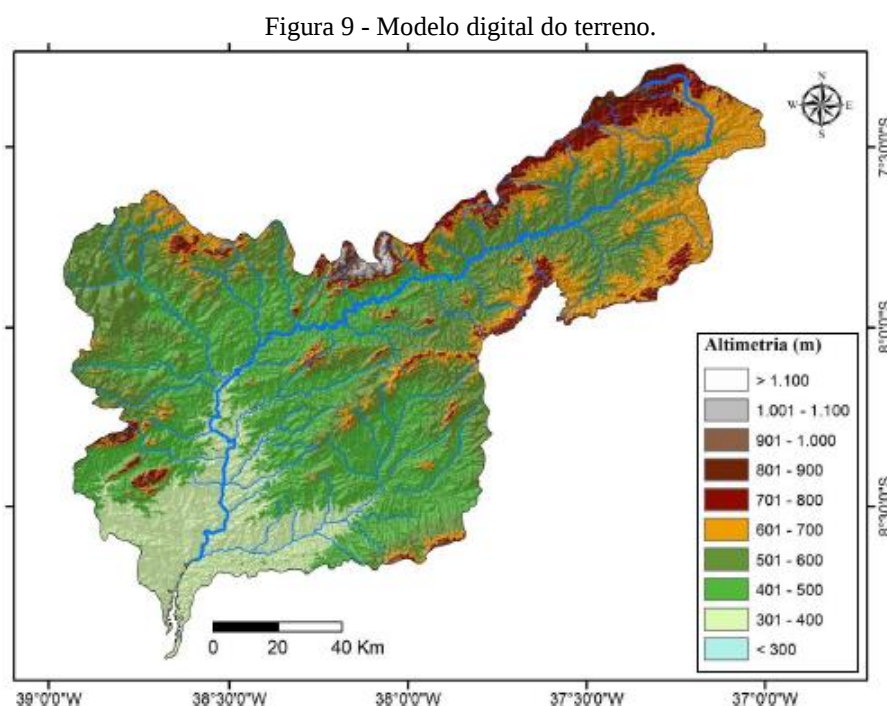
Ribeiro, (2016) destaca a ocorrência significativa de Neossolos Litólicos na bacia, esses solos são pouco evoluídos e com baixa capacidade de retenção hídrica, apesar de fertilidade natural variada não são indicados para uso econômico. Manchas de Argissolos Vermelho–amarelos também são encontradas, esses solos apresentam horizonte B textural e boa profundidade, além de fertilidade natural variada.

Segundo dados da Embrapa, (2006), os Cambissolos ocorrem próximo à sede municipal de Triunfo, são muito porosos, e acentuadamente drenados, por isso são capaz de aproveitar bem as chuvas. São solos de textura média, bastante susceptíveis à erosão por apresentar relevo ondulado e montanhoso. Segundo dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco são solos não recomendados para uso econômico devido ao seu relevo montanhoso e elevado riscos de erosão (SECTMA, 1998).

No domínio da depressão Sertaneja destacam-se os Luvisolos, são solos com alta fertilidade e reação ligeiramente ácida a neutra, possuem elevado teor de argila; e os Planossolos, que apresentam profundidade e fertilidade natural variável (RIBERIO, 2016).

3.1.3 Relevo

Na bacia do rio Pajeú, segundo França (2017), a altitude varia de 250 m a mais de 1000 m (Figura 9).

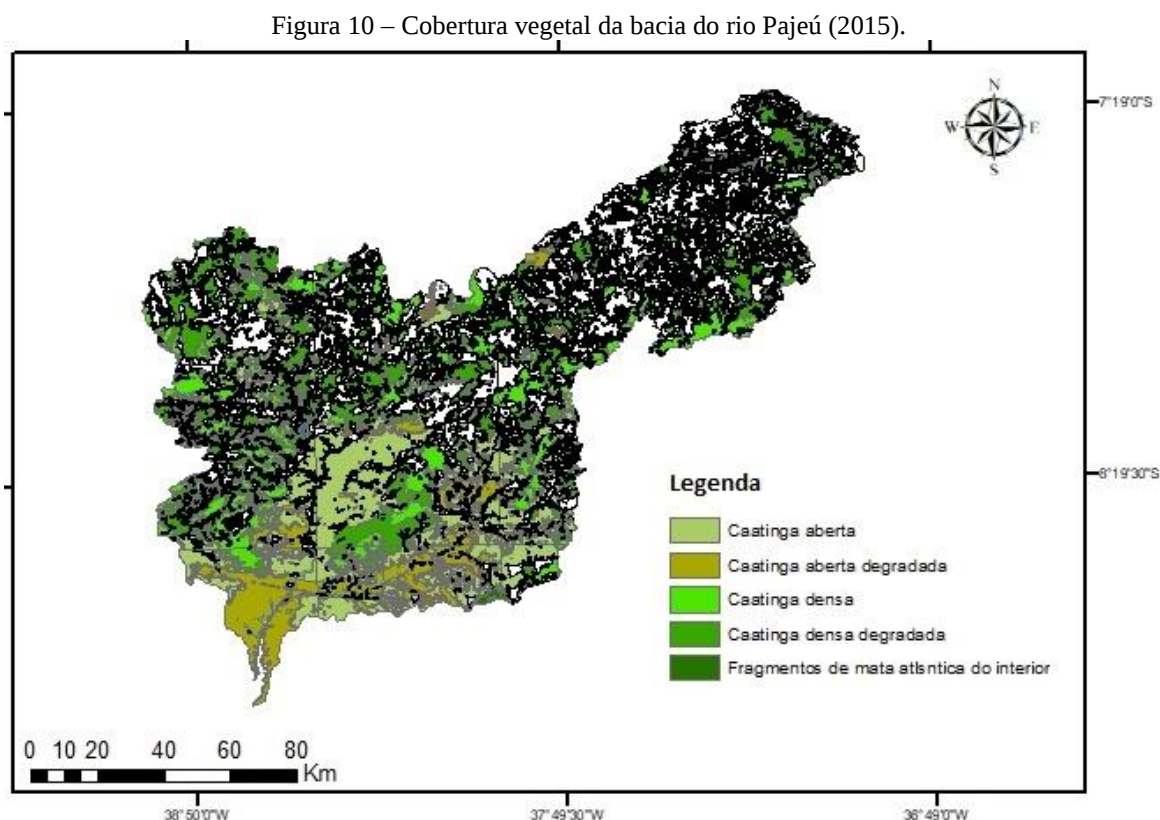


Fonte: Adaptado de USGS (2004).

No ponto mais alto encontra-se o pico do Papagaio, localizado no município de Triunfo, no alto Pajeú o relevo é caracterizado por colinas e serras. Já no baixo Pajeú ocorre o domínio da Depressão Sertaneja, a área mais rebaixada com altitudes variando de 296 m a 539 m. O relevo da bacia é pouco movimentado, apresentando as classes de menor declividade: plano, suave ondulado e ondulado em 92,3% da área.

3.1.4 Cobertura vegetal

A vegetação predominante na bacia é a Caatinga, este bioma, segundo Ribeiro et al., (2016) é o único exclusivamente brasileiro e um dos mais extensos com uma área de 734.478 km², cerca de 10% do território nacional. A Caatinga possui uma vegetação bastante dinâmica e heterogênea, em função de diferentes padrões de precipitação e solo, além do alto grau de resiliência (capacidade de recuperação após ter sofrido perturbações), apesar de sua suscetibilidade natural. A Figura 10 ilustra a cobertura vegetal na bacia.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2015.

A formação vegetal é a Caatinga hiperxerófila, presentes nas áreas mais secas do Sertão. Fortemente influenciadas, principalmente, pelas condições climáticas e pedológicas, essa formação apresenta três tipos fisionômicos: arbórea, arbóreo-arbustiva e arbustiva (Ribeiro, 2016).

3.1.5 Características climáticas

A bacia do rio Pajeú apresenta um clima quente do tipo Tropical semiárido, com um total anual de evapotranspiração potencial oscilando entre 1200 e 1500 mm anuais, e com período chuvoso variando entre os meses de janeiro e maio. As médias históricas de precipitação na bacia são mais elevadas na porção norte, onde a influência da topografia propicia uma média anual superior a 1.200 mm e diminuem gradativamente em direção ao sul, com os menores valores médios anuais, como 467 mm (SOARES et al., 2018).

Estas médias elevadas de precipitação são encontradas no município de Triunfo, considerado o ponto mais alto de Pernambuco, gerando um microclima na bacia, apresentando um clima tropical/brejo de altitude que contradiz com a aridez do sertão nordestino (GONÇALVES e VITA, 2019).

Já as médias históricas anuais de temperatura média variam de 20°C na porção norte, onde as cotas altimétricas ultrapassam os 900 m, até os 26°C na porção sul, na calha do Rio São Francisco, cuja altitude média é de 350 m. (VERSLYPE et al., 2016).

3.1.6 Reservatórios da bacia do rio Pajeú

Segundo Rocha, (2018) reservatórios são estruturas capazes de armazenar ou conter substâncias líquidas, como por exemplo água, e são destinadas para usos como irrigação, abastecimento de água, regularização de vazões, controle de cheias, açudagem e geração de energia. A construção dessas obras hídricas pode estar diretamente ligada ao armazenamento de água para minimizar os efeitos da escassez deste recurso, principalmente nas regiões semiáridas, que apresentam longos períodos de seca e dificuldade de acesso à água (DANTAS, 2018).

No Brasil as barragens surgiram com o objetivo de atender aos usos múltiplos da população, principalmente o abastecimento de água das cidades e pequenos núcleos populacionais e a irrigação. A política de açudagem no Nordeste esteve intrinsecamente interligada ao fenômeno natural das secas. Nas regiões semiáridas a construção de açudes

tinha como finalidade a permanência do sertanejo no seu ambiente natural. As primeiras barragens foram construídas no Nordeste a partir de 1987, neste contexto o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS) teve um papel importante (CBDB, 2011).

Segundo dados da SECTMA (1998) a bacia do rio Pajeú, dispõe de 34 açudes com capacidade superior a 500 mil m³, considerados de regularização interanual. Dos reservatórios listados na Tabela 1, 37% possui como uso prioritário o abastecimento de água, 21% a irrigação e 42% outras finalidades. O açude Serrinha II possui maior capacidade com 311.080.000 m³, este açude foi construído em 1996, sendo um dos mais recentes. O primeiro reservatório construído foi o açude Quebra Unha em 1934. Dos 24 reservatórios listados, 16 foram construídos entre os anos de 1934 a 1985.

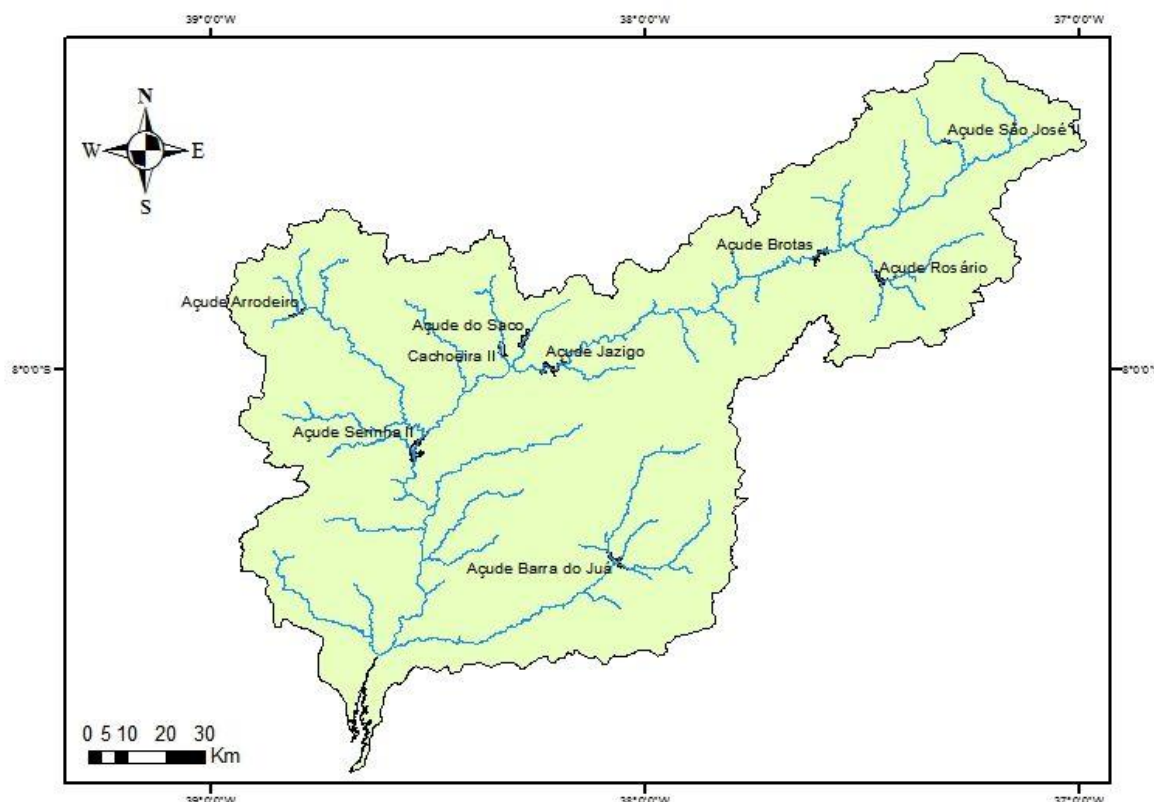
Tabela 1 – Principais reservatórios da bacia do rio Pajeú.

Reservatório	Capacidade Máxima (m ³)	Município	Ano Construção	Uso Do Açude
Serrinha II	311.080.000	Serra Talhada	1996	Outro Uso
Barra do Juá	71.474.000	Floresta	1982	Outro Uso
Saco I	36.000.000	Serra Talhada	1936	Irrigação
Rosário	34.990.000	Iguaraci	1985	Outro Uso
Cachoeira II	21.031.145	Serra Talhada	1965	Irrigação
Brotas	19.639.577	Afogados da Ingazeira	1978	Outro Uso
Jazigo	15.543.300	Serra Talhada	1983	Outro Uso
Arrodeio	14.522.100	Sao Jose do Belmonte	1956	Outro Uso
São José II	7.152.875	São José do Egito	1981	Abastecimento
Chinelo	3.453.800	Carnaíba	-	Abastecimento
Quebra Unha	3.190.000	Floresta	1934	Outro Uso
Jureminha	2.080.355	São José do Egito	-	Abastecimento
José Antonio	2.024.540	Santa Terezinha		Abastecimento
Bom Sucesso	1.743.680	Tuparetama	-	Abastecimento
Boa Vista (Itapetim)	1.632.187	Itapetim	-	Outro Uso
Serrote	1.622.615	São José do Belmonte	1981	Irrigação
São José	1.600.000	Belém de São Francisco	-	Abastecimento
Mãe D'Água	1.500.000	Itapetim	1991	Irrigação
Poço Grande	1.500.000	Flores	1983	Outro Uso
Serrinha/Serraria	1.256.504	Brejinho	1981	Abastecimento
Retiro	1.117.693	São José do Egito	1982	Irrigação
Laje do Gato	1.102.940	Afogados da Ingazeira	1970	Abastecimento
Caramucugui	777.182	Araripina	-	Outro Uso
Brejinho	282.840	Triunfo	-	Abastecimento

Fonte: Adaptado da SECTMA (1998).

Nesta pesquisa foram estudados os nove principais açudes com capacidade máxima maior do que 5 milhões m³, quais sejam: Saco I, Serrinha II, Arrodeio, Cachoeira II, Jazigo, Brotas, São José II, Rosário e Barra de Juá (Figura 11).

Figura 11– Principais açudes da bacia do rio Pajeú.



Fonte: A Autora (2019).

3.1.7 Gestão da bacia do rio Pajeú

No Brasil, de acordo com afirmações de Barros e Barros, (2015), a formação do arcabouço legal e institucional para criação de um ambiente habilitador da gestão de recursos hídricos deu-se mediante a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (SINGREH), sendo o comitê de bacias um dos atores deste sistema.

O comitê de bacia é um órgão colegiado, integrado pelo poder público, sociedade civil e empresas usuárias de água, que tem por finalidade realizar a gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos da bacia, na perspectiva de proteger os seus mananciais e contribuir para o seu desenvolvimento sustentável (CBRSH, 2016).

O comitê da bacia do rio Pajeú foi criado em 2000, pela resolução CRH 03/2000. O comitê é um órgão colegiado, de caráter consultivo e deliberativo, que compõe o Sistema Estadual Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos (SIGRH) com atuação na área de drenagem da bacia do rio Pajeú que envolve vinte e sete municípios dos quais sete possuem suas sedes inseridas na bacia (Carnaíba, Carnaubeira da Penha, Floresta, Igaracy, Itacuruba, Mirandiba e São José do Belmonte).

Segundo dados do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco (2016-2025), a bacia do rio Pajeú apresenta classificação muito crítica com relação à disponibilidade de água, as vazões definidas no referido plano para a bacia no período de 1931-2013 são: 1,2 m³/s (Q_{7,10} - vazão mínima de sete dias de duração e 10 anos de tempo de retorno) e 1,9 m³/s da vazão em regime natural com permanência de 95% (Q₉₅). Sendo a vazão de retirada de 4,80 m³/s.

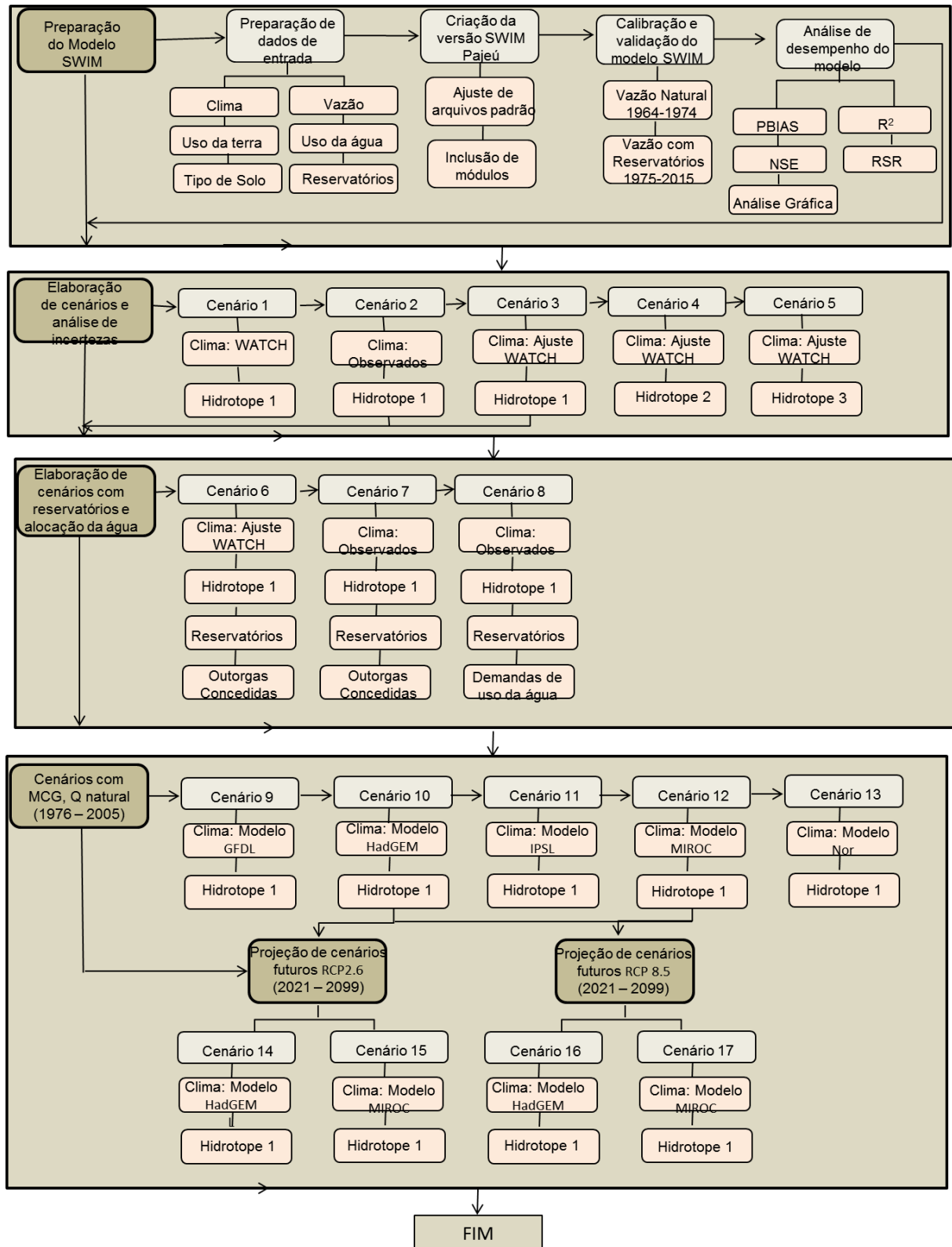
A análise dos resultados do balanço hídrico, presentes no plano, revela que os recursos hídricos superficiais disponíveis não são suficientes para satisfazer as projeções de demanda apresentada nos vários cenários, com níveis de garantia adequados. Por isso constata-se um aumento no consumo de água subterrânea (CBRSH, 2016).

Algumas metas previstas no referido plano para a bacia do Pajeú são: a elaboração do plano diretor da bacia, regularização das outorgas, melhoria do instrumento de cobrança, além de outras ações que buscam o uso sustentável dos recursos hídricos.

3.2 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

A metodologia descreve as etapas definidas para alcançar os objetivos desta pesquisa. Iniciando com a preparação do modelo SWIM que contempla a escolha, análise e tratamento de dados de entrada do modelo, a criação da versão do modelo SWIM Pajeú, calibração e validação do modelo SWIM e análise de desempenho do modelo. A segunda fase da pesquisa consistiu na elaboração de cenários com vazão natural utilizando diversas fontes de dados de entrada, cujo objetivo é analisar as incertezas nos dados entrada do modelo. Na terceira etapa foram elaborados cenários com reservatório e alocação da água, e por fim a realização de simulações com base nos cenários utilizando os modelos climáticos de circulação global para vazão natural e cenários futuros, conforme apresentado no fluxograma metodológico, ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma metodológico.



Fonte: A Autora (2019).

3.3 PREPARAÇÃO DO MODELO SWIM

A seguir são descritos os procedimentos necessários para a preparação dos dados de entrada para o modelo SWIM.

3.3.1 Preparação de dados de entrada

O procedimento inicia-se com a escolha, análise e tratamento de dados de entrada do modelo: dados do clima, uso da terra, tipo do solo, vazão e dados de alocação de água. Estes foram adquiridos de diversas fontes como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de entrada no modelo SWIM.

Dados de entrada do modelo	Fonte	Resolução	Observação	Origem do dado
Clima (Precipitação, umidade do ar, temperatura e radiação)	Dados Observado INMET, APAC e ANA	postos (dados pontuais)	dados diários; 01.01.1964-31.12.2015	http://www.inmet.gov.br http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php http://www.snirh.gov.br/hidroweb
	WATCH ERA40	células de 0.5° (aprox. 50x50km)	dados diários; 01.01.1961-31.12.2001	http://www.eu-watch.org
	WATCH ERA-Interim	células de 0.5° (aprox. 50x50km)	dados diários; 01.01.1979-31.12.2010	http://www.eu-watch.org
Modelo numérico do terreno	NASA SRTM	90x90 m	geração das sub-bacias	http://srtm.csi.cgiar.org
Solos	Embrapa (shp); dados para Pernambuco	transformado em 500x500 m	para geração do hidrotopo 2	http://geoinfo.cnps.embrapa.br
	Embrapa (shp); dados para Pernambuco	transformado em 100x100 m	para geração dos hidrotopos 1 e 3	http://geoinfo.cnps.embrapa.br
Uso da terra	MODIS (2010); dados globais (shp)	transformado em 500x500 m	modelo SWIM 500m	Koch et al., (2018a)
	IBGE (2015); dados para Pernambuco (shp)	transformado em 100x100 m	modelo SWIM 100m	ftp://geofpt.ibge.gov.br
	Imagem Landsat 5 Classificada 1985 (shp)	30x30m	composição R(4)G(3)B(2)	http://mapbiomas.org
Vazão	ANA	postos (dados pontuais)	dados diários	http://www.snirh.gov.br/hidroweb
Reservatórios (volume)	APAC	postos (dados pontuais)	dados diários	http://www.apac.pe.gov.br
Alocação da água	ANA e APAC	usuários (dados pontuais)	período da outorga	http://www.snirh.gov.br/hidroweb APAC (dados adquiridos <i>in loco</i>)

Fonte: A Autora (2019).

Krysanova et al., (2000) apontam que durante a configuração do modelo SWIM, o usuário deve preparar vários arquivos de entrada. Nesta pesquisa foram utilizados:

- Modelo numérico do terreno, mapa de uso da terra, mapa do solo e mapa das sub-bacias;
- Dados climáticos e hidrológicos (dados observados e do WATCH);
- Dados de vazão e retirada/alocação de água;
- Arquivos criados pela interface SWIM / MapWindows;
- Banco de dados de plantio e colheita das culturas.

3.3.1.1 Tratamento de dados espaciais para entrada no modelo SWIM

A interface SIG do MapWindow foi modificada para SWIM, criando um plug-in do SWIM, para extrair parâmetros espacialmente distribuídos de elevação, uso e tipos de solo, rede de drenagem. Para aplicar a interface, foi necessário fornecer quatro mapas temáticos: o modelo numérico do terreno, o mapa de uso da terra, mapa do tipo de solo e mapa das sub-bacias, cujas fontes estão descritas na Tabela 2. A interface cria vários arquivos necessários para rodar o modelo, descritos no apêndice I. Dentre os arquivos criados estão: um arquivo “file.cio” que contém arquivos de entrada com nomes que são usados no modelo; um arquivo de controle da estrutura da bacia “str.ci”; um arquivo “xxx.fig”; um arquivo “xxx.str”; arquivos “xxxNN.sub”, ambos de estrutura da bacia; arquivos “xxxNN.gw” e arquivos “xxxNN.rte”, estes últimos são gerados de acordo com o número de sub-bacias, que variam de 0 a NN.

Cada arquivo criado tem sua função na modelagem, a exemplo do arquivo de estrutura (“xxx.str”) que contém informações sobre tipo de uso da terra e tipo de solo para cada hidrótopo, e o arquivo (“xxx.fromto”) que indica como as sub-bacias estão conectadas com rede fluvial.

Para gerar os arquivos no SIG, o primeiro procedimento foi criar os atributos das sub-bacias, o programa MapWindow calculou as sub-bacias, usando um mapa da delimitação da bacia com a rede de drenagem e o modelo numérico do terreno, o programa estimou também o comprimento do córrego, o declive do córrego e dimensões geométricas.

Na segunda etapa, foram selecionadas as estações de clima mais próxima para cada sub-bacia gerada no modelo, com base nos dados climáticos que estão descritos na Tabela 3 (com dados climáticos observados nas estações de monitoramento escolhidas, o programa

gerou dois arquivos com as informações climáticas interpoladas para cada sub-bacia (“clim1.dat” e “clim2.dat”).

Em seguida o programa definiu a estrutura dos hidrotopes da bacia, sobrepondo o mapa das sub-bacias com a mapa de uso da terra e o mapa dos tipos de solo. O arquivo de estrutura foi criado para execução do modelo, cada linha no arquivo descreve as características de um hidrotopo quais sejam: número da sub-bacia, uso da terra e tipo de solo.

Nesta pesquisa foram criados três arquivos de hidrotopes distintos, fato que se deve a necessidade de analisar as incertezas dos dados de entrada do modelo. Para alcançar este objetivo o hidrotopo 1 foi criado usando o mapa de uso da terra do MapBiomass 1985, associado ao mapa de tipo de solo da Embrapa, com resolução de 100 x 100 m. O arquivo de hidrotopo 2 foi gerado utilizando o mapa de uso da terra gerado a partir de imagens MODIS 2010 e tipo de solo da Embrapa, com resolução de 500 x 500 m. E o hidrotopo 3 com resolução de 100 x 100 m foi gerado com dados de uso da terra do IBGE de 2015 e tipo de solo conforme Embrapa.

Após a criação dos arquivos de hidrotopo foi iniciada a etapa de preparação dos arquivos de entrada do modelo.

3.3.1.2 Geração de arquivos de dados alfanuméricos

Alguns arquivos necessários para rodar o modelo SWIM são gerados pelo usuário, a exemplo dos arquivos com dados climáticos, dados de reservatórios e de alocação da água. Os dados de reservatórios são representados pelos arquivos "reservoir.ctrl", "reservoir_storage_conf.csv" e "reservoir_monthly.csv". Já os dados de alocação da água requer a construção do arquivo “wam_transfer.ctrl” e um arquivo “trans000x.ts” para cada usuário.

A entrada dos dados de clima no modelo ocorreu com a preparação dos arquivos “clim1.dat” e “clim2.dat”. O primeiro armazena os dados de radiação solar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento, e o segundo arquivo contém os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar. Outros arquivos que são preparados pelo usuário estão descritos no apêndice I.

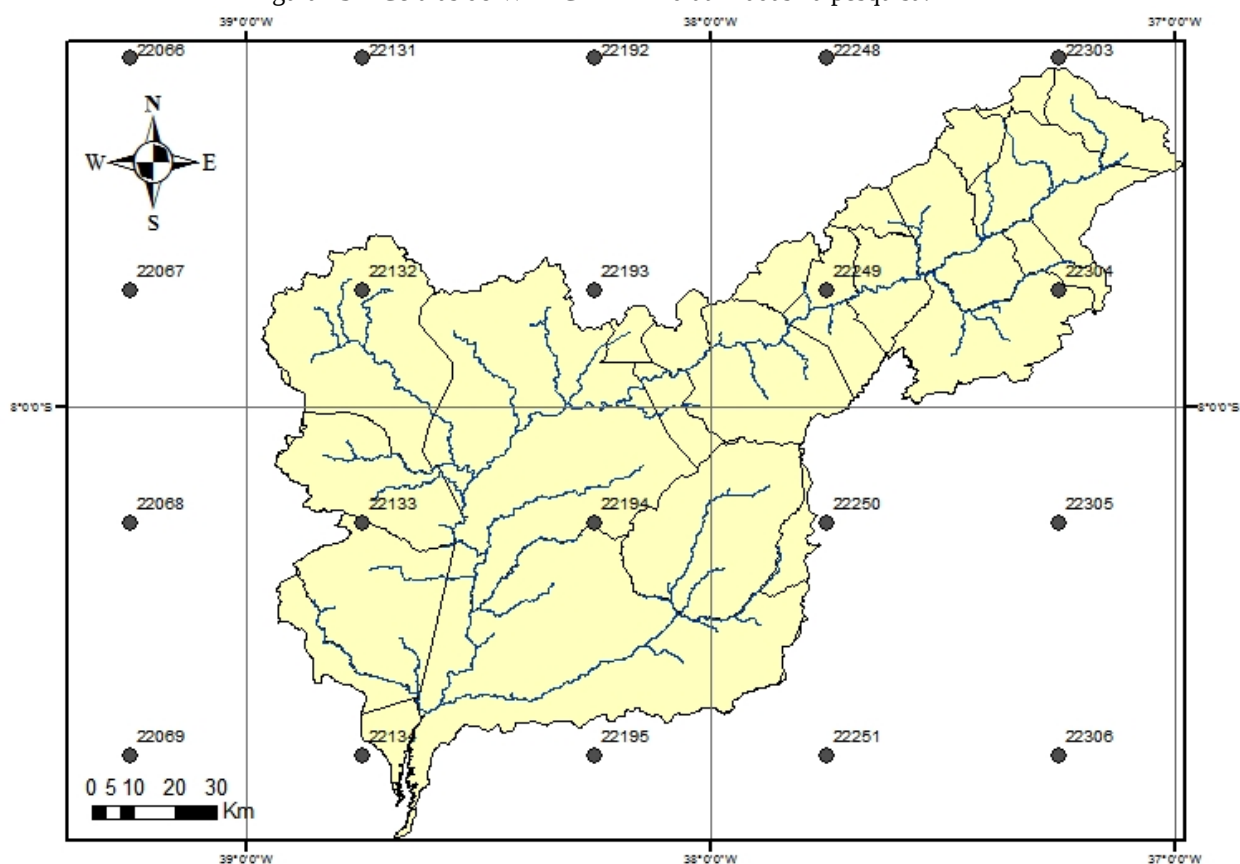
3.3.1.3 Análise de dados climáticos no modelo SWIM

Para a bacia do rio Pajeú, foram analisadas três fontes: dados observados de estações de monitoramento hidrometeorológico (apresentados na Tabela 3), dados do WATCH ERA

40 e do WATCH ERA-Interim. O WATCH surgiu como projeto de pesquisa financiado pelo Sixth Framework Programme, da União Europeia (EU), com objetivo de analisar e quantificar a previsão dos componentes dos ciclos de água globais, atuais e futuros, avaliando as incertezas e vulnerabilidades dos recursos hídricos.

Os dados do WATCH a nível global estão disponíveis em escala de célula com resolução espacial de 0,5°, aproximadamente 50 x 50 km em duas versões: WATCH ERA40 para os anos 1961 a 2001 e WATCH ERA-Interim para os anos 1979 a 2010. Para criar a série do WATCH ERA40 foram usados dados do ERA40 (UPPALA et al., 2005) e dados do ERA-Interim (DEE et al., 2011) foram usados para criar série do WATCH ERA-Interim (Figura 13).

Figura 13 – Células do WATCH ERA40 utilizadas na pesquisa.



Fonte: A Autora (2019).

3.3.1.3.1 *Análise preliminar*

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a análise preliminar de uma amostra de dados hidrológicos compreende um conjunto de métodos e técnicas que visam extrair as características empíricas essenciais do padrão de distribuição de uma variável hidrológica. Os

mesmos autores destacaram como métodos disponíveis: o sumário numérico e estatística descritiva; métodos exploratórios e a apresentação gráfica.

Analisando os dados climáticos observados em estudo, inicialmente utilizou-se o método de apresentação gráfica, com a aplicação do gráfico de linha representando, no eixo vertical, os valores diários da série e, no eixo horizontal, o intervalo de tempo em dias, possibilitando assim, a identificação de dados inconsistentes das variáveis: temperatura do ar, umidade do ar e precipitação. A radiação solar foi calculada aplicando o método do Hargreaves et al., (1985), utilizando dados de temperaturas mínima e máxima do dia e a latitude.

No intuito de verificar a existência de valores atípicos ou *outliers*, nas séries das variáveis de temperatura máxima, média e mínima e umidade relativa do ar, aplicou-se um método exploratório chamado de diagrama Box plot, que consiste em um retângulo definido pelo primeiro e pelo terceiro quartis, contendo a mediana (Equação 1) em seu interior relativa às observações médias diárias de cada variável em estudo (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$x_{md} = x_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} \text{ se } N \text{ for ímpar ou } x_{md} = \frac{x_{\left(\frac{N}{2}\right)} + x_{\left(\frac{N}{2}+1\right)}}{2} \text{ se } N \text{ for par} \quad (1)$$

Onde: x_{md} é a mediana e N é o número de observações.

Para calcular os três quartis, inicialmente dividiu-se o conjunto de dados em duas partes, cada uma com metade dos dados, calculando, assim, a mediana ou segundo quartil. Em seguida considerou-se as duas partes que ela gerou, uma abaixo da mediana e outra acima da mediana, ambas têm o mesmo número de observações. O primeiro quartil (Q_1) foi calculado como a mediana da parte inferior e o terceiro quartil (Q_3) foi calculado como a mediana da parte superior. De posse destes valores pode-se calcular a amplitude interquartil (AIQ), obtida pela equação 2 (NAGHETTINI e PINTO, 2007):

$$AIQ = Q_3 - Q_1 \quad (2)$$

Ainda segundo o autor, o procedimento adotado para identificar os valores discrepantes ou atípicos foi traçar no gráfico de linha, apresentado anteriormente, uma linha vertical até o ponto que não exceda ($Q_3 + 1,5AIQ$), considerado limite superior para a

identificação de *outliers*. De modo análogo, traçou-se outra linha até o limite dado por ($Q_1 - 1,5AIQ$). As observações que estavam acima ou abaixo desses limites foram identificadas no diagrama e consideradas *outliers*.

Com o intuito de testar a homogeneidade da variável precipitação, foi realizada a análise de consistência utilizando o Método de Dupla Massa descrito por Tucci, (2012), que consiste em selecionar os postos de uma região e plotar num gráfico cartesiano os valores acumulados do posto de referência em relação à média acumulada dos postos da região. Mello e Oliveira (2016) afirmam que haverá consistência quando houver uma tendência linear entre as análises, sendo avaliada pelo ajuste da equação da reta e pelo Coeficiente de Determinação (R^2). Uma vez identificadas falhas nas séries, procedeu-se a etapa de preenchimento destes dados.

3.3.1.3.2 *Preenchimento de falhas*

O preenchimento das falhas foi necessário para realizar a calibração e a validação do modelo, o método utilizado nesta etapa, foi a análise de regressão linear múltipla. Os dados diários climatológicos consecutivos (temperatura, umidade relativa do ar, radiação e precipitação) serviram como dados de entrada para calcular o balanço hídrico da bacia do rio Pajeú. Os dados do WATCH ERA40 e do WATCH ERA-Interim não tem falhas por isso não foi necessário realizar o preenchimento.

Após a análise preliminar, na qual são identificadas falhas e inconsistências nas séries, realizou-se a etapa de preenchimento de falha, que permitiu o preenchimento de lacunas nos registros ou a substituição de dados inconsistentes. Este procedimento utilizou os dados de estações situadas em bacias ou regiões vizinhas como valores de comparação, como proposto por Azevedo (2010).

a) Escolha das estações utilizadas

As estações climáticas utilizadas neste trabalho foram consultadas no banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do qual foram selecionadas dezessete estações mais próximas da bacia do rio Pajeú, descritas na Tabela 3 para os dados de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação.

Algumas das estações selecionadas apresentam-se distantes da bacia, isto se deve ao fato do Brasil possuir poucas estações de monitoramento hidrometeorológico, comparados com outros países, como, por exemplo, a Inglaterra e a Alemanha.

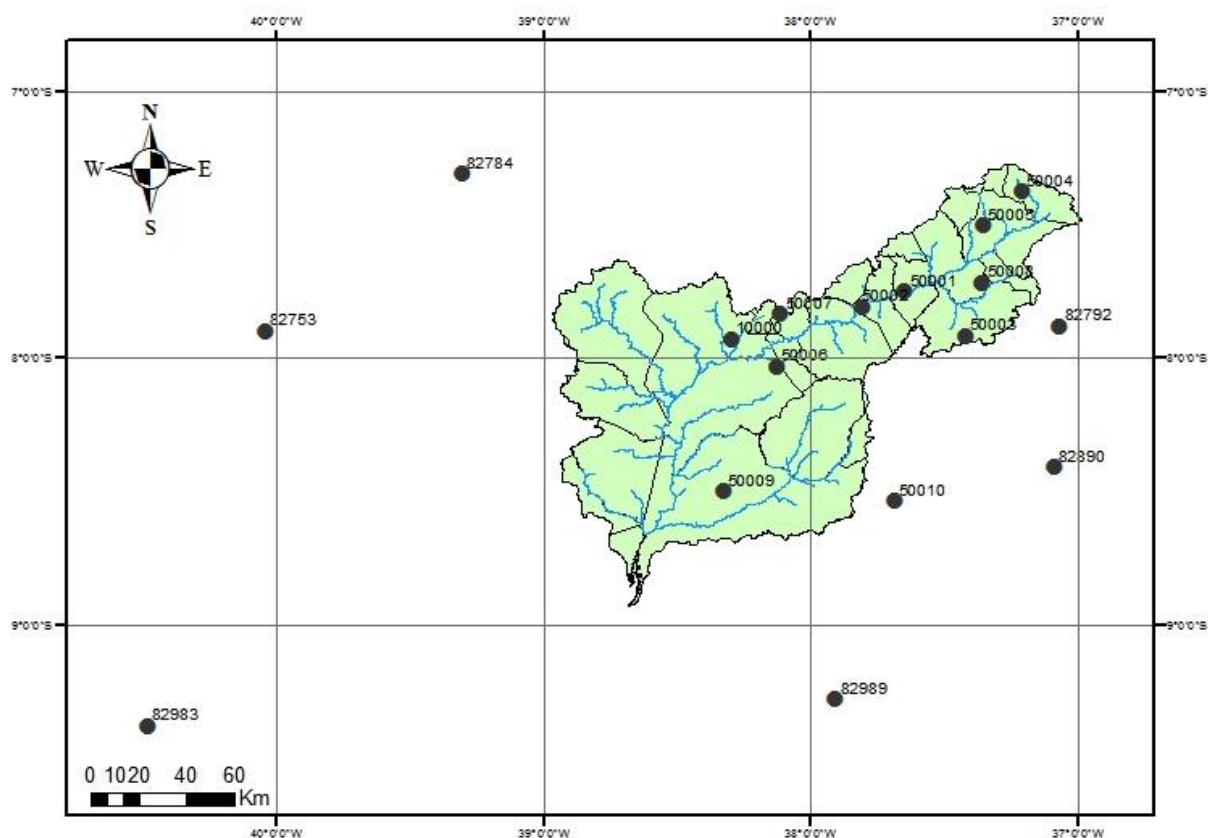
Tabela 3 - Descrição das estações vizinhas à área de estudo

ID	LONGITUDE	LATITUDE	POSTOS	OPERADORA
82890	-37.08	-8.41	Arco Verde	INMET
82753	-40.04	-7.9	Ouricuri	INMET
50002	-37.798	-7.808	Carnaíba	APAC
50003	-37.414	-7.916	Iguaraci	APAC
50004	-37.201	-7.377	Itapetim	APAC
50005	-37.348	-7.502	São José do Egito	APAC
50006	-38.123	-8.032	Serra Talhada	APAC
50007	-38.106	-7.837	Triunfo	INMET
50008	-37.35	-7.717	Tuparetama	APAC
50009	-38.321	-8.502	Floresta	APAC
50010	-37.679	-8.538	Ibimirim	APAC
82983	-40.48	-9.38	Petrolina	INMET
82792	-37.06	-7.88	Monteiro	INMET
82784	-39.3	-7.31	Barabulha	INMET
82989	-37.9	-9.28	Água Branca	INMET
10000	-38.29	-7.93	Serra Talhada	IPA
50001	-37.641	-7.75	Afogados da Ingazeira	APAC

Fonte: A Autora (2019).

Das estações selecionadas, a maioria está localizada no estado de Pernambuco (Figura 14). Porém observou-se que a maioria das estações de monitoramento climatológico estão concentradas na região norte da bacia, ficando a região sul da bacia carente de estações. Este fato reflete diretamente na qualidade da calibração e validação dos modelos hidrológicos (ANDRADE et al., 2017), uma vez que para suprir esta carência utiliza-se estações mais distantes e que muitas vezes possuem características climáticas distintas da área de estudo pretendida, podendo superestimar ou subestimar estas variáveis e consequentemente as simulações de descargas da bacia hidrográfica (BRESSIANI, 2016). Reforçando esta afirmação Bressiani et al., (2015b), destacaram ainda que as estações de monitoramento, em muitas regiões brasileiras, não estão em quantidade, distribuição e tempo de operação suficientes ou adequados, configurando os problemas relacionados à escassez de dados.

Figura 14 - Localização das estações de coleta de dados.



Fonte: A Autora (2019).

Após esta seleção preliminar, algumas estações apresentaram falhas que necessitaram de preenchimento, uma vez que os dados precisam estar completos para rodar o modelo SWIM. Diante deste fato, foram feitas algumas análises com base nos seguintes critérios: proximidade da estação a ser preenchida, compatibilidade da série histórica das estações com a estação a ser preenchida para o período de 1964 a 2015 e ausência de falhas ou dados inconsistentes na série para o período a ser preenchido.

b) Análise de regressão linear múltipla

O preenchimento das falhas foi realizado aplicando a análise de regressão linear múltipla, para cada variável quais sejam: temperatura máxima, mínima, média, umidade relativa do ar e precipitação, este método foi escolhido por apresentar bons resultados em alguns trabalhos, a exemplo das pesquisas de Oliveira et al., (2010), Silva, (2014), Mello et al., (2017).

Quando existem duas ou mais variáveis explicativas correlacionadas com uma mesma variável resposta, diz-se que será construído um modelo de regressão linear múltipla (Equação 3) (MONTGOMERY, 2009).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Onde: Y_i é a variável dependente ou prevista; $X_1, X_2, \dots, X_p$ são as variáveis independentes ou explicativas e $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ são os coeficientes de regressão e P é o número de variáveis independentes.

c) Interpolação espacial pelo inverso da distância

A técnica de interpolação espacial foi aplicada com o objetivo de distribuir espacialmente as informações de clima (temperatura máxima, mínima, média, umidade relativa do ar e precipitação) para as sub-bacias do rio Pajeú estudadas nesta pesquisa. Este procedimento foi realizado tanto para os dados climáticos observados, dados pontuais das estações observadas listadas na Tabela 3, quanto para os dados do WATCH ERA40.

A interpolação é uma técnica usualmente adotada para estimar valores desconhecidos de uma função a partir de valores conhecidos da mesma função. O interpolador inverso da distância é baseado na distância ponderada de um ponto amostral, quanto maior for a distância entre a amostra e o ponto a ser estimado, menor será a influência da amostra (ANJOS et al., 2017). Este interpolador é determinado pela Equação 4:

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} x z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)} \quad (4)$$

Onde: $\hat{Z}_i$ é o valor interpolado, Z_i é o valor amostrado e d_i é a distância entre o ponto amostrado e o estimado, n número de pontos vizinhos utilizados na interpolação.

3.3.1.3.3 Radiação solar

A radiação solar (ra_{sol} em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$) foi calculada usando o método de Hargreaves et al., (1985) (Equação 5):

$$ra_{sol} = (ek1.ra_{ex}.(T_{max} - T_{min})^{0,5} + ek2) \quad (5)$$

Onde: $ek1$ e $ek2$ são parâmetros, ra_{ex} é a radiação extraterrestre (em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$), T_{max} é a temperatura diária máxima, e T_{min} é a temperatura diária mínima (em $^{\circ}C$). Para derivar os valores dos parâmetros $ek1$ e $ek2$ ($ek1 = 0,24$; $ek2 = -2,30$) foram usados dados da radiação solar observados na estação Petrolina/PE (PCD 32475).

3.3.1.3.4 Geração de arquivos climáticos

Após o preenchimento das falhas dos dados climáticos observados foram gerados os arquivos “clim1.dat” e “clim2.dat”, com os dados observados, com os dados do WATCH ERA40 e do WATCH ERA40 ajustado. Totalizando três pares de arquivos “clim1.dat” e “clim2.dat”, conforme descritos na Tabela 4, utilizados nos cenários de 01 a 05 desta pesquisa, com o objetivo de verificar as incertezas nos dados de entrada, etapa que será descrita no item 3.4.

Tabela 4 - Descrição da geração de dados climáticos.

Nome	Descrição
“clim1.dat” e “clim2.dat” dados observados	Gerados com dados climáticos observados das estações do INMET, APAC e IPA (descritos na Tabela 3)
“clim1.dat” e “clim2.dat” dados WATCH ERA 40	Gerados a partir de dados do WATCH ERA40
“clim1.dat” e “clim2.dat” dados ajustados	Gerados a partir dos dados do WATCG ERA40 e dados observados.

Fonte: A Autora (2019).

Os dados do “clim1.dat” e “clim2.dat”, para dados WATCH ERA40 ajustados, foram gerados a partir dos dados observados e do conjunto de dados WATCH-ERA40 para o período de (1960 a 2001), foram calculados percentis de precipitação diária para diferentes regiões, aplicando o método Bias Mapping. O método consiste em ajustar os valores de percentis de uma simulação com os valores de observações através de uma função de transferência. Este método foi aplicado nas pesquisas de Maraun, (2013), Ringard et al., (2017) e Velasquez et al., (2019).

Traçando os percentis para os dados observados e WATCH-ERA40 foram encontrados funções polinomiais para correção da precipitação para as diferentes regiões como apresentado na Equação 6.

$$P_W = ax^2 + bx + c \quad (6)$$

Onde P_w é o valor da precipitação do WATCH ERA40 ajustado, x é o valor da precipitação do WATCH-ERA40, a , b e c são constantes que foram aplicadas para cada posto de observação como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das constantes para o ajuste da precipitação do WATCH-ERA40

Regiões	Valor de x	a	b	c
Flores	$>5,5$	-0,0021	0,7620	1,0300
Serra Talhada	$>20,0$	-0,0022	0,9720	1,4200
Serrinha	$>20,0$	-0,0038	1,0620	0,3600
Floresta	$>50,0$	-0,0041	1,2110	1,6400

Fonte: A Autora (2019).

As correções foram realizadas por trechos: a Equação 6 com valores para Flores foi aplicada para a região a montante do posto Flores e para valores de precipitação acima de 5,5 mm/dia, a correção para Serra Talhada foi aplicada para a região entre os postos fluviométricos de Flores e Serra Talhada e para valores de precipitação acima de 20 mm/dia (Tabela 6).

Tabela 6 – Correções das precipitações para as diferentes regiões

Precipitação (mm/d)				
WATCH ERA 40	Flores	Serra Talhada	Serrinha	Floresta
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
6,0	5,5	6,0	6,0	6,0
7,0	6,3	7,0	7,0	7,0
8,0	7,0	8,0	8,0	8,0
9,0	7,7	9,0	9,0	9,0
10,0	8,4	10,0	10,0	10,0
20,0	15,4	20,0	20,0	20,0
30,0	22,0	28,6	28,8	30,0
40,0	28,2	36,8	36,8	40,0
50,0	33,9	44,5	44,0	50,0
60,0	39,2	51,8	50,4	59,5
70,0	44,1	58,7	56,1	66,3
80,0	48,6	65,1	61,0	72,3
90,0	52,6	71,1	65,2	77,4
100,0	56,2	76,6	68,6	81,7
110,0	59,4	81,7	71,2	85,2
120,0	62,2	86,4	73,1	87,9

Fonte: A Autora (2019).

Destaca-se ainda que a correção para Serrinha foi aplicada para região entre as estações de Serrinha e Serra Talhada para valores de precipitação acima de 20 mm/dia. Já a correção de Floresta aplicada para valores acima de 50 mm/dia de precipitação, ocorreram para a região entre as estações de Serrinha e Floresta. Para a região da Foz, próximo a estação pluviométrica de Ilha Grade, não foi aplicada correções, pelo fato de não existirem estações pluviométricas nesta região. Alguns valores corrigidos estão apresentados na Tabela 6.

3.3.2 Criação da versão SWIM Pajeú

O modelo SWIM precisou passar por alguns ajustes para ser aplicado na bacia do rio Pajeú, fato que se deve ao modelo ter sido desenvolvido para uso na Europa em áreas temperadas como descrito por Krysanova et al., (2000), regiões que demandam padronização do modelo diferente dos necessários para áreas semiáridas.

Corroborando com este pensamento, Koch et al., (2018a) afirmam que para aplicação do modelo SWIM no hemisfério sul foram necessárias várias adaptações, por exemplo, alterações na dinâmica da vegetação. Além disso, os esquemas de rotação de culturas foram ajustados para duas a quatro colheitas por ano. Dados sobre os cultivos a nível municipal do IBGE (2013) foram aplicados para obter as rotações de culturas para diferentes regiões da bacia hidrográfica.

Cirilo, (2007) reforça que as regiões semiáridas apresentam algumas características próprias que requerem mudanças de formulação dos modelos. O autor cita como exemplo a ocorrência de solos cristalinos, típicos da região, que apresentam respostas ao escoamento completamente diferentes dos demais tipos de solo.

Para calcular o balanço hídrico da bacia do rio Pajeú foram necessários algumas modificações nos arquivos padrão do modelo, a exemplos dos arquivos “crop.dat” e “landman.csv”. No arquivo “crop.dat” há informações para a vegetação natural (árvores, grama etc.) e as culturas agrícolas (trigo, milho, banana etc.), índice de área foliar mínimo e máximo durante o ciclo de crescimento, temperatura base e temperatura ótima para o crescimento. No arquivos “landman.csv” há informações sobre dados de plantio e colheita das culturas (“rotação das culturas”).

Na versão original do modelo existiam 71 tipos de culturas diferentes no arquivo “crop.dat”. Para a utilização do SWIM em regiões semiáridas do Brasil foram necessárias incluir mais 18 tipos de culturas típicas da região, dentre elas o bioma Caatinga e plantio de coco e banana, descritos no apêndice II. Após esta adaptação no modelo, foi possível utilizar

os ajustes dos parâmetros com mais proximidade da realidade da região. Outra adaptação no modelo original foi a inclusão dos módulos de reservatório e alocação da água, descritos a seguir.

3.3.2.1 Cálculo do balanço hídrico no modelo SWIM

Os processos hidrológicos no SWIM são baseados na Equação 7 do balanço hídrico:

$$SW(t + 1) = SW(t) + PRECIP - Q - ET - PERC - SSF \quad (7)$$

Onde: $SW(t)$ é a umidade do solo no dia t , $PRECIP$ é a precipitação, Q refere-se ao escoamento superficial, ET é a evapotranspiração, $PERC$ é a percolação e SSF é o escoamento subsuperficial. Todos apresentam valores diários em mm.

O modelo considera as quantidades diárias de precipitação como entrada e simula os volumes de escoamento superficial e taxas de pico de escoamento. O volume de escoamento é estimado usando uma modificação da técnica do número da curva do Serviço de Conservação do Solo (SCS). A técnica foi selecionada para uso no SWIM devido ser confiável e ter sido usado por muitos anos nos Estados Unidos e no mundo todo, os dados necessários estão geralmente disponíveis, relaciona escoamento ao tipo de solo, uso da terra e práticas de manejo, e é computacionalmente eficiente.

O escoamento superficial (Equação 8) é estimado a partir da precipitação diária, levando em conta um coeficiente de retenção dinâmica SMX e aplicando a equação do número da curva SCS.

$$Q = \frac{(PRECIP - 0,2.SMX)^2}{(PRECIP + 0,8.SMX)}, \quad PRECIP > 0,2 SMX$$

$$Q = 0 \quad PRECIP \leq 0,2 SMX \quad (8)$$

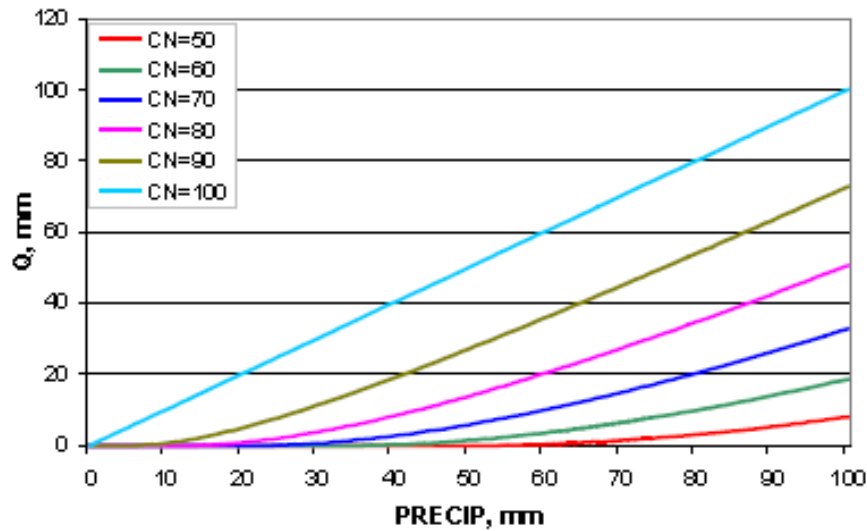
Onde: Q é o escoamento diário em mm, $PRECIP$ é a precipitação diária em mm, e SMX é um coeficiente de retenção que varia espacialmente e temporalmente, devido a variação espacial dos solos, uso e manejo da terra, e a inclinação. A variação temporal depende do clima e do período. O coeficiente de retenção SMX (equação 9) está relacionado com o número da curva (CN) pela equação SCS.

$$SMX = 254. \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (9)$$

Onde: SMX é o coeficiente de retenção e CN é o número da curva.

Para ilustrar a abordagem, a Figura 15 mostra a estimativa do escoamento superficial Q de precipitação com as equações 8 e 9, assumindo diferentes valores de CN.

Figura 15 - Estimativa do escoamento superficial, Q, da precipitação diária, PRECIP, para diferentes valores de CN.



Fonte: Krysanova et al., (2000).

O parâmetro CN é definido em três variações: para a condição de umidade 1 (ou condições secas) como CN1; para a condição de umidade 2 (ou condições médias) como CN2 e para condições de umidade 3 (ou condições húmidas) como CN3.

Os parâmetros CN1, CN2 e CN3 podem ser obtidos no manual de hidrologia SCS da USDA-SCS (1972) para um conjunto de tipos de uso da terra, grupos de solos hidrológicos e práticas de manejo.

Para fins computacionais de programação, o CN1 e CN3 foram relacionados ao CN2 como apresentado nas Equações 10, 11 e 12 e na Figura 16.

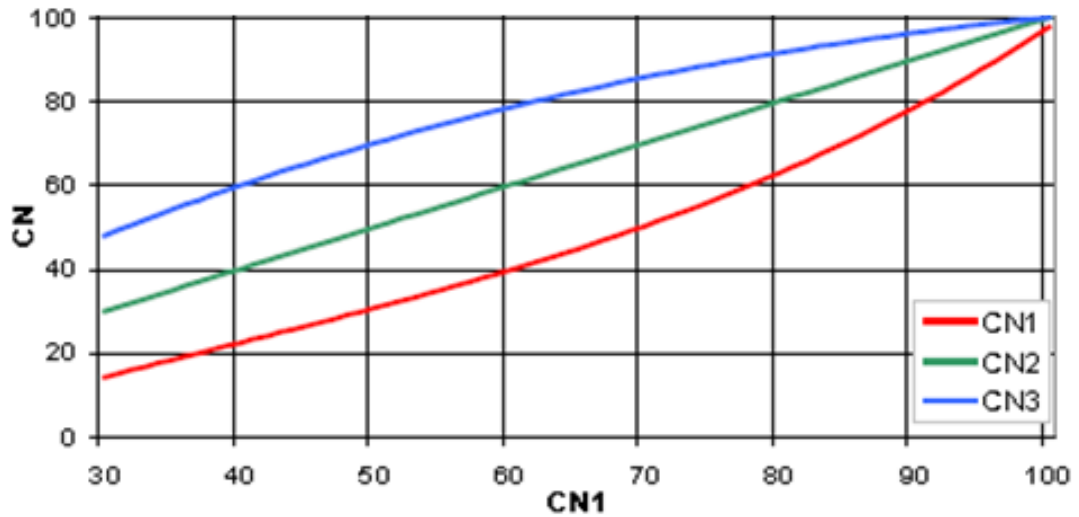
$$CN_1 = CN_2 - \frac{20. (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636. (100 - CN_2)]} \quad (10)$$

Uma aproximação da Equação 9:

$$CN_1 = -16,911 + 1,3481. CN_2 - 0,013793. CN_2^2 + 0,00011772. CN_2^3 \quad (11)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (12)$$

Figura 16 - Correspondência entre CN1, CN2 e CN3.



Fonte: Krysanova *et al.* (2000).

No modelo SWIM a taxa de pico de escoamento é estimada para sub-bacias usando a equação 13 (ARNOLD *et al.*, 1994). Um elemento estocástico está incluído na fórmula racional para permitir uma simulação mais realista das taxas de pico de escoamento, dadas apenas precipitação pluviométrica diária e a intensidade de chuva mensal. A fórmula racional pode ser escrita como apresentado na equação 13:

$$PEAKQ = \frac{RUNC \cdot RI \cdot A}{360} \quad (13)$$

Onde: PEAKQ é a taxa de pico de escoamento em m³/s, RUNC é um coeficiente de escoamento expressando as características de infiltração da bacia, o RI é a intensidade da chuva em mm/h para o tempo de concentração da bacia hidrográfica, e A é a área de drenagem em ha.

O coeficiente de escoamento pode ser calculado para cada dia a partir das quantidades de precipitação e escoamento da forma indicada na equação 14:

$$RUNC = \frac{Q}{PRECIP} \quad (14)$$

Como a precipitação diária é entrada e Q é calculado com a equação 8, RUNC pode ser estimado diretamente. A intensidade da chuva pode ser expressa como mostra a Equação 15:

$$RI = \frac{PRECIP_{tc}}{TC} \quad (15)$$

Onde: TC é o tempo de concentração da bacia hidrográfica em h e $PRECIP_{tc}$ é a quantidade de precipitação em mm durante o tempo de concentração.

O valor de $PRECIP_{tc}$ pode ser estimado desenvolvendo uma relação com o total diário PRECIP. Geralmente, $PRECIP_{tc}$ e $PRECIP_{24}$ (duração de 24 horas é apropriada para o modelo com dados diários) são proporcionais para várias frequências.

Assim, um parâmetro adimensional que expressa a proporção de precipitação total diária que ocorre durante o tempo de concentração pode ser introduzido aplicando a Equação 16:

$$PRECIP_{tc} = \alpha \cdot PRECIP_{24} \quad (16)$$

A Equação 17 para a taxa de pico de escoamento é obtida substituindo as equações 14, 15 e 16 na Equação 13:

$$PEAKQ = \frac{\alpha \cdot Q \cdot A}{360 \cdot TC} \quad (17)$$

O tempo de concentração pode ser estimado adicionando os tempos de fluxo da superfície e do canal, pela Equação 18:

$$TC = TC_{ch} + TC_{ov} \quad (18)$$

Onde: TC_{ch} é o tempo de concentração para o fluxo de canal em h e TC_{ov} é o tempo de concentração para o escoamento superficial em h.

Uma técnica de variação de armazenamento (ARNOLD et al., 1990) é usada no SWIM para simular a percolação através de cada camada de solo. A percolação é a transferência de água do solo para o reservatório de água subterrânea. Ocorre quando a quantidade

de água excede a capacidade de campo de uma camada do solo e a camada imediatamente inferior não está saturada (SANTOS, 2015).

A percolação da camada inferior do solo é tratada como recarga para o aquífero raso. A técnica de variação de armazenamento é baseada na Equação 19:

$$SW(t + 1) = SW(t) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (19)$$

Sendo, $SW(t + 1)$ e $SW(t)$ são os teores de água no solo no início e no final do dia em mm, Δt é o intervalo de tempo (24 h) e TT_i é o tempo de viagem através da camada i em h. Então, a percolação pode ser calculada subtraindo SW_t de SW_{t+1} (Equação 20):

$$PERC_i = SW_i \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (20)$$

Onde: PERC é a taxa de percolação em mm/d. O tempo de viagem TT_i é calculado para cada camada de solo com a Equação 21 de armazenamento linear:

$$TT_i = \frac{SW_i - FC_i}{HC_i} \quad (21)$$

Sendo HC_i é a condutividade hidráulica em mm/h e FC é a capacidade de campo de teor de água para a camada i em mm. A condutividade hidráulica varia de acordo com o valor de condutividade saturada até próximo de zero na capacidade de campo (Equação 22).

$$HC_i = SC_i \cdot \left(\frac{SW_i}{UL_i}\right)^{\beta_i} \quad (22)$$

Onde: SC_i é a condutividade saturada para a camada i em mm/h, UL_i é o conteúdo de água no solo em saturação em mm/mm e β_i é um parâmetro de forma que faz com que o HC_i se aproxime de zero SW_i se aproxima do FC_i . A Equação 23 é descrita para estimar β :

$$\beta_i = \frac{-2,655}{\log_{10}\left(\frac{FC_i}{UL_i}\right)} \quad (23)$$

O escoamento subsuperficial é calculado através de um modelo de armazenamento cinético, desenvolvido por Sloan et al. (1983), e que baseia-se na equação de continuidade de massa (Equação 24):

$$SSF = 0.024 \cdot \frac{2 \cdot SUP \cdot SC \cdot \sin(v)}{PORD \cdot SL} \quad (24)$$

Onde: SSF é o fluxo lateral abaixo da superfície em m³/h, SUP é o volume drenável de água armazenada na zona saturada m/m (água acima da capacidade de campo), SC é a condutividade saturada em mm/h, v é a inclinação da encosta em m/m, PORD é a porosidade drenável do solo em m/m e SL é o comprimento da encosta em m.

Segundo Viana (2019), em áreas que os solos apresentem condutividade hidráulica elevada nas camadas superficiais e camadas impermeáveis em profundidades rasas o fluxo lateral poderá ser significativo. Nestes sistemas, a precipitação irá percolar verticalmente até atingir a camada impermeável. A água poderá se acumular acima dessa camada originando uma zona saturada que será a fonte para o fluxo lateral subsuperficial, que poderá contribuir para a vazão dos rios.

3.3.2.2 Escolha do método para o cálculo de evapotranspiração no modelo SWIM

No modelo SWIM a evapotranspiração potencial de referência foi calculada pelo método de Turc-Ivanov modificado. O método de Turc (1961) foi originalmente desenvolvido para o norte da África, mas, pesquisas realizadas na parte oriental da Alemanha encontraram bons desempenhos deste método para a região, porém, com necessidade de correções (DVWK 1996). O método de Turc foi modificado, acrescentando uma abordagem de Ivanov, (1954) para temperaturas inferiores a 5 °C, e aplicado na região Oriental da Alemanha por Richter (1984) e Wendling e Schellin (1986). O método modificado foi utilizado nesta pesquisa adotando a fórmula descrita na Equação 25, aplicada em regiões com temperaturas maiores que 5°C.

$$ET_o = 0,0031 \cdot \Omega \cdot (R + 209,4) \cdot \left(\frac{T}{T + 15} \right) \cdot c \cdot e_{cal} \quad (25)$$

A Equação 25 combinada estima a evapotranspiração de referência diária ETo em mm, utilizando: a temperatura média T em $^{\circ}C$, a radiação solar R em $J.cm^{-2}$, c é o fator específico de uso da terra que varia de 0,9 para terras cultiváveis a 1,3 para superfícies de água (ATV-DVWK, 2002). Para a calibração do modelo utilizou-se o fator $c = 1,0$ referente à pastagem. E Ω é o fator adimensional mensal criado para a Alemanha. Além dos fatores descritos no método de Turc-Ivanov modificado, o modelo SWIM acrescenta um fator de calibração chamado de ecal.

Adotou-se para os valores de $\Omega = 1$, o que demandou uma alteração no arquivo fonte do modelo, visto que este fator não é um dado de entrada do modelo e faz parte do programa fonte. No modelo SWIM este fator inicialmente estava variando entre 0,7 em dezembro e janeiro e 1,25 para maio, conforme Tabela 7, calibrado para a região da Alemanha onde o método de Turc-Ivanov modificado foi desenvolvido, como relatam Conradt et al., (2013).

Tabela 7 – Valores mensais do fator Ω para Alemanha.

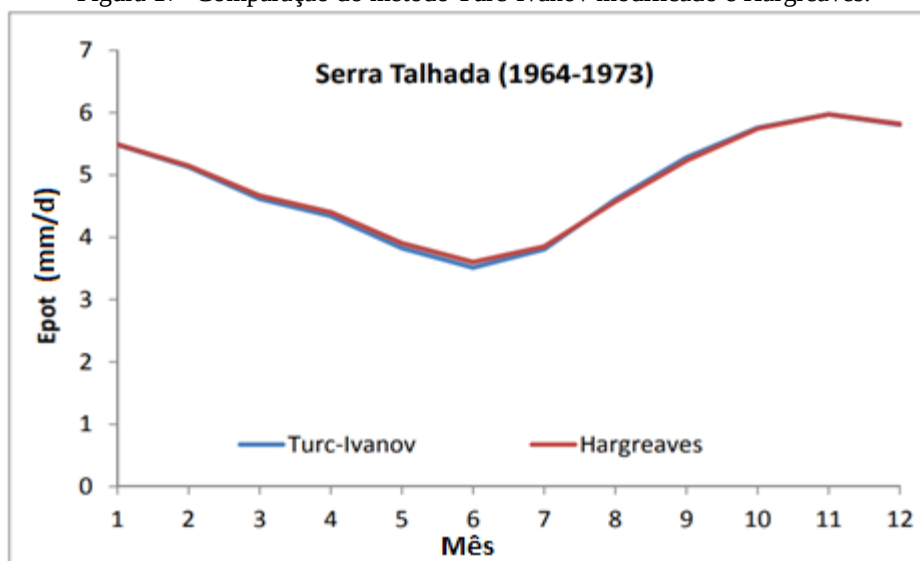
Mês	Valor de Ω	Mês	Valor de Ω
Janeiro	0,70	Julho	1,05
Fevereiro	0,85	Agosto	0,95
Março	0,95	Setembro	0,90
Abril	1,05	Outubro	0,80
Maio	1,25	Novembro	0,75
Junho	1,15	Dezembro	0,70

Fonte: Adaptado do modelo SWIM (KRYSANOVA et al. 2000)

Após o ajuste no modelo, foi possível utilizar $\Omega = 1,0$ para todos os meses, conforme proposto por Pellicciotti, (2012), que considera este fator igual a 1,0 para regiões onde a umidade relativa do ar é maior que 50 %. Como a região onde a pesquisa foi realizada apresenta umidades próximas de 50% este procedimento pôde ser adotado.

A escolha do método se deve ao fato do mesmo ter apresentado bons resultados em pesquisas realizadas por Silva (2014) e Koch et al., (2018a), o mesmo pode ser observado quando comparado com Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1985), este último, bastante utilizado para regiões semiáridas. A Figura 17 apresenta a comparação dos resultados da evapotranspiração de referência para a Estação de Serra Talhada (1964 a 1973) utilizando os dois métodos.

Figura 17- Comparação do método Turc-Ivanov modificado e Hargreaves.

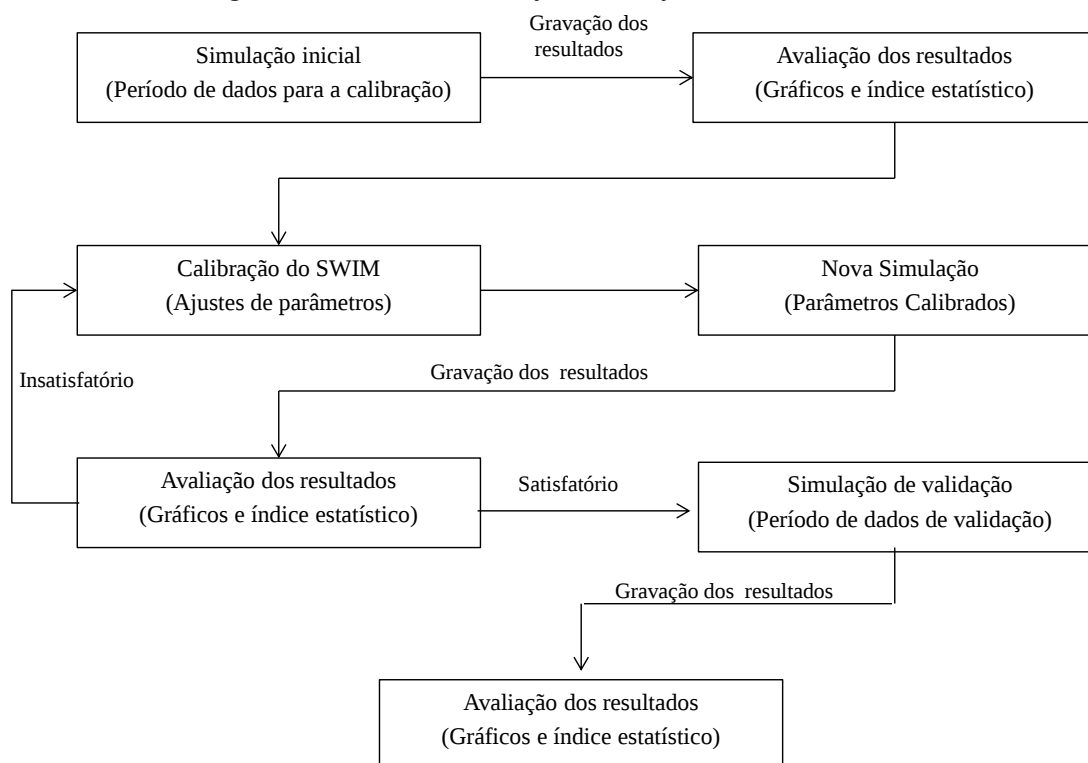


Fonte: A Autora (2019).

3.3.3 Calibração e validação do modelo SWIM

A metodologia aplicada nas etapas de calibração e validação do modelo foi executada conforme sequência ilustrada na Figura 18.

Figura 18- Processo de calibração e validação do modelo SWIM.



Fonte: A Autora (2019).

A etapa de calibração e validação para a bacia do rio Pajeú foi realizada para o período de 1964 a 1982, estes anos foram escolhidos por se tratar de um período anterior a construção dos grandes reservatórios da bacia hidrográfica, o que possibilita analisar o comportamento do modelo para a vazão natural, sem grandes influências dos reservatórios.

No processo de calibração e validação do modelo, os resultados de vazão simulados são comparados às respectivas vazões históricas das estações hidrológicas da ANA, descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração e validação do modelo

Sub-bacia	Nome	Código Estação ANA
96	Afogados da Ingazeira	48820000
65	Flores	48830000
60	Serra Talhada	48840000
35	Serrinha	48850000
10	Ilha Grande	48880000
7	Floresta	48860000

Fonte: A Autora (2019).

No modelo SWIM existe a possibilidade de monitorar as simulações por sub-regiões de interesse durante a modelagem, para isso é necessário colocar “1” no parâmetro “subctach” localizado no arquivo “pajeu.bsn”.

Para melhorar a calibração, principalmente da água superficial, são utilizados alguns parâmetros (descritos no Apêndice V) presentes nos arquivos “subcatch.bsn” e “subcatch.GW” (Figuras 19 e 20). Os parâmetros “ecal” e “thc” referem-se a ajustes na evapotranspiração, o “ecal” geralmente varia de 0,7 a 1,3, já o “thc” geralmente é utilizado quando os valores de “ecal” já estão muito elevados. O parâmetro “sccor” é um fator de correção para condutividade (aplicado em todos os solos), este geralmente varia de 1 a 20.

Figura 19 - Tela do modelo SWIM com parâmetros de calibração do arquivo “subcatch.bsn”

subcatch	ecal	thc	roc2	roc4	cncor	sccor	mgt_id	tlrch	evrch	NAME
1	1.1	1.0	1.1	1.3	0.95	5.0	1	5.0	2.0	# Rio Pajeu I
2	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	4.0	1	1.0	1.0	# Rio Pajeu II
3	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# Rio Pajeu III
4	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rio Pajeu jusante rsv. Serrinha
5	1.1	1.0	1.1	1.3	1.0	4.0	1	1.0	1.0	# Rio Pajeu, parte norte
6	1.1	1.0	1.1	1.3	0.95	5.0	1	5.0	2.0	# rch. Barro Branco
7	1.1	1.0	1.1	1.3	0.95	5.0	1	5.0	2.0	# rch. da Volta
8	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	5.0	1	5.0	2.0	# rch. da Carnaubeira
9	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	18.0	1	5.0	2.0	# rch. do Navio I
10	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rch. do Navio II
11	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rch. Ipugiras
12	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rch. Sao Christovao
13	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rchs. dos Picos e da Posse
14	1.0	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rchs. Luanda, Saco e Belem
15	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	2.0	1	5.0	2.0	# rchs. Sao Domingos e Poco do Negro
16	1.0	1.0	1.2	2.0	1.0	1.0	1	1.0	1.0	# reservatorios

Fonte: Adaptado do modelo SWIM (KRYSANNOVA et al. 2000).

Figura 20 - Tela do modelo SWIM com parâmetros de calibração do arquivo “subcatch.GW”

subcatch	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# Rio Pajeu I
1	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# Rio Pajeu II
2	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# Rio Pajeu III
3	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rio Pajeu jusante rsv. Serrinha
4	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# Rio Pajeu, parte norte
5	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. Barro Branco
6	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. da Volta
7	0.5	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. da Carnaubeira
8	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. do Navio I
9	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. do Navio II
10	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. Ipugiras
11	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rch. Sao Christovao
12	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rchs. dos Picos e da Posse
13	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rchs. Luanda, Saco e Belem
14	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# rchs. Sao Domingos e Poco do Negro
15	0.4	1.0	0.1	0.001	0.003	2.	0.3	0.2	0.1	# reservatorios
16	0.5	1.0	0.1	0.002	0.003	2.	0.0	0.0	0.0	

Fonte: Adaptado do modelo SWIM (KRYSA NOVA et al. 2000).

Os parâmetros roc2 e roc4 referem-se respectivamente ao coeficiente para calcular a constante de tempo de armazenamento para o fluxo superficial e o fluxo subsuperficial. Ambos variam geralmente entre 1 a 20.

Outro parâmetro importante é o “bff”, este refere-se ao fator de fluxo de base para a bacia, e é usado para calcular o tempo de retorno do fluxo. Este tempo é então usado para calcular a percolação de uma camada para outra do solo. O fator “bff” é apresentado na Tabela 9 para diferentes fluxos. Quanto menor o valor deste fator mais lento é o fluxo de base. Este fator está descrito no arquivo “subcatch.wg”, que possui parâmetros destinados principalmente para a calibração da água subterrânea.

Tabela 9 - Valores de “bff” em relação ao fluxo.

Características do fluxo	Bff
Fluxos perenes, fluxo > 75% do tempo	1,00
Fluxo 55-75% do tempo	0,75
Fluxo 40-55% do tempo	0,50
Fluxo 20-40% do tempo	0,25
Fluxos efêmeros	0,0

Fonte: A Autora (2019).

A qualidade dos resultados da calibração e da validação do modelo foram avaliados analisando os gráficos, média de longo termo e índices estatísticos de NSE, PBIAS, RSR E R^2 , estes descritos no item 3.3.4.

3.3.4 Desempenho do modelo

Para julgar a exatidão e a precisão dos resultados, foram aplicados os índices estatísticos BIAS, PBIAS, NSE, RSR e R^2 .

Um dos métodos utilizados para calcular a tendência dos resultados foi o método de BIAS, este é a média das diferenças entre o valor convencional ou de referência (Q_i^{obs}) e as medidas obtidas (Q_i^{sim}) de uma grandeza, nas mesmas condições (Equação 26).

$$BIAS = \left(\sum_i^n Q_i^{sim} - Q_i^{obs} \right) \div n \quad (26)$$

Outro método aplicado foi o percent bias (PBIAS) que avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados (Equação 27). O valor ideal do PBIAS é 0 (zero), valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \times 100 \quad (27)$$

Para avaliar o grau de ajuste do modelo empregou-se o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970), calculado a partir da equação 28:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_s)^2} \quad (28)$$

Onde: Q_m é a vazão observada, Q_s é a vazão simulada pelo modelo, $\bar{Q}_s$ é a média da vazão observada para o período de simulação, e n é o número de dias.

Outra análise estatística utilizada foi o erro padrão médio normalizado (RSR) (Equação 29), um índice que varia de 0 a grandes valores positivo e quanto menor seu valor, melhor será o ajuste do modelo (JUNQUEIRA et al., 2018).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_{m,i})^2}} \quad (29)$$

Onde: n é o número de eventos, Q_m é o evento observado, Q_s é o evento simulado pelo modelo e $\bar{Q}_{m,i}$ é a média do evento observado no período simulado.

A qualidade dos resultados estatísticos das simulações foram avaliados aplicando a classificação de desempenho descrita na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificações gerais de desempenho estatístico

Classificação	NSE	PBIAS (%)	RSR	R ²
Muito bom	0,75 < NSE < 1,00	PBIAS < ± 10	0,00 < RSR < 0,50	0,75 < R ² < 1,00
Bom	0,65 < NSE < 0,75	±10 < PBIAS < ±15	0,50 < RSR < 0,60	0,65 < R ² < 0,75
Satisfatório	0,50 < NSE < 0,65	±15 < PBIAS < ±25	0,60 < RSR < 0,70	0,50 < R ² < 0,65
Insatisfatório	NSE < 0,50	PBIAS > ± 25	RSR > 0,70	R ² < 0,50

Fonte : Adaptado de Moriasi et al., (2007)

3.4 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISES DE INCERTEZAS

Após a calibração e validação do modelo foram construídos cenários variando as fontes de dados de entrada com o intuito de analisar as incertezas nos dados de entrada e seus efeitos na modelagem. Esta análise é a avaliação do quão a resposta de um modelo é influenciada por seus dados de entrada. Por meio dela, é indicado se a resposta do modelo é pouco ou muito influenciada pelos valores dos dados de uma determinada variável, ou coeficiente (PEREIRA, 2016).

Cabral et al., (2017) afirmam que a incerteza na modelagem surge devido às informações incompletas usadas na simulação que estão na estrutura do programa de modelagem, nos parâmetros e nos dados de entrada. Por isso, analisar as incertezas é importante para que os modelos representem mais acuradamente à realidade.

Para esta etapa foram construídos cinco cenários utilizando três fontes de dados de uso da terra diferentes e três arquivos de dados climáticos, descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Fonte de dados para criação dos cenários

Dados	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Uso da Terra	MapBiomas 85	MapBiomas 85	MapBiomas 85	Modis 2010	IBGE 2015
Tipo de Solo	Embrapa	Embrapa	Embrapa	Embrapa	Embrapa
Dados Climáticos	WATCH ERA40	Observados	Ajuste WATCH ERA40	Ajuste WATCH ERA40	Ajuste WATCH ERA40

Fonte: A Autora (2019).

A análise de incertezas foi realizada comparando os resultados estatísticos das simulações de cada cenário com os dados observados das estações, descritas na Tabela 8, por meio da classificação de desempenho descrita na Tabela 10.

Para analisar as incertezas dos dados climáticos foram comparados os resultados dos cenários: 1, 2 e 3. Uma segunda análise buscou analisar as incertezas dos dados de uso da

terra, comparando os dados dos cenários: 3, 4 e 5, gerados a partir de diferentes fontes de dados de uso da terra de diferentes anos.

3.5 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS COM RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO DA ÁGUA

Na elaboração destes cenários foram utilizados os módulos: reservatório e alocação da água. Para incluir estes módulos, destaca-se a importância de ajuste dos parâmetros “bResmodule” e “wam_bTransfer” (wam = módulo de alocação da água), responsável pela inclusão ou retirada dos reservatórios e da alocação de água da modelagem. Estes parâmetros se localizam no arquivo “pajeu.bsn”, que inclui parâmetros gerais da bacia e alguns parâmetros de calibração (Figura 21).

Figura 21 – Tela do modelo SWIM com parâmetros referentes aos sub-regiões, reservatórios e a alocação de água.

SWITCH PARAMETERS		
0	isc	=0/1 SC: read/calc
0	icn	=0/1 CN: dif for soils/cnum1,cnum3 for all
0	idlef	=0/1 day length effect in crop: without/with
1	intercep	=0/1 INTERCEPTION: WITHOUT/WITH
1	iemeth	=0/1 EVAPORATION: Priestley-Taylor/Turc-Ivanov
0	idvbk	=0/1 EVAPORATION CALCULUS: DVWK-Merkblatt 238
1	nat_veg	=0/1 module for natural vegetation off/on
1	subCatch	=0/1 all subs same parameters/individual parameterization
0	bIndModule	=0/1 inundation module off /inundation module on
1	bResModule	=0/1 reservoir module off / reservoir module on
1	wam_bTransfer	= 0/1 water transfer off / on
0	wam_bIrrigation	= 0/1 irrigation off / on
0	harg_evap	=0/1 calculate radiation after Hargreaves from Tmin/Tmax and latitude (0=OFF/1=ON)
-1.0	dorm_hr	if < 0, then dormhr is calculated based on latitude

Fonte: Adaptado do modelo SWIM (KRYSAKOVA et al. 2000).

Para rodar o módulo-reservatório é necessário que a etapa de calibração e validação do modelo SWIM apresente bons resultados. Além disso, a saída do reservatório deve estar localizada na mesma posição da saída de uma sub-bacia do SWIM. O ideal é que a área do lago do reservatório represente uma sub-bacia. Após a simulação do reservatório, o fluxo de saída é encaminhado para a sub-bacia a jusante.

Para todos os reservatórios, os dados relevantes devem ser fornecidos em pelo menos três arquivos: "reservoir.ctrl", "reservoir_storage_conf.csv" e "reservoir_monthly.csv" descritos no apêndice IV.

O módulo de alocação da água requer a construção do arquivo “wam_transfer.ctrl” e um arquivo “trans000x.ts” para cada usuário. Nesta pesquisa foram considerados 20 usuários outorgados para construção dos cenários 6 e 7, e 54 demandas para preparação do cenário 8. Todos os dados de alocação da água estão descritos no Apêndice III.

Nos cálculos dos fluxos de retorno do consumo de água são aplicados coeficientes de acordo com o uso da água, por exemplo, irrigação 0,2, abastecimento de água rural 0,5, água urbana fornecimento e uso industrial 0,8 (ONS, 2005).

Foram construídos três cenários (6 a 8) utilizando os dados de uso da terra do Mapbiomas 85 e arquivos de dados climáticos “WATCH ERA40 ajustado” e observados, incluindo os reservatórios descritos na Tabela 13 e os usuários cadastrados na ANA e na APAC, apresentados no Apêndice III. Os cenários estão descritos na Tabela 12. O objetivo da criação destes cenários foi avaliar a influência das diferentes fontes de dados climáticos na modelagem com reservatórios, comparando os cenários: 6 e 7; e analisar os efeitos da inclusão dos reservatórios e alocação da água no balanço hídrico da bacia comparando um cenário com dados de usuários outorgados (cenário 7) com dados de demandas da água (cenário 8).

Tabela 12 – Fonte de dados para criação dos cenários com reservatórios e alocação da água.

Dados	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Uso da Terra	Mapbiomas85	Mapbiomas85	Mapbiomas85
Tipo de Solo	Embrapa	Embrapa	Embrapa
Dados Climáticos	WATCH ERA40 ajustado	Observados	Observados
Reservatórios	Reservatórios	Reservatórios	Reservatórios
Alocação da água	Usuários outorgados	Usuários outorgados	Demandas de água

Fonte: A Autora (2019).

Para analisar os resultados das simulações comparou-se os resultados dos volumes simulados em cada cenário com os dados dos volumes observados nos reservatórios, descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Açudes considerados na modelagem.

Sub-bacias	Nome
112	Açude Saco
113	Açude Serrinha
114	Açude Arrodeio
115	Açude Cachoeira
116	Açude Jazigo
117	Açude de Brotas
118	Açude São José II
119	Açude Rosário
120	Açude Barra do Juá

Fonte: A Autora (2019).

3.6 CENÁRIOS COM DADOS DOS MODELOS CLIMÁTICOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA

Para gerar os cenários de 1976 a 2005, período de referência, utilizou-se os cenários do Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project - ISI-MIP, adquiridos no Potsdam Institute for Climate Impact Research – PIK Potsdam. Estes são baseados nos resultados da simulação dos GCMs do projeto de intercomparação de modelos acoplados (CMIP5), HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M e NorESM1-M.

Os cenários 9, 10, 11, 12 e 13, foram criados respectivamente, a partir dos dados do GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM e NorESM1-M, descritos na Tabela 14.

Tabela 14 – Modelos utilizados na pesquisa.

Modelo	Descrição	Origem
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2	Estados Unidos
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre -Earth System Models	Reino Unido
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution	França
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão
NorESM1-M	Norwegian Climate Center's Earth System Model	Noruega

Fonte: A Autora (2019).

Em vez de usar o modelo climático regional para uma escala dinâmica descendente, os cenários ISI-MIP empregam método estatístico de redução de escala e correção de bias, garantindo a preservação das tendências de aquecimento. Inicialmente, as saídas dos GCMs foram bi-linearmente interpoladas em uma grade de meio grau (aproximadamente 50 x 50 Km) do conjunto de dados WATCH ERA40 e, em seguida, corrigidas pelo bias usando os dados do WATCH ERA40 como referência. Entre as variáveis corrigidas estão: radiação, umidade, velocidade dos ventos, temperatura e precipitação. Para a variável temperatura foi aplicada correção de bias aditivas, já para as demais variáveis foram aplicadas correções multiplicativas.

A correção de bias, da variável precipitação, foi realizada em duas etapas. Primeiramente, a variabilidade mensal e as médias das variáveis climáticas foram multiplicadas por um fator constante para corrigir as diferenças de longo prazo entre os dados médios mensais observados e simulados. Em seguida, a variabilidade diária dos dados em torno de suas médias mensais foi corrigida aplicando funções de transferência específicas de

células da grade para corresponder à variabilidade observada dos dados em torno de suas médias específicas. Uma descrição mais detalhada desse método de correção de bias e suas limitações podem ser encontradas em Hempel et al., (2013).

Durante a pesquisa de Hempel et al., (2013), foi necessário corrigir os valores de precipitação dos modelos climáticos. Métodos de correção de bias são projetados para preencher a lacuna entre as informações fornecidas pela comunidade de modelagem climática e os dados climáticos necessários para projeções quantitativas de impacto climático. Os métodos básicos de correção de bias incluem um ajuste do valor médio pela adição de deslocamento temporal constante, ou aplicando um fator de correção associado aos dados simulados. Esta constante aditiva ou multiplicativa quantifica o desvio médio entre as séries temporais simuladas e observadas ao longo do período histórico. Como a constante é independente do tempo, o método preserva a tendência (em termos absolutos para uma abordagem aditiva e em termos relativos para uma abordagem multiplicativa), ajustando simultaneamente o valor médio. No entanto, faz não necessariamente corrigir a variabilidade dos dados (BOE et al., 2007; PIANI et al., 2010; THEMEßL et al., 2011).

Os dados de precipitação, foram corrigidos, na pesquisa de Hempel et al., (2013), usando um fator de multiplicação definido pela Equação 30:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{m=40} P_i^{WFD}}{\sum_{i=1}^{m=40} P_i^{GCM}} \quad (30)$$

Onde: c é o fator de multiplicação, P_i^{WFD} é a precipitação do WATCH ERA40 e P_i^{GCM} é a precipitação do modelo global.

A série temporal da precipitação é então (Equação 31):

$$\tilde{P}_{ij}^{GCM} = c \cdot P_{ij}^{GCM} \quad (31)$$

De posse dos dados com a redução de escala e correção de bias conforme Hempel et al. (2013), os dados de precipitação dos Earth System Models – ESM, para o período de referência (1976 a 2005), foram comparados com os dados climáticos observados. Constatou-se que os eventos da precipitação dos modelos HadGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR eram muito maiores do que as precipitações observadas. Diante deste fato, usando os dados de precipitação observados, as funções polinomiais foram aplicadas para diferentes regiões

utilizando a Equação 32, método chamado de Bias Mapping. Estas funções foram aplicadas para o período de referência dos cenários climáticos, tanto para os dados do HadGEM2-ES quanto para os dados do IPSL-CM5A-LR.

$$P_{ESM} = ax^2 + bx + c \quad (32)$$

Onde P_{ESM} é o valor da precipitação do ESM, x é o valor da precipitação observada, a , b e c são as constantes que foram aplicadas para cada posto de observação como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores das constantes para o ajuste da precipitação dos ESM

Regiões	Valor de x	a	b	c
Afogados da Ingazeira	>10,0	-0,0040	1,080	-0,43
Flores	>5,5	-0,0040	1,050	-0,30
Serra Talhada	>20,0	-0,0047	1,080	-0,30
Serrinha	>20,0	-0,0032	1,070	-0,30
Floresta	>50,0	-0,0100	1,400	-1,00

Fonte: A Autora (2019).

O objetivo da geração destes cenários foi identificar a influência dos modelos de circulação global nas vazões naturais simuladas para o período de referência de 1976 a 2005, comparando os resultados com dos cenários: 9, 10, 11, 12 e 13.

3.7 PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

Para a geração dos cenários futuros, para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, foram utilizados dados provenientes do IPCC (2015), esses dados resultam de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa, que contribuem para a confecção do relatório do IPCC-AR5, a exemplo do HadGEM2-ES (Met Office Hadley Centre -Earth System Models) e do CESM (Community Earth System Model).

Visando o desenvolvimento de cenários do AR5, foram criados os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. De acordo com Silveira et al., (2016), os RCPs são nomeados a partir dos níveis das forçantes radiativas, assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$.

Segundo Virgílio, (2018), no AR5 existem quatro cenários: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, com efeitos crescentes. O RCP2.6, um cenário mais otimista, onde o aumento esperado da temperatura média terrestre é de 0,3°C a 1,7°C, entre 2010 e 2100. Já o RCP8.5, considerado o pior cenário, parte do pressuposto de que a sociedade não tomará nenhuma medida para lidar com o clima, e o aumento de temperatura poderia chegar em média a 4°C.

Neste trabalho foram usados os cenários RCP2.6 e RCP8.5, em consonância com as pesquisas de Yamagata et al., (2018), Sines et al., (2018) e Keuler et al., (2018), o cenário RCP 2.6, o mais otimista dos quatro, considerado que em algum momento as emissões de gases de efeito estufa são menores do que a absorção, e o aumento do nível do mar de 26 a 55 centímetros. Projeta-se que o sistema terrestre armazenará 2,6 W/m² adicionais com uma concentração de CO₂ em torno de 650 ppm.

O cenário RCP8.5, utilizado em pesquisas de Fix et al.,(2018), Tebaldi e Wehner, (2018) e Valverde et al., (2018), sugere um crescimento contínuo da população, associada a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono. Caracterizado pela ausência de mudanças políticas para reduzir as emissões e pela forte dependência de combustíveis fósseis, este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa.

Nesta etapa da pesquisa foram criados quatro cenários (cenários: 14, 15, 16 e 17) para projeção de cenários futuros (2021 a 2099), utilizando os GCMs HadGEM2-ES e MIROC-ESM-CHEM. O objetivo desta análise foi identificar os efeitos das possíveis alterações do clima no balanço hídrico da bacia, considerando um modelo mais chuvoso e um mais seco, tomando como base o período de referência de 1976 a 2005.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados da pesquisa, incluindo as etapas de análise e preenchimento de dados de entrada do modelo SWIM; calibração e validação do referido modelo; simulações dos diferentes cenários, incluindo cenários com a influência dos reservatórios e da retirada de água; e projeção de cenários futuros.

4.1 PREPARAÇÃO DO MODELO SWIM

Nesta etapa foram realizadas etapas de preparação dos dados necessários para executar o modelo SWIM, tais como preparação dos dados de entrada do modelo e adaptação do modelo.

4.1.1 Preparação de dados de entrada no modelo SWIM

Para configuração do modelo SWIM foi necessário elaborar arquivos de entrada em formato tabular, divididos em cinco categorias: arquivos para análise geral e calibração; dados climáticos e hidrológicos, de reservatórios e alocação da água preparados pelo usuário; dados do solo; arquivos criados pela interface SWIM / MapWindows e banco de dados de plantio e colheita das culturas. O Apêndice I descreve alguns desses arquivos.

4.1.1.1 Tratamento de dados espaciais para entrada no modelo SWIM

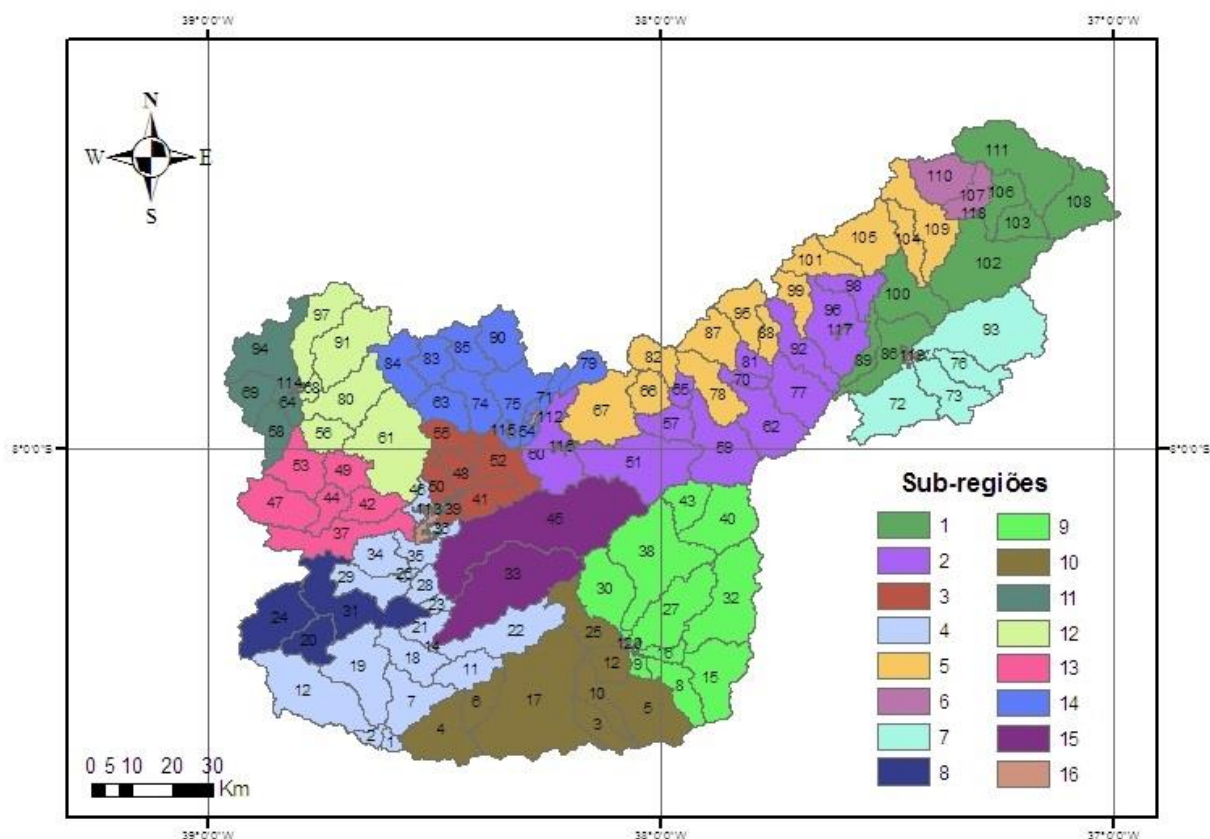
Alguns arquivos de entrada do modelo SWIM foram gerados utilizando os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), nesta pesquisa o SIG utilizado foi o MapWindow. Um desses arquivos é o mapa das sub-bacias, elaborados a partir do modelo numérico do terreno. Para a bacia do Pajeú foram geradas 120 sub-bacias, contemplando os nove principais açudes, quais sejam: Saco I, Serrinha II, Arrodeio, Cachoeira II, Jazigo, Brotas, São José II, Rosário e Barra de Juá.

Com o objetivo de auxiliar na análise dos dados gerados nas simulações as sub-bacias foram agrupadas em 16 sub-regiões que agregam sub-bacias com características semelhantes (Figura 22).

Na interface do modelo os dados das sub-bacias geradas no SIG são gravados no arquivo “file.cio” e na pasta “SUB” que contem três tipos de arquivo, com extensões diferentes, para cada sub-bacia, o primeiro com formato “pajeuNN.gw”, um segundo com

formato “pajeuNN.rte” e um terceiro “pajeuNN.sub”, onde NN é o número da sub-bacia, variando de 0 a 119. As sub-regiões de interesse selecionados estão listadas no arquivo “subcatch.def”, a descrição destes arquivos encontra-se no Apêndice I.

Figura 22 – Sub-bacias (120) e sub-regiões (16) da bacia do rio Pajeú.

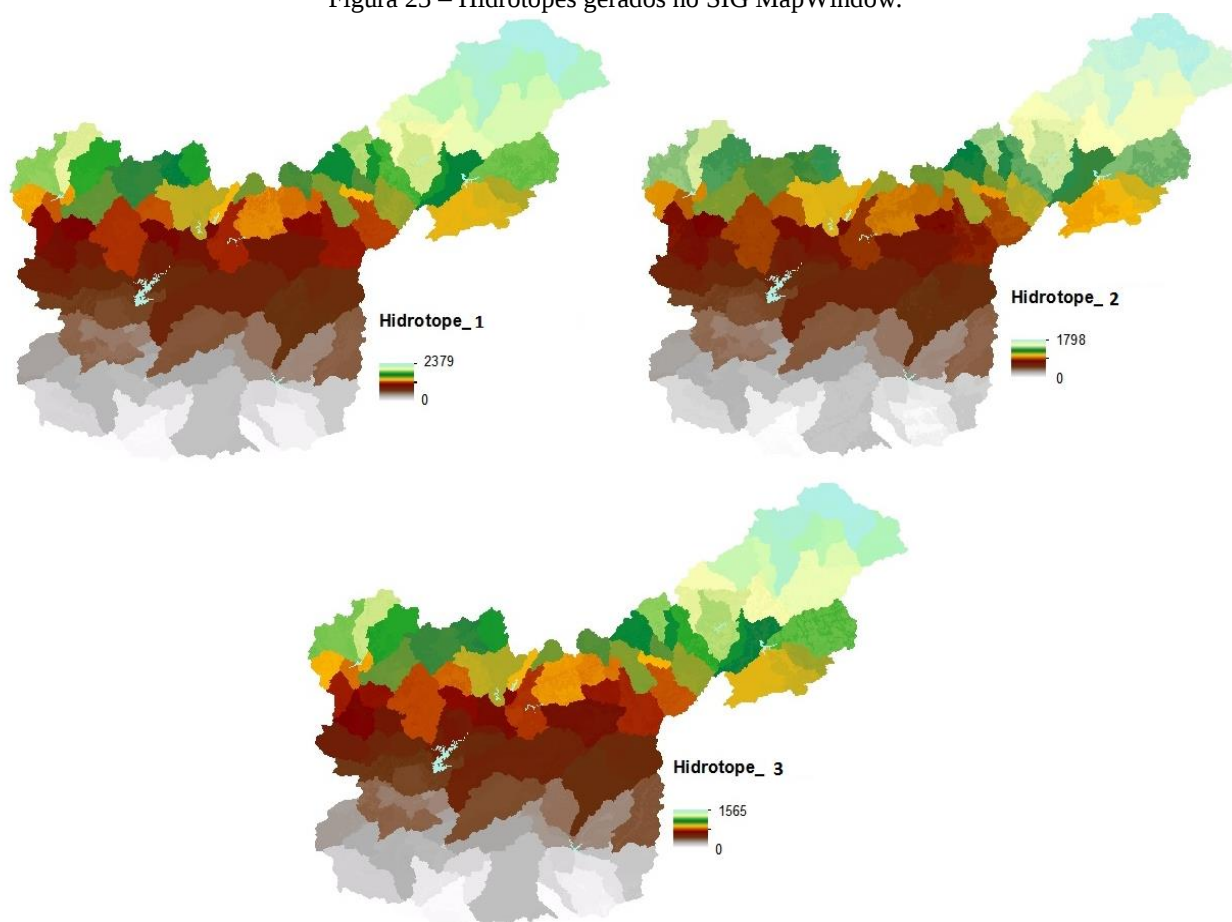


Fonte: A Autora (2019).

De posse do mapa de sub-bacias gerado foi possível elaborar no MapWindow o arquivo com os hidrotopes, que são gerados a partir da combinação do mapa de uso da terra, do mapa do solo e do mapa das sub-bacias.

Para elaboração dos cenários desta pesquisa foram gerados três arquivos de hidrotopes, o primeiro (hidrotope 1) considerando os dados de uso da terra do MapBiomas de 1985 e tipo de solo EMBRAPA com resolução de 100 x 100 m (2380 hidrotopes gerados), o segundo (hidrotope 2) com dados do MODIS de 2010 e com tipo de solo EMBRAPA com resolução de 500 x 500 m (1799 hidrotopes gerados), e o terceiro (hidrotope 3) considerando dados de uso da terra do IBGE de 2015 e tipo de solo EMBRAPA com resolução de 100 x 100 m (1566 hidrotopes gerados) (Figura 23).

Figura 23 – Hidrotopes gerados no SIG MapWindow.



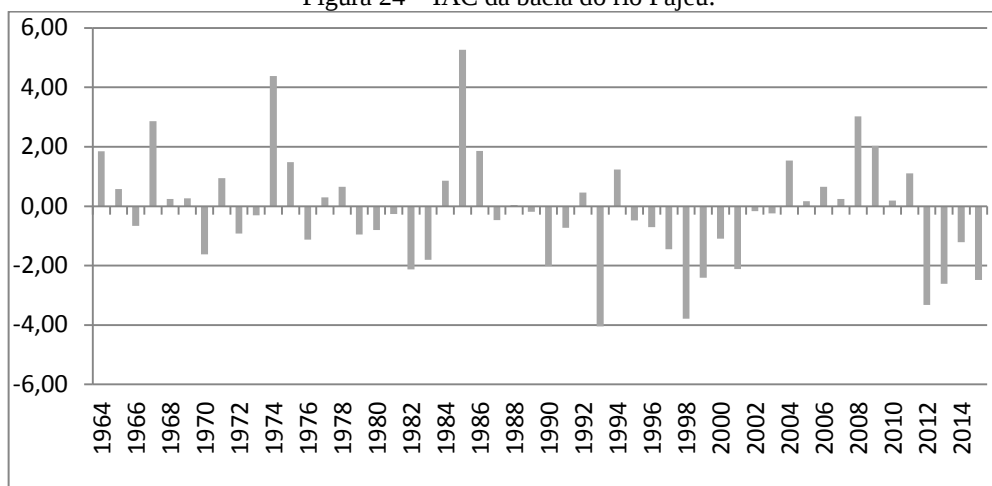
Fonte: A Autora (2019).

A geração de três arquivos de hidrotopes com fontes diferentes se justifica pela necessidade de analisar as incertezas dos dados de entrada do modelo, já que na literatura existem várias fontes com diferentes dados de uso da terra e tipo de solo.

Foram escolhidos dados de uso da terra de anos distintos quais sejam: 1985, 2010 e 2015, com fontes e resoluções espaciais diferentes. Estes anos, de acordo com os resultados do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) (Figura 24), representam um ano muito chuvoso (1985), um ano normal (2010) e um ano seco (2015). Possibilitando relacionar o uso da terra com as características climáticas adversas.

O monitoramento de períodos de seca ou períodos chuvosos é particularmente útil, uma vez que auxilia na gestão dos recursos hídricos, como abastecimento de água de grandes cidades e projetos de irrigação, por exemplo. Neste contexto Assis et al., (2015) destacam que o IAC é uma metodologia que vem sendo aplicada e difundida no Nordeste do país para caracterizar os períodos extremos (seco e chuvoso), assim como as diferentes intensidades desses eventos no tempo e no espaço.

Figura 24 – IAC da bacia do rio Pajeú.

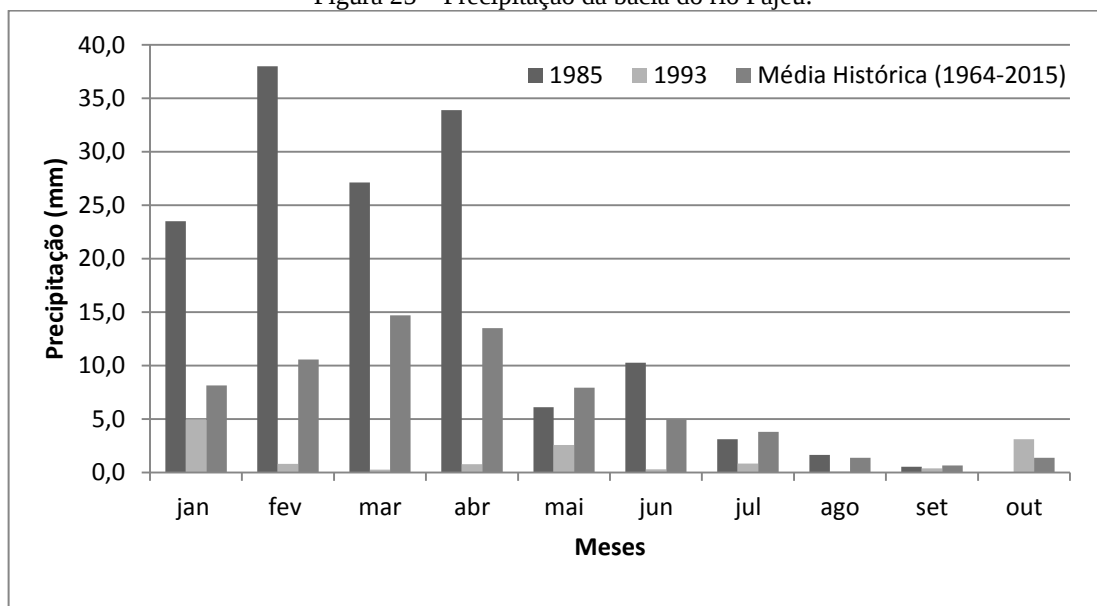


Fonte: A Autora (2019).

Pereira *et al.* (2017) afirmam que os anos de 1993, 1998 e 2012 apresentaram maior IAC negativos na bacia (Figura 24). Assis *et al.*, (2012) destacam que um dos motivos para esses anos serem considerados secos, foi à ocorrência do El Niño. Observa-se ainda uma maior frequência de anos secos a partir de 1998.

Os dados do IAC da bacia mostram que 1985 foi o ano mais chuvoso da série histórica (1964 a 2015) e 1993 foi o ano mais seco, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Precipitação da bacia do rio Pajeú.



Fonte: A Autora (2019).

Estas variações dos dados resultam em classificações diferentes para cada arquivo de hidrotopo e consequentemente mudanças no uso e cobertura da terra. Desta forma, os arquivos

gerados apresentam percentuais diferentes de tipos de uso da terra (Tabela 16), com crescimento forte da área agrícola e diminuição da área de pastagem comparando os resultados de 1985 e 2015.

Percebeu-se uma maior variação nas áreas de pastagem e agricultura. Sendo o hidrotope 1 com maior área destinada a pastagem (aproximadamente 21%) e o hidrotope 3 com maior área destinada a agricultura (aproximadamente 24%). Já o hidrotope 2 apresenta o maior percentual de área coberta com vegetação tipo caatinga (aproximadamente 89%).

Tabela 16 – Comparação dos tipos de uso da terra entre os hidrotopes

LU	Nome	Hidrotope 1	Hidrotope 2	Hidrotope 3
1	Água	0,60	0,25	0,37
2	Áreas urbanas	0,12	0,05	0,10
5	Agricultura	0,46	2,56	23,73
6	Campo desmatado	0,00	0,00	1,05
7	Prado	0,00	5,17	0,00
8	Pastagem	21,32	1,41	0,49
9	Floresta (misto)	0,00	0,26	0,00
11	Floresta (decídua)	1,27	1,24	0,15
14	Caatinga	75,73	89,07	72,92
15	Solo exposto	0,49	0,00	1,19

Fonte: A Autora (2019).

4.1.1.2 Geração de arquivos de dados alfanuméricos

Diferente dos arquivos citados anteriormente, alguns arquivos precisam ser gerados pelo usuário em formato tabular, dentre eles: dados climáticos (“clim1.dat” e “clim2.dat”), arquivos do módulo de reservatórios e do módulo de alocação da água.

Os arquivos “clim1.dat” e “clim2.dat” são gerados a partir dos dados climáticos. Nesta pesquisa foram gerados, inicialmente, duas versões dos arquivos climáticos distintos, a primeira com dados do WATCH ERA40 e a outra com os dados observados das estações de monitoramento. Ambos os arquivos possuem dados climáticos para cada sub-bacia, gerados aplicando o método de interpolação espacial como descrito na metodologia. Em um segundo momento, buscando melhorar a resposta das simulações, gerou-se uma versão com os dados do WATCH ERA40 ajustado conforme descrito na metodologia.

4.1.1.3 Análise de dados climáticos de entrada do modelo SWIM

Como apresentado no capítulo de metodologia, foram analisadas várias fontes de dados climáticos: dados observados, dados do WATCH ERA40 e do WATCH ERA-Interim.

Os dados observados apresentaram falhas e precisaram ser preenchidos conforme apresentado na metodologia. Os resultados deste procedimento estão descritos a seguir.

4.1.1.3.1 Preenchimento de falhas de dados climáticos observados

Finalizada a etapa de escolha das fontes de dados climáticos, iniciou a etapa de análise preliminar dos dados observados das estações climatológicas, uma vez que os dados do WATCH não apresentam falhas.

A etapa de análise preliminar dos dados observados identificou a existência de períodos inconsistentes ou sem observações nas séries históricas de dados diários observados das variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação utilizando o método de representação gráfica.

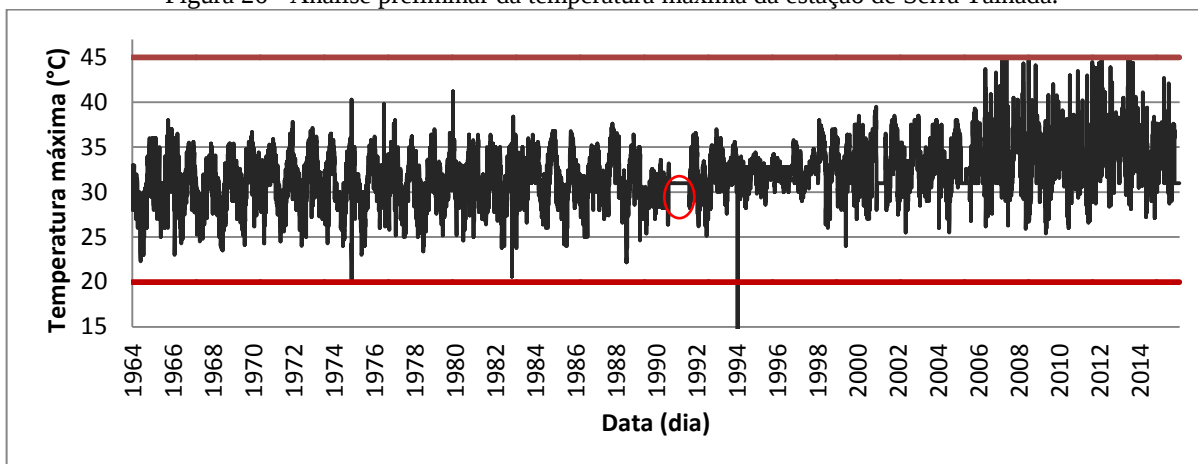
Este procedimento foi realizado nos dados de temperatura do ar máxima, média e mínima, umidade relativa do ar e precipitação para cada estação utilizada nesta pesquisa, quais sejam: Arcoverde, Ouricuri, Petrolina, Cabrobó, Monteiro, Barbalha, Água Branca, Serra Talhada, Triunfo, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Igaraci, Itapetim, São José do Egito, Tuparetama, Floresta, Ibimirim, Mirandiba, Flores e Belém do São Francisco. Sendo analisados um total de 100 séries no período de 1964 a 2015.

Observou-se o comportamento da temperatura para os valores diários máximos, mínimos e médios, o valor mínimo observado foi de 11°C em Triunfo e o valor máximo foi encontrado em Serra Talhada com 45°C.

O segundo procedimento realizado foi a identificação de dados inconsistentes, os valores máximos e mínimos aceitáveis foram identificados a partir da técnica de boxplot gerados para cada uma das 100 séries de dados utilizados nesta pesquisa, sendo 20 séries de cada variável.

A Figura 26 ilustra os dados de temperatura máxima do ar da estação de Serra Talhada, pode-se observar que existe um período sem observações representadas pelo círculo. Para os dados de temperatura do ar máxima desta estação os valores considerados inconsistentes estão abaixo de 20°C ou acima de 45°C, estes valores foram encontrados a partir da análise de boxplot realizado para cada série de dados.

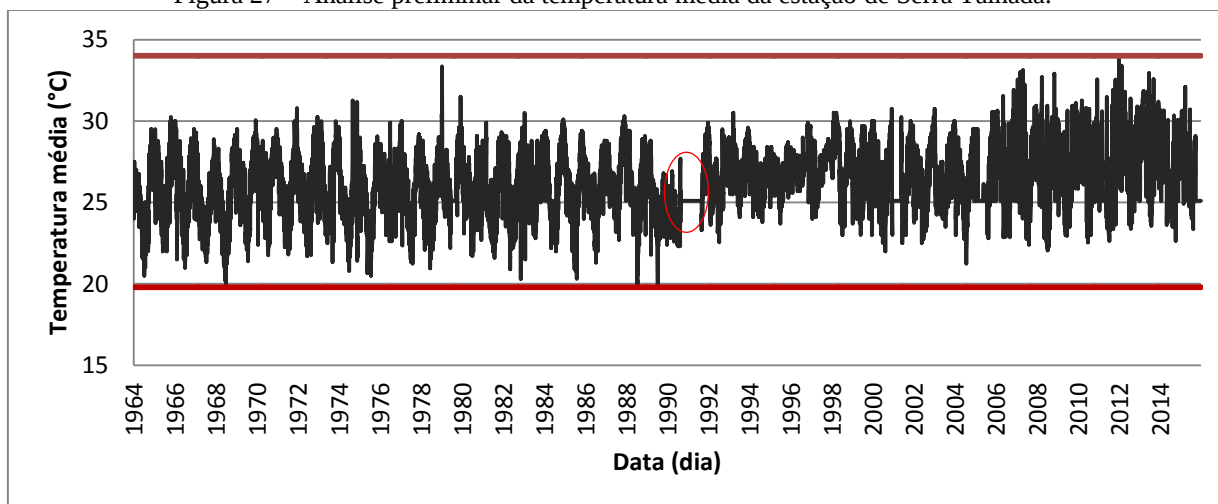
Figura 26 - Análise preliminar da temperatura máxima da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

Analizando a série da temperatura média da estação de Serra Talhada, identificou-se a faixa entre 19,8°C e 34°C como valores confiáveis, os demais valores foram desprezados, este procedimento se repetiu para as demais estações, a Figura 27 ilustra os períodos sem observações.

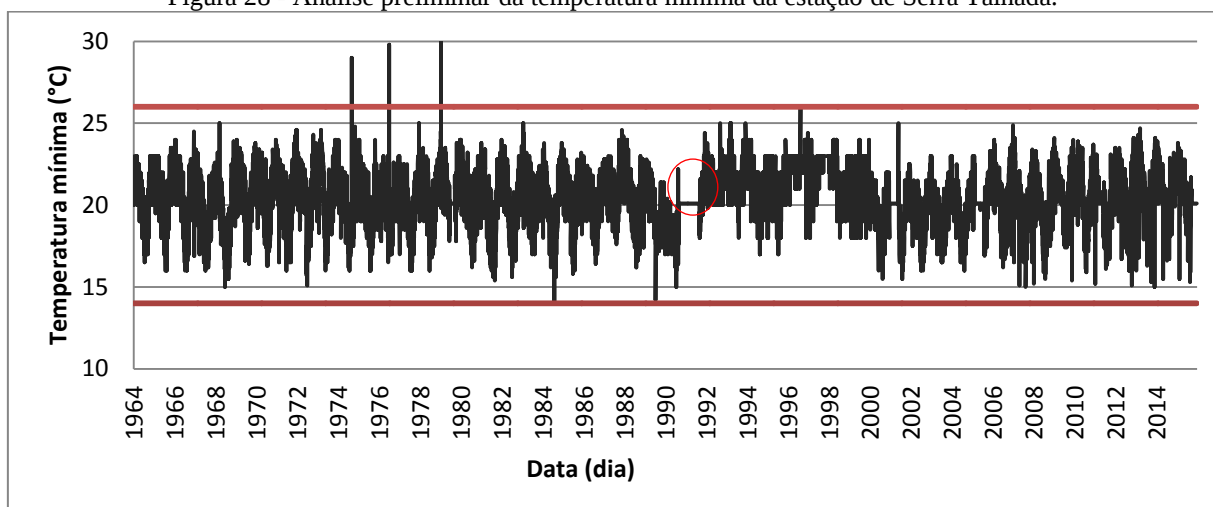
Figura 27 – Análise preliminar da temperatura média da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

Já para a temperatura mínima, os valores considerados consistentes estão entre 14°C e 26°C, apresentados na Figura 28, pode-se observar ainda a presença de períodos sem observações e dados fora do limite aceitável.

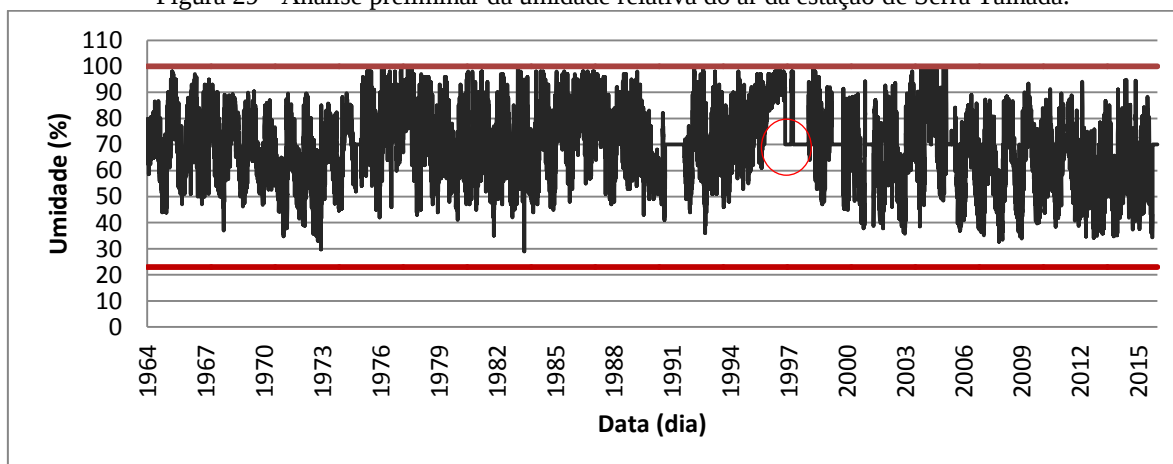
Figura 28 - Análise preliminar da temperatura mínima da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

O mesmo procedimento foi aplicado para analisar os dados inconsistentes da variável umidade relativa do ar, sendo observados os períodos sem dados e valores discrepantes, considerados abaixo de 23% e acima de 100%, ilustrado na Figura 29.

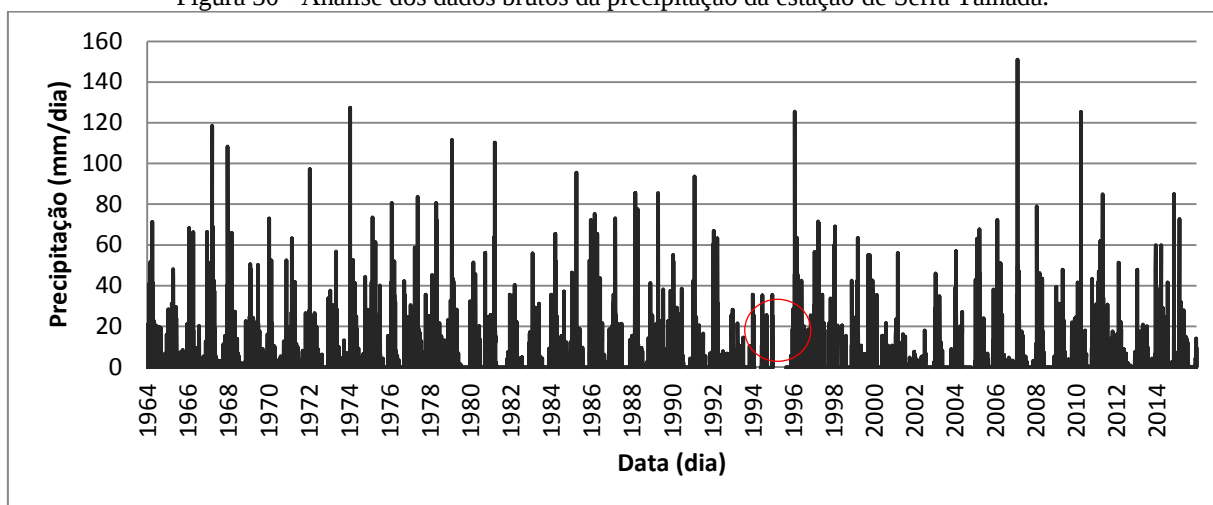
Figura 29 - Análise preliminar da umidade relativa do ar da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

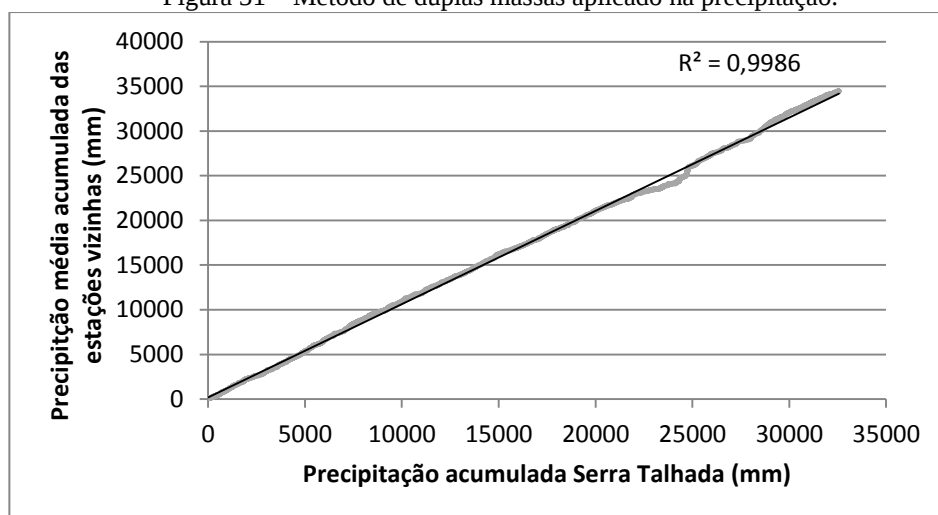
Os dados de precipitação foram plotados em gráficos de barra para analisar o comportamento de cada série (Figura 30). As falhas nas observações da precipitação foram analisadas comparando os períodos com os dados da estação com falhas com os das estações vizinhas, para confirmar a confiabilidade dos dados utilizando o Método de Dupla Massa. A Figura 31 apresenta o resultado do método de dupla massa para a estação de Serra Talhada, utilizando a precipitação média acumulada das estações de Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Igaraci, Itapetim, São José do Egito, Triunfo e Tuparetama.

Figura 30 - Análise dos dados brutos da precipitação da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 31 – Método de duplas massas aplicado na precipitação.



Fonte: A Autora (2019).

Após o reconhecimento dos períodos das séries, de cada variável, com dados inconsistentes, foi possível preencher as falhas. O primeiro passo foi a escolha das estações vizinhas utilizadas para o preenchimento.

Inicialmente foi realizado o tratamento estatístico, com o intuito de verificar a confiança das relações entre os dados. O procedimento estatístico aplicado para verificar a confiabilidade dos dados da variável resposta, foi a regressão múltipla.

Na Tabela 17 estão descritos os resultados considerando a estação de Serra Talhada como variável resposta e as estações vizinhas (Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Igaraci, Itapetim, São José do Egito, Triunfo e Tuparetama) como variável explicativa. Este

procedimento foi utilizado para as demais estações e os resultados foram semelhantes ao da estação Serra Talhada.

Tabela 17 - Análise estatística de regressão múltipla e teste t de Student

Variável	R ²	Teste-t	Valor-p
Umidade relativa do ar	0,97	16,51	$8,28 \cdot 10^{-56}$
Temperatura Máxima	0,98	7,37	$2,61 \cdot 10^{-14}$
Temperatura Média	0,98	8,09	$3,8 \cdot 10^{-170}$
Temperatura Mínima	0,98	8,12	$0,18 \cdot 10^{-30}$
Precipitação	0,62	3,40	0,006

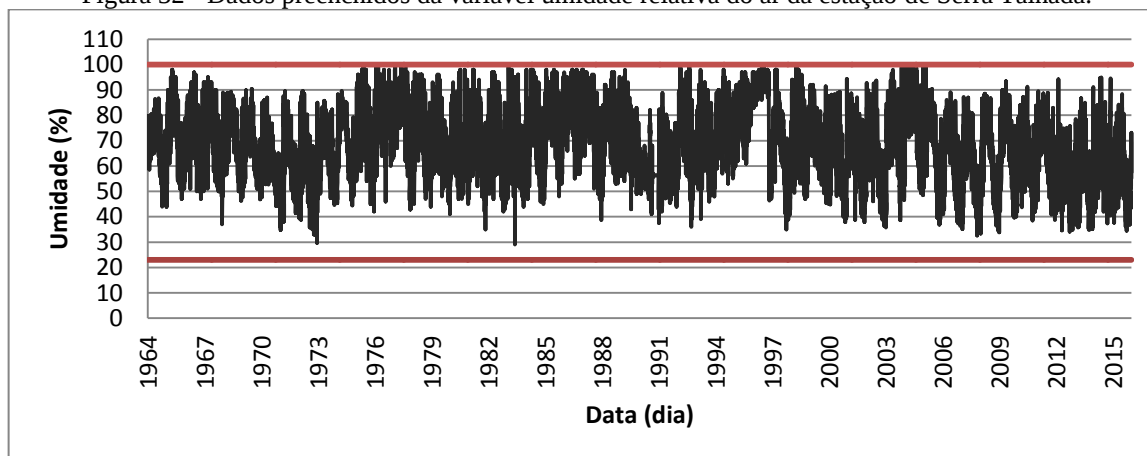
Fonte: A Autora (2019).

O coeficiente de determinação do modelo (R^2) apresentou resultados satisfatórios para todas as variáveis analisadas. Após identificar o grau da relação, foram realizados o teste t e o valor-p, a fim de descobrir quais das séries de dados deveriam permanecer no preenchimento de falhas. Como todos os valores de p das variáveis analisadas foram inferiores a 5% (ou 0,05), afirma-se que a variável explicativa, que esse parâmetro representa, deverá permanecer na fórmula do modelo final (Montgomery, 2009). Logo, os resultados mostraram que todas as séries de dados de cada variável estudada deveriam permanecer na equação final.

Após obter bons resultados no teste dos modelos gerados, aplicou-se o método de regressão linear múltipla para preencher as falhas dos dados diários de cada variável, quais sejam: temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação.

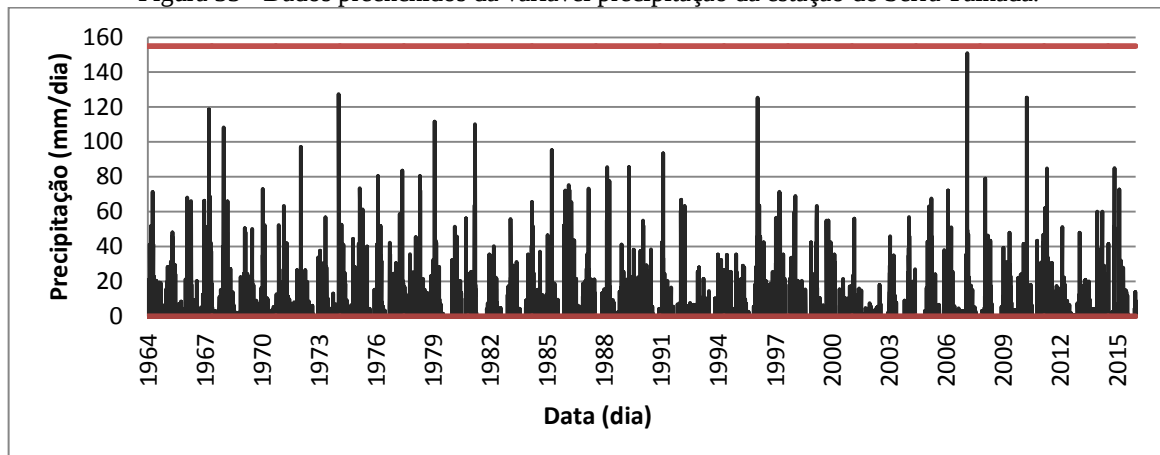
Os dados preenchidos foram plotados em um gráfico para analisar o comportamento das variáveis no período da pesquisa, de 1964 a 2015, apresentados nas Figuras 32 a 36.

Figura 32 - Dados preenchidos da variável umidade relativa do ar da estação de Serra Talhada.



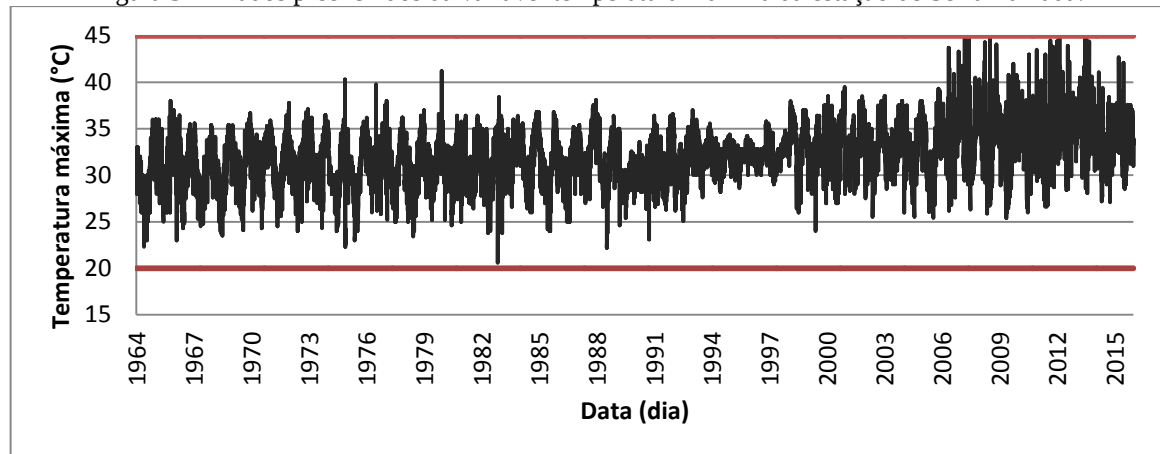
Fonte: A Autora (2019).

Figura 33 - Dados preenchidos da variável precipitação da estação de Serra Talhada.



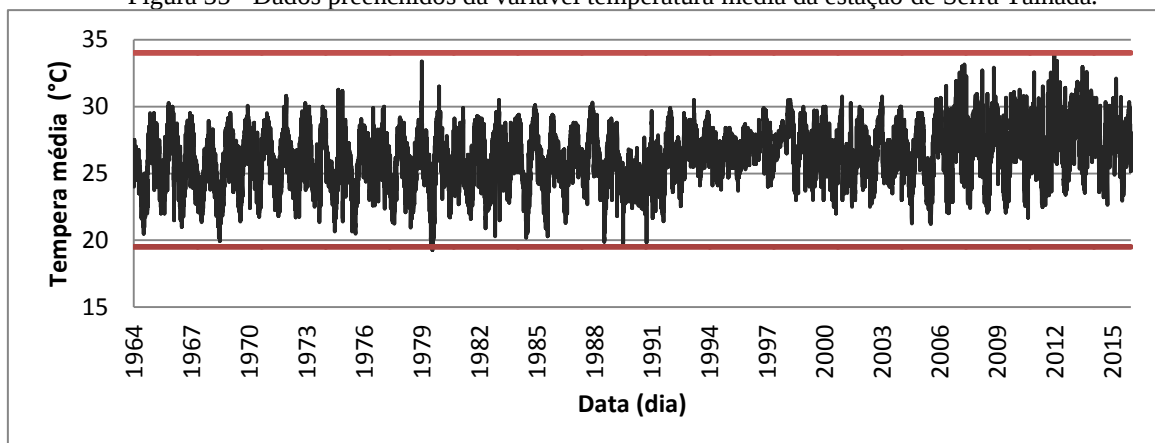
.Fonte: A Autora (2019).

Figura 34 - Dados preenchidos da variável temperatura máxima da estação de Serra Talhada.



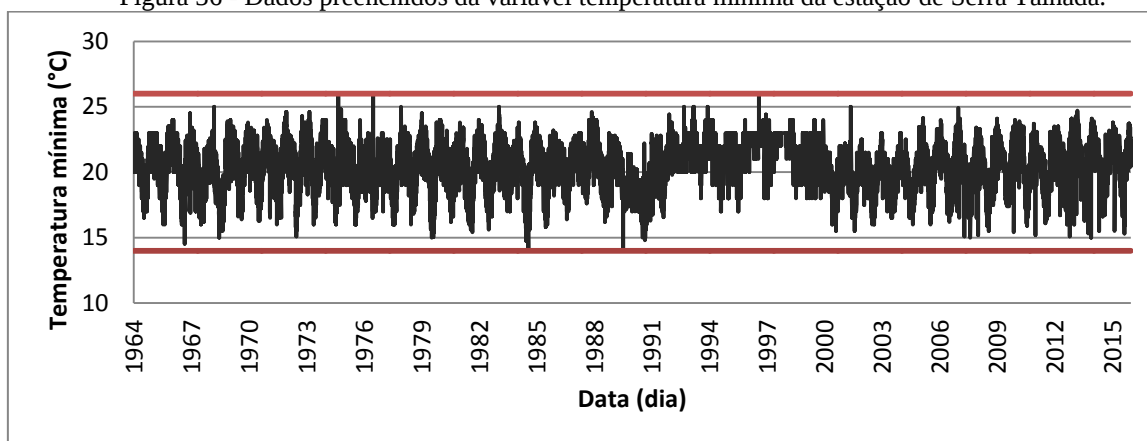
Fonte: A Autora (2019).

Figura 35 - Dados preenchidos da variável temperatura média da estação de Serra Talhada.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 36 - Dados preenchidos da variável temperatura mínima da estação de Serra Talhada.



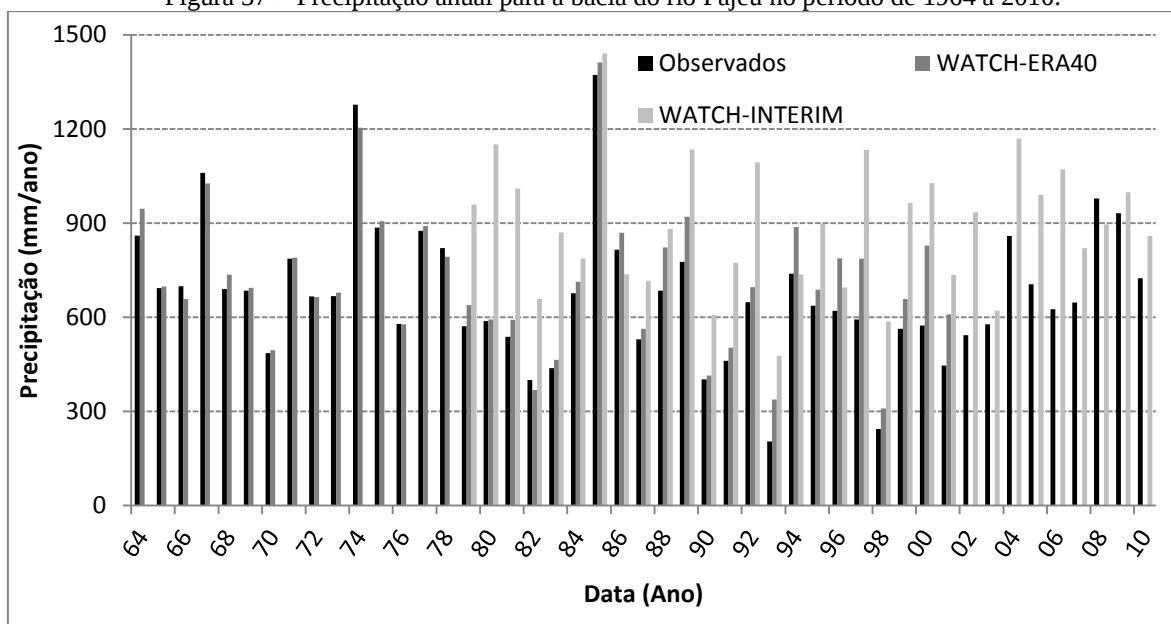
Fonte: A Autora (2019).

Concluindo a etapa de preenchimento de falhas, os dados foram preparados para inclusão no modelo. A radiação solar foi calculada aplicando o método de Hargreaves, como apresentado na metodologia.

4.1.1.3.2 *Análise das fontes de dados da precipitação*

Comparando os dados de precipitação das estações de monitoramento (dados observados) com dados do WATCH ERA40, constata-se que até o ano 1987 as diferenças entre WATCH ERA40 e dados observados na escala anual são pequenas, após este período percebe-se uma maior variação entre os dados (Figuras 37 e 38). As diferenças entre WATCH ERA-Interim e dados observados são bem mais evidentes.

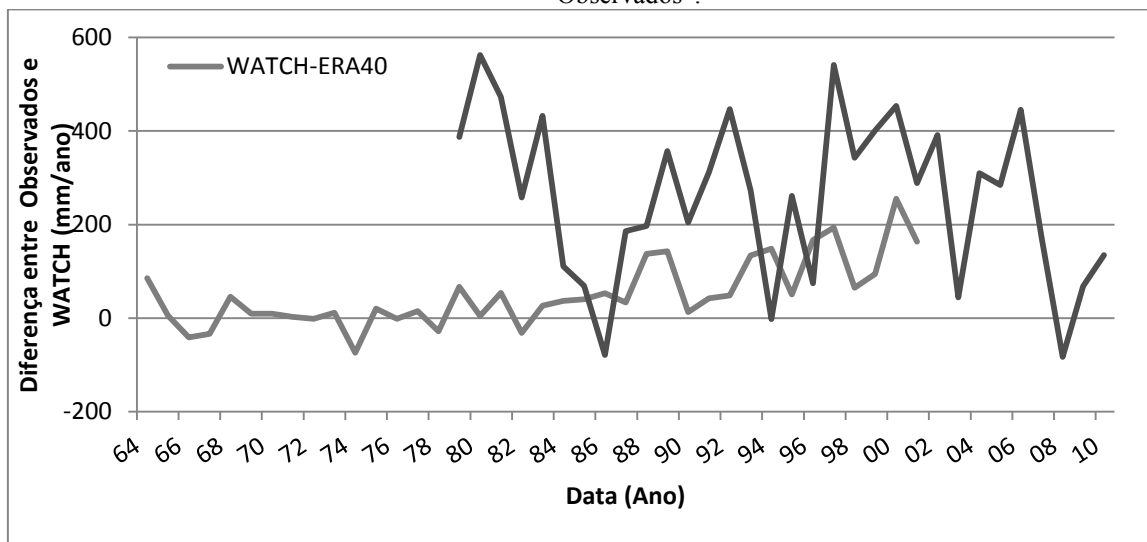
Figura 37 - Precipitação anual para a bacia do rio Pajeú no período de 1964 a 2010.



Fonte: A Autora (2019).

Por causa desta diferença elevada, os dados climáticos do WATCH ERAInterim foram descartados, para o período de 1964 a 2001, utilizando neste período os dados do WATCH ERA40 e das estações pluviométricas observadas por apresentarem dados semelhantes na escala anual.

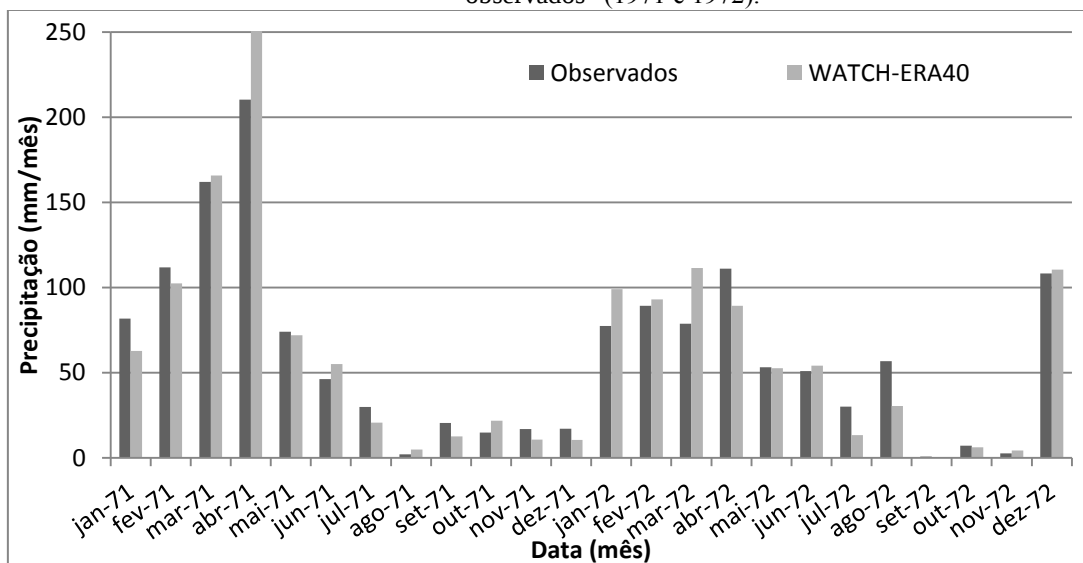
Figura 38 - Diferença entre a precipitação anual “WATCH ERA40” – “Observados” e “WATCH ERAInterim” – “Observados”.



Fonte: A Autora (2019).

Observa-se ainda que, embora alguns anos apresentem a precipitação anual aproximada, a exemplo de 1971 e 1972, existe variação na escala mensal (Figura 39).

Figura 39 - Precipitação mensal para a bacia do rio Pajeú com dados do “WATCH -ERA40” e “dados observados” (1971 e 1972).



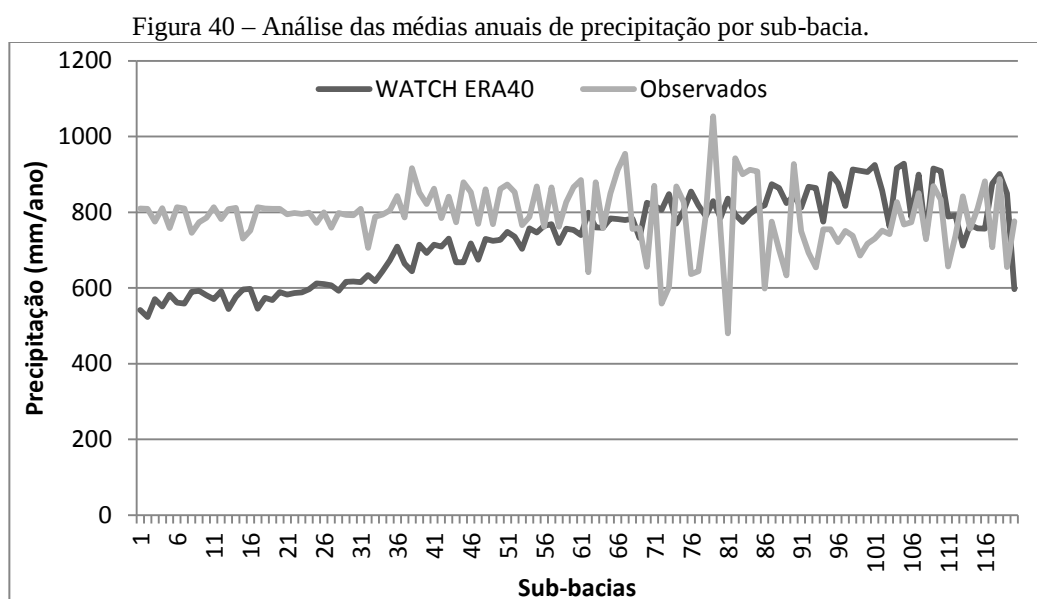
Fonte: A Autora (2019).

4.1.1.3.3 Análise dos dados climáticos no Modelo SWIM

Comparando os dados climáticos, gerados para as sub-bacias, utilizando os dados do WATCH ERA40 e os dados observados, pôde-se constatar que os valores das variáveis divergem ao longo da bacia.

Essa divergência pode ser causada pela ocorrência da precipitação orográfica observada na parte norte da bacia (especialmente a montante de Afogados da Ingazeira e Flores), o que influencia nas células do WATCH ERA40 (incluindo partes muito úmidas fora da bacia), superestimando a precipitação nesta área, comparando com os dados observados.

Na Figura 40 estão ilustrados os dados de precipitação média anual calculada para ambas as fontes de dados climáticos. Destacando que a média anual dos dados observados supera a média dos dados do WATCH ERA40 em mais de 30% nas sub-bacias 1, 2 e 4, o inverso acontece nas sub-bacias 105 e 111, por exemplo, onde a média anual do WATCH ERA40 supera em 20% a média anual dos dados observados.

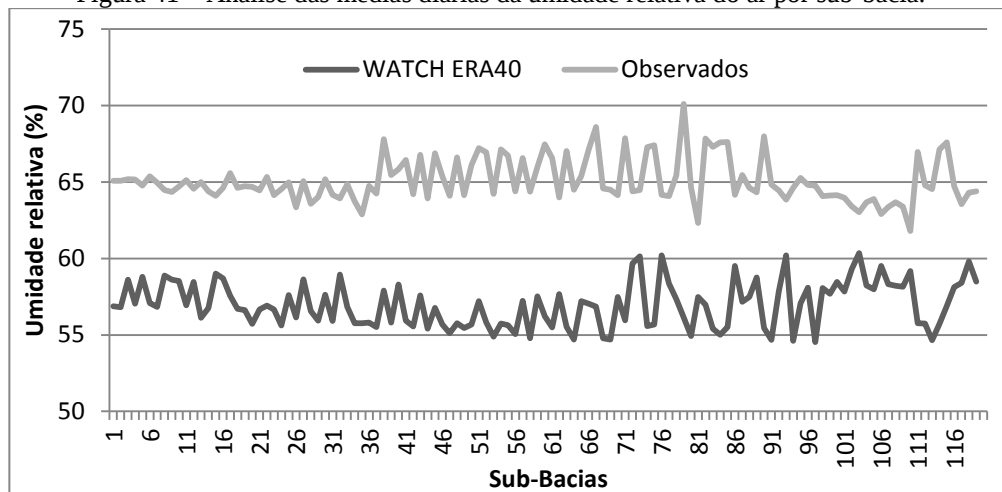


Fonte: A Autora (2019).

Estas variações podem ser observadas para as demais variáveis, para variável umidade pode-se observar que os dados médios diários do WATCH ERA40 são inferiores aos dados observados para todas as sub-bacias. Em algumas sub-bacias, a exemplo da 79, esta variação aproxima-se dos 20% (Figura 41).

Esta constatação motivou uma investigação mais aprofundada com relação à influência das incertezas geradas pela variação dos dados de entrada na modelagem e nos resultados das vazões simuladas, principalmente no tocante à precipitação.

Figura 41 – Análise das médias diárias da umidade relativa do ar por sub-bacia.

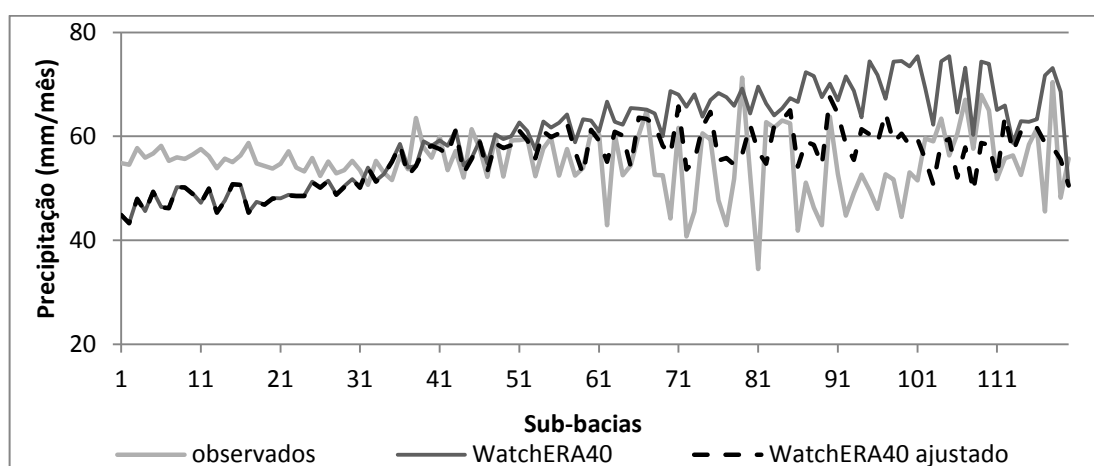


Fonte: A Autora (2019).

Por isso, mais uma versão dos dados climáticos foi gerada com os dados do WATCH ERA40 ajustado conforme descrito na metodologia.

Analisando os resultados dos dados de precipitação interpolados para as sub-bacias (Figura 42), pôde-se observar que as maiores dispersões entre os dados observados e do WATCH ERA40 são encontrados próximo ao exutório da bacia (sub-bacias de 1 a 40), região com menor quantidade de estação de coleta de dados pluviométricos conforme ilustrado na Figura 16. O contrário pode ser observado no alto Pajeú (sub-bacias de 100 a 120), região que possui maior número de estações de monitoramento.

Figura 42 – Análise das médias mensal (1964-2001) da precipitação por sub-bacia.



Fonte: A Autora (2019).

Observa-se ainda que a precipitação gerada com dados do WATCH ERA40 ajustado se aproxima dos dados do WATCH ERA40 nas sub-bacias 1 a 60. O maior ajuste é observado

nas sub-bacias 100 a 120, apresentando menores valores de precipitação, comparado com os dados do WATCH ERA40.

Para verificar a influência destes dados nas simulações foram criados diferentes cenários variando os dados climáticos de entrada, os resultados destas simulações serão descritos no item 4.2 desta tese.

4.1.2 Criação da versão SWIM Pajeú

A adaptação do modelo foi possível a partir do acesso ao código fonte do SWIM, em parceria com a equipe de pesquisadores do Potsdam Institute for Climate Impact Research - PIK, através do projeto INNOVATE Brasil e Alemanha, viabilizando a criação de uma versão do modelo SWIM chamado de “SWIM_PAJEU”, possibilitando a sua aplicação para regiões semiáridas do Nordeste do Brasil, incluindo dados específicos da região nos arquivos padrão do modelo.

Para calcular o balanço hídrico da bacia do rio Pajeú foram necessárias algumas modificações, a exemplo dos arquivos “crop.dat” e “landman.csv”. No arquivo “crop.dat” há informações para a vegetação natural (árvores, grama etc.) e as culturas agrícolas (trigo, milho, banana etc.), a exemplo do índice de área foliar mínimo e máximo durante o ciclo de crescimento, temperatura base e temperatura ótima para o crescimento. No arquivo “landman.csv” há informações sobre dados de plantio e colheita das culturas (rotação das culturas). Essas modificações possibilitaram a inclusão de 18 diferentes usos da terra típicos da região nordeste que não existiam na versão original do modelo, dentre elas o bioma Caatinga e plantio de coco e banana, descritos no Apêndice II.

Além disso, os módulos reservatório e alocação da água também foram incluídos, possibilitando simulações mais próximas da realidade da área de estudo.

4.1.3 Calibração e validação do modelo SWIM

Nesta etapa foram analisados separadamente os cenários 1, 2 e 3, construídos utilizando o hidrotopo 01 (gerado com dados do uso da terra com o Mapbiomas 85 e tipo de solo Embrapa 2011) e variando os dados de clima, para os anos de 1964 a 1982, considerados de vazões naturais, visto que neste período os efeitos antrópicos causados pela operação dos reservatórios e retiradas da água, foram poucos.

Os resultados das simulações foram comparados com as estações de controle, quais sejam: Afogados da Ingazeira, Serrinha e Ilha Grande, com período de calibração de 1964 a 1970. A validação destas simulações ocorreu para os períodos de 1971 a 1974.

Também foram utilizadas as estações de controle de Flores (calibração: 1971 a 1975 e validação: 1976 a 1980), Floresta (calibração: 1973 a 1977 e validação: 1978 a 1982) e Serra Talhada (calibração: 1972 a 1976 e validação: 1977 a 1981). A mudança nos períodos de calibração e validação destas últimas estações de controle se deveu ao fato da indisponibilidade de dados confiáveis para os anos anteriores.

Uma das principais dificuldades na calibração e validação do modelo SWIM para a bacia do Pajeú foi a limitação dos dados observados. Segundo Brighenti et al., (2016), existem obstáculos na utilização de modelos hidrológicos em bacias com dados observados escassos, fato que dificulta as etapas de calibração e validação, uma vez que os dados observados servem para avaliar o desempenho estatístico dos resultados gerados nas simulações.

A calibração manual do modelo SWIM ajudou na compreensão das características hidrometeorológicas e processos das sub-regiões. Para analisar o desempenho do modelo, além das descargas médias anuais, foram analisados a eficiência Nash – Sutcliffe (NSE), o erro padrão médio normalizado (RSR). Além disso, foi verificado o percentual de bias (PBIAS) e a análise de regressão múltipla R^2 como critérios estatísticos e análise gráfica.

Os parâmetros do modelo mais sensíveis na calibração foram “ecal” (fator de correção para evaporação potencial), parâmetros “roc” (coeficientes de roteamento para calcular a constante de tempo de armazenamento), “sccor” (fator de correção para condutividade saturada), “bff” (fator de fluxo de base), delay (fluxo das águas subterrâneas) e abf (águas subterrâneas).

As simulações realizadas com o cenário 1 (hidrotope 1 e com dados de clima do WATCH ERA40) mostram um acréscimo nas vazões simuladas quando comparadas com os dados das estações de controle, o que influenciou nos resultados das análises estatísticas, que não apresentaram bons resultados como apresentado na Tabela 18.

O desempenho das simulações do cenário 1 foi considerado de forma geral insatisfatório, visto que aproximadamente 90% dos resultados para os índices de NSE, RSR e PBIAS foram insatisfatórios, segundo a classificação de desempenho descrita na Tabela 10.

Uma segunda análise foi feita com os dados gerados no cenário 2 (hidrotope 1 e dados de clima observados) e os resultados das análises estatísticas, estão descritos na Tabela

19. O desempenho das simulações indicou que 40% dos resultados para os índices de NSE, RSR foram satisfatórios, segundo a classificação de desempenho.

Na tentativa de melhorar os resultados das simulações, um terceiro cenário (cenário 3) foi criado, utilizando o hidrotópe 1 e dados de clima do WATCH ERA40 ajustado. Os resultados da análise de desempenho deste estão apresentados na Tabela 20.

Observou-se no cenário 3 um melhor ajuste, comparado com os cenários anteriores, com aproximadamente 50% dos resultados da análise estatística considerada aceitável, sendo 20% muitos bons, 10% bons e 20% satisfatórios

Os resultados das simulações dos cenários 1, 2 e 3, gerados com o hidrotópe 1 e variando os dados climáticos, demonstram que os dados de clima interferem significativamente nos resultados, o cenário 1 (gerado com dados de WATCH ERA40) foi o que mais superestimou as vazões.

Todos os cenários analisados apresentaram resultados muito bons para o coeficiente de determinação (R^2). Já o índice PBIAS foi o que apresentou piores resultados. Percebe-se também que os anos secos apresentaram os piores resultados de desempenho, comparado com os anos úmidos. Fato confirmado no trabalho de Brighenti et al. (2016).

Segundo Balme et al. (2006) a dificuldade encontrada na etapa de calibração e validação da região estudada está relacionada ao regime de chuvas. As regiões semiáridas são conhecidas por suas chuvas irregulares, o que causa um profundo impacto no ciclo hidrológico.

Os canais permanecem secos a maior parte do ano e o fluxo depende quase exclusivamente das chuvas (CAMARASA e TILFORD, 2002; BRACKEN et al., 2008). Pequenos desvios na precipitação podem levar a fortes diferenças entre os dados observados e os fluxos simulados. Este fato pode afetar o uso de indicadores de desempenho como a NSE em regiões semiáridas. Costelloe et al., (2005) afirmam que para esses rios, parece mais apropriado usar a comparação gráfica entre os dados observados e simulados e médias de longo prazo.

Tabela 18 – Desempenho do modelo para o Cenário 1.

Afogados da Ingazeira										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	8,61	1,17	19,42	4,22	1,09	0,11	2,73	0,36	1,95	11,02
Média_Sim	32,45	3,27	53,39	21,42	15,12	3,15	33,24	6,29	9,31	48,41
PBIAS	277%	180%	175%	408%	1293%	1293%	932%	1502%	377%	339%
NSE	-13,00	-2,43	-2,07	-17,45	-82,05	-538,15	-162,64	-176,63	-15,34	-11,17
RSR	3,74	1,85	1,75	4,30	9,11	23,22	12,79	13,33	4,04	3,49
R2	0,95					0,88				
Flores										
	Calibração					Validação				
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Media_Obs	7,7	0,79	5,4	32,6	20,12	1,97	8,0	7,01	0,53	1,8
Média_Sim	35,1	7,36	10,7	61,1	38,49	3,60	26,5	19,76	4,13	3,0
PBIAS	354%	827%	99%	87%	91%	91%	231%	182%	684%	66%
NSE	-21,64	-92,76	-0,24	-0,26	-0,99	-1,77	-7,58	-2,32	-93,76	0,61
RSR	4,76	9,68	1,11	1,12	1,41	1,67	2,93	1,82	9,73	0,63
R2	0,91					0,81				
Floresta										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	7,22	65,36	45,05	6,23	13,95	16,66	7,13	7,88	23,82	5,66
Média_Sim	12,91	130,17	98,21	10,28	33,87	29,23	17,30	17,61	42,22	3,02
PBIAS	79%	99%	108%	54%	143%	143%	143%	93%	77%	-39%
NSE	-2,29	-1,87	-2,44	-3,09	-8,12	-1,34	-8,04	-3,05	-0,22	-0,14
RSR	1,81	1,69	1,85	2,02	3,02	1,53	3,01	2,01	1,10	1,07
R2	0,9					0,89				
Serrinha										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	12,04	1,50	79,66	18,74	3,31	2,20	14,61	0,83	4,78	62,48
Média_Sim	36,25	5,64	88,39	44,76	15,88	5,96	61,13	10,30	12,66	40,58
PBIAS	184%	275%	11%	139%	379%	379%	319%	1146%	151%	-26%
NSE	-6,36	-10,95	0,95	-2,87	-80,72	-6,58	-18,67	-206,58	-8,12	0,88
RSR	2,71	3,46	0,23	1,97	9,04	2,75	4,44	14,41	3,02	0,34
R2	0,93					0,7				
Serra Talhada										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	10,74	45,86	31,52	6,17	9,83	9,30	1,70	4,53	36,85	8,91
Média_Sim	16,17	71,17	60,06	17,91	33,57	23,45	8,65	6,43	103,49	9,22
PBIAS	34%	55%	68%	79%	201%	201%	307%	31%	75%	1%
NSE	0,26	0,14	-1,21	-5,85	-8,88	-1,97	-51,41	0,59	-1,58	0,76
RSR	0,86	0,93	1,49	2,62	3,14	1,72	7,24	0,64	1,61	0,49
R2	0,9					0,93				
Ilha Grande										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	0,63	0,89	7,05	1,99	1,59	0,54	0,37	0,06	1,44	16,07
Média_Sim	2,82	2,43	11,81	3,45	2,27	1,04	2,36	0,80	0,33	24,87
PBIAS	349%	173%	67%	73%	42%	42%	539%	1274%	-32%	32%
NSE	-17,70	-2,30	0,19	0,32	0,86	-1,26	-26,97	-167,91	0,17	-0,58
RSR	4,32	1,82	0,90	0,82	0,38	1,50	5,29	13,00	0,91	1,26
R2	0,97					0,9				

 Muito bom
  Bom
  Satisfatório

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 19 – Desempenho do modelo para o Cenário 2.

Afogados da Ingazeira										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	8,61	1,17	19,42	4,22	1,09	0,11	2,73	0,36	1,95	11,02
Média_Sim	3,83	4,24	18,05	10,61	4,54	2,08	7,42	0,85	3,50	34,49
PBIAS	-56%	263%	-7%	152%	318%	318%	143%	123%	79%	213%
NSE	0,72	-10,38	0,89	-5,46	-13,78	-233,30	-2,37	0,20	-0,15	-4,38
RSR	0,53	3,37	0,34	2,54	3,84	15,31	1,83	0,89	1,07	2,32
R2	0,8					0,93				
Flores										
	Calibração					Validação				
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Media_Obs	7,7	0,79	5,4	32,6	20,12	1,97	8,0	7,01	0,53	1,8
Média_Sim	8,5	0,87	3,8	54,5	6,09	1,31	4,0	9,65	4,60	4,4
PBIAS	10%	10%	-30%	67%	-70%	-70%	-50%	38%	775%	141%
NSE	0,89	0,50	0,82	0,19	0,31	0,72	0,52	0,62	-87,02	-1,67
RSR	0,33	0,71	0,42	0,90	0,83	0,53	0,69	0,62	9,38	1,64
R2	0,86					0,71				
Floresta										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	7,22	65,36	45,05	6,51	13,95	16,66	7,13	7,88	23,82	6,41
Média_Sim	13,05	143,97	46,33	9,69	22,62	43,98	5,58	21,58	37,76	1,44
PBIAS	81%	120%	3%	41%	62%	62%	-22%	130%	59%	-65%
NSE	-2,50	-2,02	0,52	0,08	-0,80	-4,23	0,51	-7,58	0,18	-0,10
RSR	1,87	1,74	0,69	0,96	1,34	2,29	0,70	2,93	0,91	1,05
R2	0,89					0,93				
Serrinha										
	Calibração					Validação				
	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Media_Obs	12,09	1,50	79,66	18,74	3,31	2,20	14,61	0,83	4,78	62,48
Média_Sim	19,53	5,91	89,63	19,66	9,14	3,98	20,61	2,25	12,74	66,99
PBIAS	56%	293%	13%	5%	176%	176%	41%	172%	152%	5%
NSE	-0,13	-13,74	0,89	0,91	-11,45	-0,55	0,53	-3,18	-7,35	0,99
RSR	1,06	3,84	0,33	0,29	3,53	1,25	0,68	2,04	2,89	0,08
R2	0,94					0,99				
Serra Talhada										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	10,74	45,86	31,52	6,17	9,83	9,30	1,70	4,53	36,85	8,91
Média_Sim	8,31	81,94	15,44	8,24	7,27	16,36	7,14	8,27	49,06	2,27
PBIAS	-15%	79%	-38%	14%	-22%	-22%	240%	62%	14%	-25%
NSE	0,85	-0,39	0,64	0,77	0,76	0,33	-23,46	0,20	0,70	0,64
RSR	0,39	1,18	0,60	0,48	0,49	0,82	4,95	0,89	0,55	0,60
R2	0,92					0,92				
Ilha Grande										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	0,63	0,89	7,05	1,99	1,59	0,54	0,37	0,06	1,44	16,07
Média_Sim	2,68	1,65	20,81	2,62	0,75	0,80	5,98	0,69	1,74	57,04
PBIAS	326%	85%	195%	31%	-53%	-53%	1521%	1095%	9%	149%
NSE	-26,50	0,68	-3,91	0,91	-0,10	0,59	-252,86	-126,21	-0,37	-6,56
RSR	5,24	0,56	2,21	0,30	1,05	0,64	15,93	11,28	1,17	2,75
R2	0,95					0,92				

 Muito bom
  Bom
  Satisfatório

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 20 – Desempenho do modelo para o Cenário 3.

Afogados da Ingazeira										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	8,61	1,17	19,42	4,22	1,09	0,11	2,73	0,36	1,95	11,02
Média_Sim	10,56	0,97	24,24	5,78	3,39	1,16	12,90	1,26	2,17	21,19
PBIAS	23%	-17%	25%	37%	212%	212%	310%	228%	11%	92%
NSE	0,31	0,28	0,90	0,80	-1,44	-67,73	-17,29	-3,90	0,98	-0,10
RSR	0,83	0,85	0,32	0,45	1,56	8,29	4,28	2,21	0,14	1,05
R2	0,98					0,89				
Flores										
	Calibração					Validação				
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Media_Obs	7,7	0,79	5,4	32,6	20,12	1,97	8,0	7,01	0,53	1,8
Média_Sim	13,4	1,37	2,2	26,4	12,81	0,97	7,9	4,06	0,82	0,8
PBIAS	73%	73%	-58%	-19%	-36%	-36%	-1%	-42%	57%	-50%
NSE	-0,45	-1,46	0,56	0,89	0,44	0,56	0,72	0,39	0,08	0,34
RSR	1,21	1,57	0,66	0,33	0,75	0,66	0,53	0,78	0,96	0,81
R2	0,89					0,78				
Floresta										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	7,22	65,36	45,05	6,51	13,95	16,66	7,13	7,88	23,82	6,41
Média_Sim	4,33	80,52	32,33	3,50	15,27	12,61	10,05	12,19	23,05	0,70
PBIAS	-40%	23%	-26%	-39%	9%	9%	41%	41%	-3%	-74%
NSE	0,83	0,52	0,78	0,60	0,04	0,27	-1,35	-0,71	0,98	-0,31
RSR	0,41	0,69	0,47	0,63	0,98	0,85	1,53	1,31	0,13	1,14
R2	0,87					0,87				
Serrinha										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	12,09	1,50	79,66	18,74	3,31	2,20	14,61	0,83	4,78	62,48
Média_Sim	15,22	2,44	60,86	21,25	6,18	2,35	33,27	3,04	4,75	26,56
PBIAS	24%	62%	-24%	13%	86%	86%	128%	268%	-1%	-43%
NSE	0,64	-0,32	0,97	0,54	-8,41	0,72	-2,61	-13,12	-0,34	0,66
RSR	0,60	1,15	0,19	0,67	3,07	0,53	1,90	3,76	1,16	0,58
R2	0,97					0,77				
Serra Talhada										
	Calibração					Validação				
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Media_Obs	10,74	45,86	31,52	6,17	9,83	9,30	1,70	4,53	36,85	8,91
Média_Sim	3,79	35,02	21,54	3,60	11,29	6,12	3,08	2,51	27,48	2,42
PBIAS	-43%	-24%	-24%	-17%	12%	12%	61%	-33%	-11%	-24%
NSE	0,56	0,88	0,54	0,88	0,72	0,34	-2,84	0,55	0,77	0,67
RSR	0,67	0,34	0,68	0,35	0,53	0,81	1,96	0,67	0,48	0,58
R2	0,91					0,84				
Ilha Grande										
	Calibração					Validação				
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Media_Obs	0,63	0,89	7,05	1,99	1,59	0,54	0,37	0,06	1,44	16,07
Média_Sim	2,29	2,02	10,99	1,63	1,88	0,98	1,83	0,79	0,58	20,90
PBIAS	264%	127%	56%	-18%	18%	18%	395%	1265%	-25%	18%
NSE	-9,86	-0,52	0,27	0,94	0,98	-0,83	-12,15	-155,02	0,42	0,02
RSR	3,29	1,23	0,86	0,25	0,14	1,35	3,63	12,49	0,76	0,99
R2	0,95					0,9				

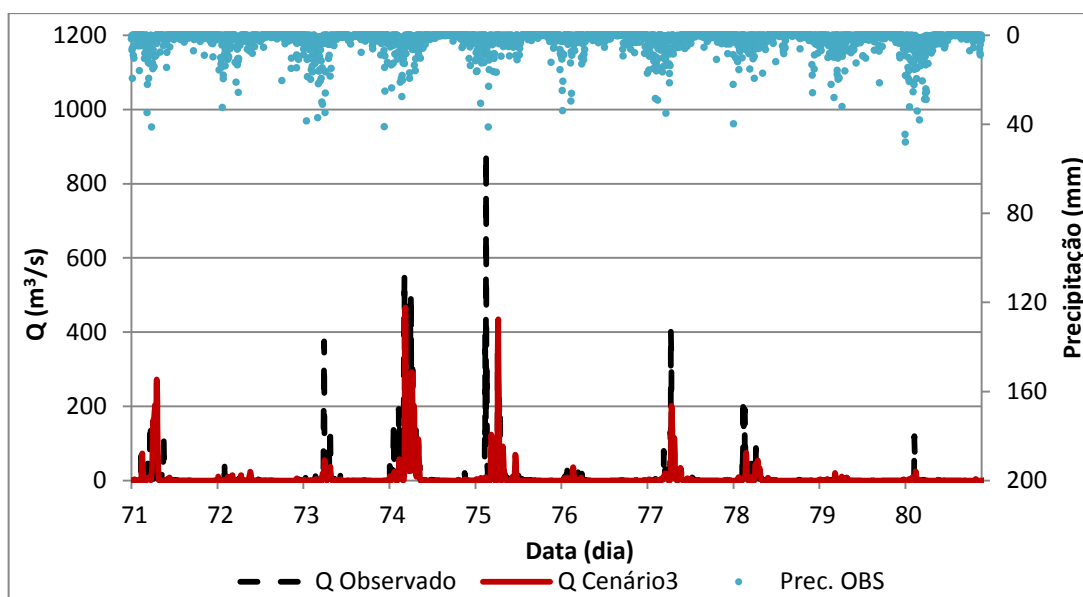
 Muito bom
  Bom
  Satisfatório

Fonte: A Autora (2019).

Apesar dos resultados da análise de desempenho do modelo, para alguns anos, não terem sido considerados satisfatório, os resultados observados nas análises gráficas demonstram que o modelo tem uma resposta positiva às variações de precipitação da bacia. A análise gráfica permitiu a comparação dos resultados simulados nos cenários com os dados das estações de controle quais sejam: Afogados da Ingazeira, Flores, Serrinha e Ilha Grande, Floresta e Serra Talhada. Estas estações foram escolhidas por apresentarem valores observados para o período de 1964 a 1982, período sem grandes influências dos grandes reservatórios, possibilitando a calibração do modelo para a vazão natural da bacia.

Percebe-se também que nos anos em que os resultados estatísticos foram piores e os dados observados apresentaram respostas adversas ao esperado, a exemplo dos dados da estação de Flores para o ano de 1975, onde foram encontradas vazões observadas de 888,91 m³/s, porém a precipitação observada não corresponde a vazão observada (Figura 43). Indicando que os dados observados podem apresentar inconsistência que comprometem a análise de desempenho do modelo.

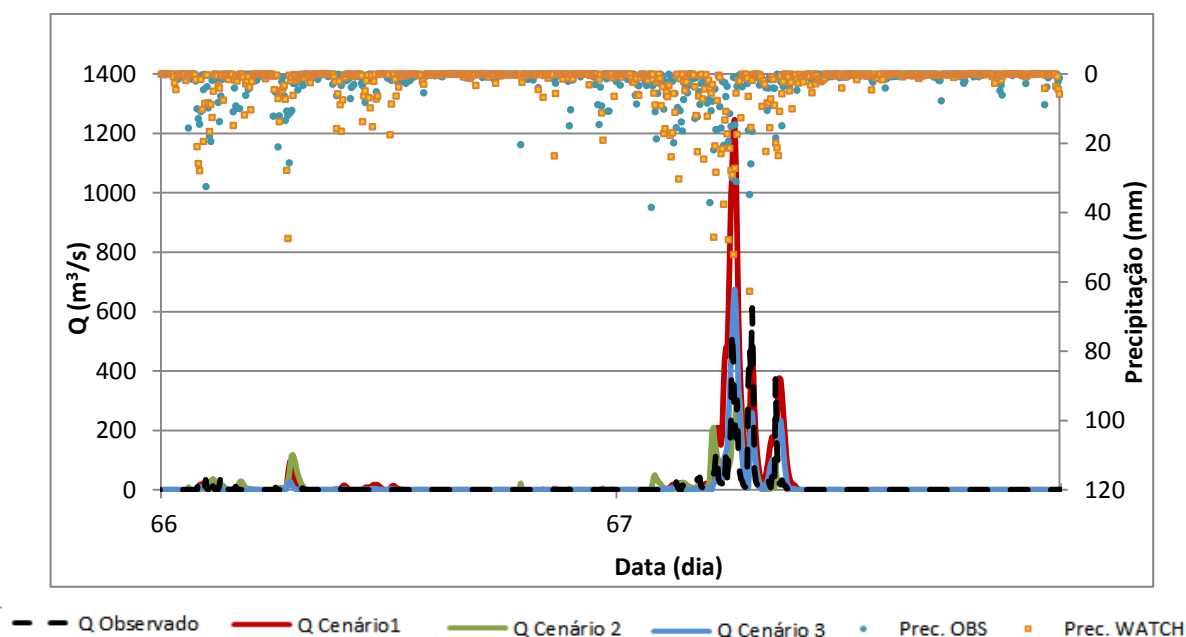
Figura 43 – Relação vazão observada, vazão simulada e precipitação observada na Estação de Flores.



Fonte: A Autora (2019).

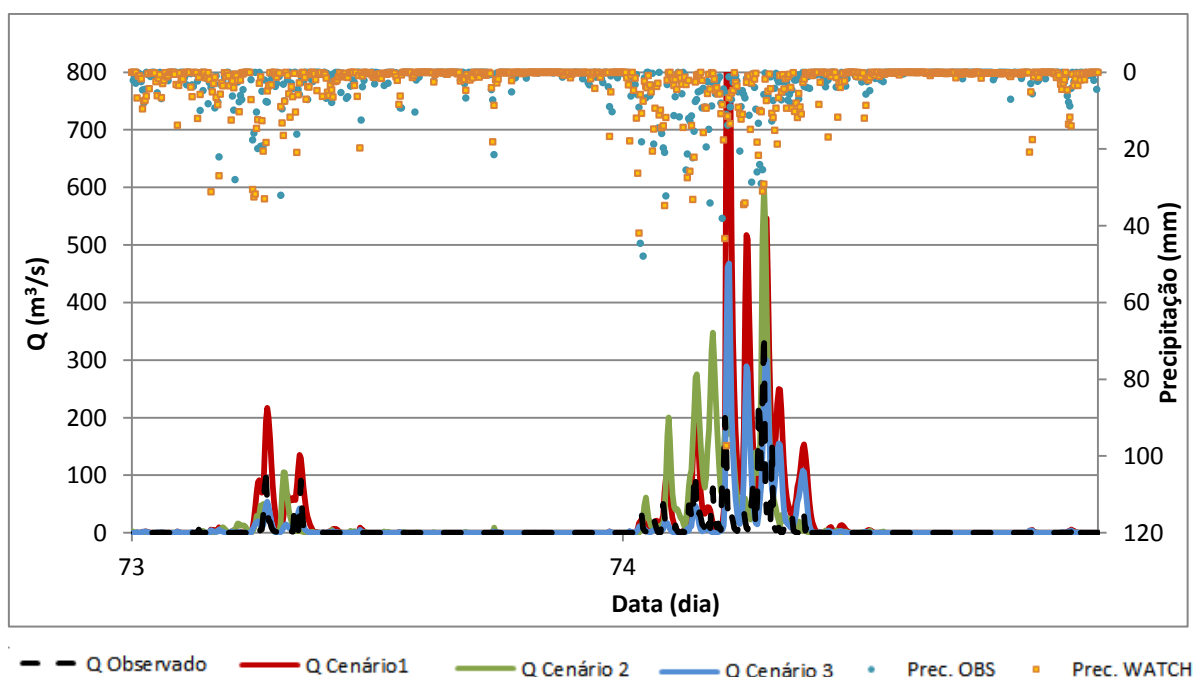
Os resultados para o período de calibração utilizando resultados das simulações indicam que o cenário 1 superestima as vazões. A Figura 44 ilustra os resultados para a estação de controle de Afogados da Ingazeira para um ano seco (1966) e um ano chuvoso (1967).

Figura 44 – Calibração dos cenários 1, 2 e 3 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira



Para o período de validação do modelo foram apresentadas as mesmas tendências encontradas no período de calibração, onde o cenário 1 apresentou incrementos nas vazões. A Figura 45 ilustra os resultados para a estação de controle de Afogados da Ingazeira para um ano seco (1973) e um ano chuvoso (1974). Este comportamento dos cenários foi observado para as outras estações de controle.

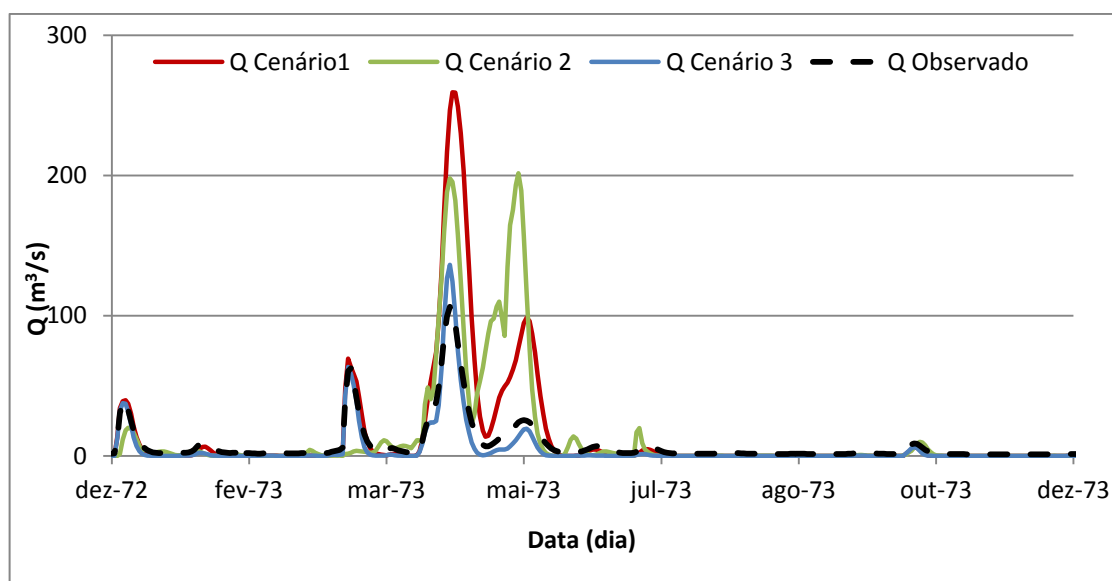
Figura 45 – Validação dos cenários 1, 2 e 3 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira



A partir das simulações realizadas pode-se constatar que os melhores resultados encontrados para o período de calibração e validação estão presentes nas simulações do cenário 3. Fato que foi constatado após a avaliação da qualidade dos resultados estatísticos das simulações dos cenários de vazão natural (Tabela 19) conforme classificação de desempenho descrita na Tabela 10, onde se observou que os cenários 1 e 2 não apresentaram bons desempenhos para o período de calibração, comparados com os dados de vazão da estação fluviométrica, tanto utilizando dados climáticos do WATCH ERA40 como os dados observados.

O mesmo observa-se no período de validação. Porém, o cenário 3 utilizando dados do WATCH ERA40 ajustados, apresentou resultados melhores para a maior parte dos índices estatísticos e para todas as estações de controle. A Figura 46 ilustra os resultados das simulações de estação de Floresta para o ano de 1973. Onde é evidenciado a afirmação que o cenário 3 apresenta a melhor resposta, se aproximando das vazões observadas na estação de controle.

Figura 46 – Resposta do modelo às variações de precipitação



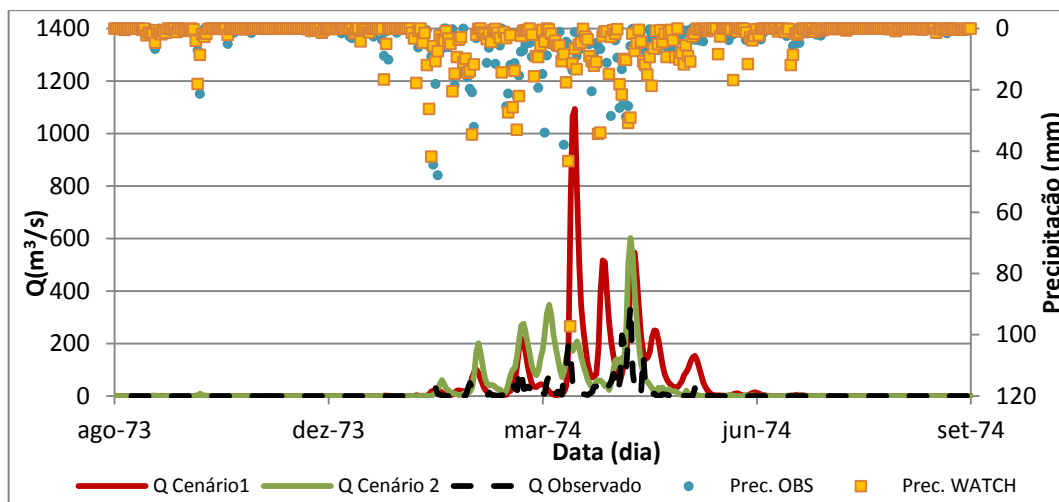
Fonte: A Autora (2019).

Apesar de alguns anos, principalmente os anos considerados secos, apresentarem resultados insatisfatórios, pode-se considerar que o modelo apresenta respostas aproximadas ao comportamento natural da bacia, uma vez que as respostas da vazão, às variações de precipitação, são observadas nas simulações.

Como ilustrado na Figura 47, onde as vazões simuladas no cenário 1 estão corretamente relacionadas a precipitação registrada nos dados do WATCH ERA40, a exemplo

do pico de vazão simulada no dia 25 de março de 1974, para a estação de afogados da Ingazeira, percebe-se que neste mesmo dia registrou-se uma precipitação de 93 mm.

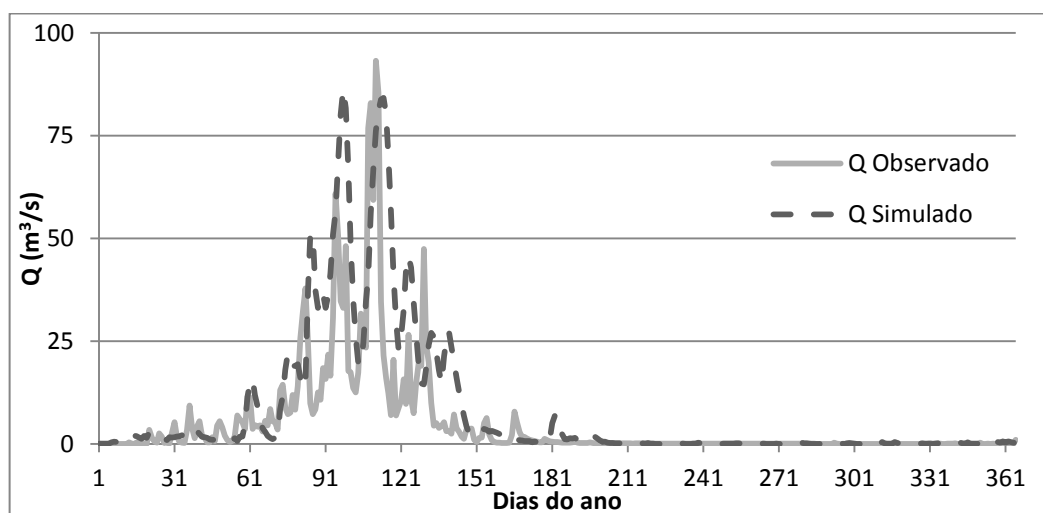
Figura 47 – Resposta do modelo às variações de precipitação



Fonte: A Autora (2019).

Corroborando com as afirmações anteriores, foi realizada uma análise utilizando as vazões médias diárias de longo termo, onde observou-se que a resposta do modelo se aproxima das vazões observadas. A Figura 48 apresenta a média de longo termo para a estação de Afogados da Ingazeira (1965 a 1974), utilizando os resultados das simulações do cenário 3.

Figura 48 – Média de longos anos para a estação de Afogados da Ingazeira



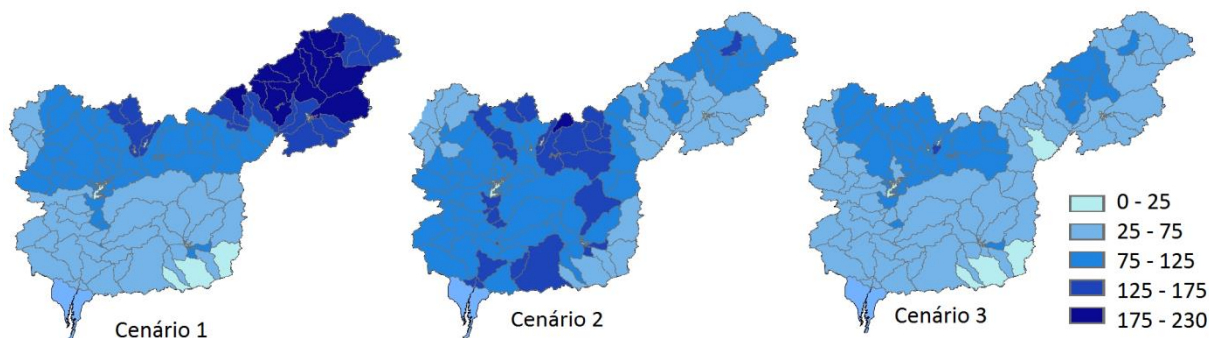
Fonte: A Autora (2019).

Os resultados indicam que o modelo representa de forma satisfatória a realidade da bacia, principalmente os resultados do cenário 3.

4.2 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS

Bressiani et al., (2015a) afirmam que a escolha dos dados climáticos é uma etapa importante da modelagem, pois a variabilidade climática tem um impacto substancial sobre sistemas hidrológicos, a seleção da variabilidade climática e seus impactos hidrológicos é um grande desafio no desenvolvimento de um modelo hidrológico. Neste sentido, visando avaliar a interferência dos dados climáticos na modelagem, foram avaliadas as influências destes dados nas simulações com os cenários: 1, 2 e 3. Ambos utilizando o hidrotopo 1 e os dados do WATCH ERA40 originais, dados observados e WATCH ERA40 ajustado, para gerar os cenários 1, 2 e 3 respectivamente (Figura 49).

Figura 49 – Escoamentos totais médios anuais (mm/ano) simuladas nos cenários 1, 2 e 3, por sub-bacia.



Fonte: A Autora (2019).

Analizando os dados gerados nos três cenários, percebe-se que as vazões médias diárias geradas para a foz da bacia, para o período de vazão natural (1964 a 1982), com os cenários: 1, 2 e 3, foram respectivamente, 40,35 m³/s 42,30 m³/s e 25,80 m³/s. O resultado encontrado no cenário 3, se aproxima do valor de 26,2 m³/s, encontrado nas simulações realizadas por SECTMA (1998), para o mesmo período. Já o resultado encontrado no cenário 1 refletiu os elevados valores de precipitação dos dados do WATCH ERA40 para a bacia do rio Pajeú. E com relação aos resultados do cenário 2, o incremento de vazão encontrado nas simulações, está relacionado à falta de estações de monitoramento pluviométrico na região sul da bacia, o que levou a utilizar estações muito distantes, com maiores valores de precipitação, durante a fase de interpolação.

Ao comparar os resultados das simulações de cada cenário com os valores médios diários observados nas estações de controle de Afogados da Ingazeira, Flores, Serrinha, Floresta, Serra Talhada e Ilha Grande, percebeu-se que o cenário 1 apresentou um incremento

na vazão de aproximadamente 86%. O cenário 3 foi o que mais se aproximou dos dados observados, superestimando os dados em apenas 2%. Seguido do cenário 2, que superestimou as vazões em 34%. Corroborando com a afirmação que os dados climáticos, principalmente a precipitação tem impacto significativo nas simulações, podendo super ou subestimar os resultados. Nesta pesquisa o cenário construído com os dados do WATCH ERA40 ajustados apresentou um melhor desempenho.

Relacionando os dados gerados pelos cenários: 1, 2 e 3, com os dados de clima, pode-se constatar a influência destes dados nas simulações, uma vez que o cenário que apresentou maiores vazões (cenário 1) foi o que mais superestimou os dados de precipitação.

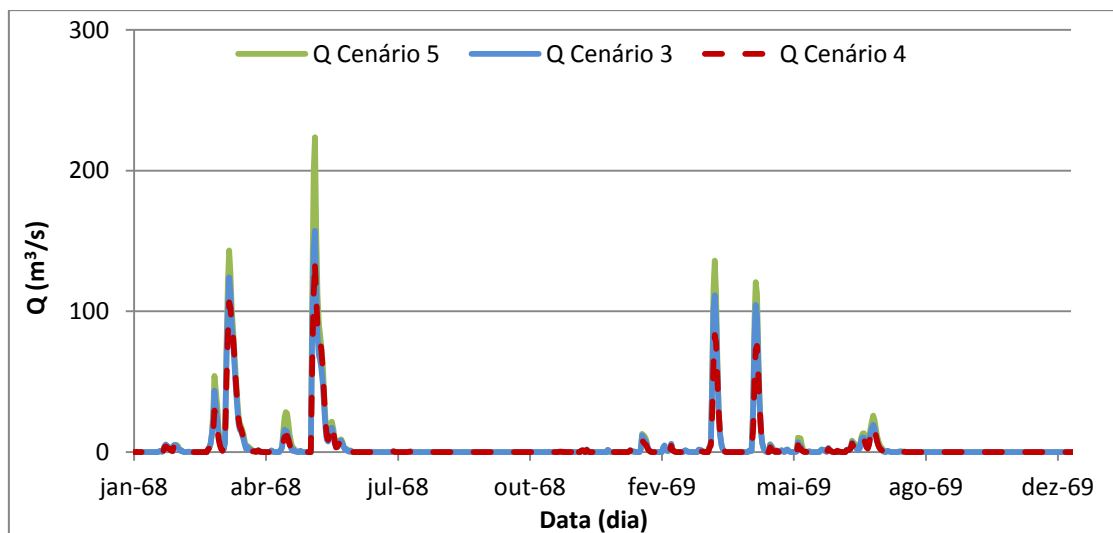
Discutindo a qualidade da simulação do cenário 1, é preciso destacar que a utilização dos dados climáticos globais do WATCH ERA40, com uma resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ pode super ou subestimar alguns eventos locais, por exemplo, eventos extremos de precipitação ou efeitos locais (Koch, et al., 2018b). Porém, esta aplicação foi necessária, nesta pesquisa, uma vez que os dados climáticos gerados pelas estações de monitoramento brasileiras não estão espacialmente bem distribuídas na área da bacia, com destaque para a escassez de estações, principalmente na região do baixo Pajeú. A partir do ajuste dos dados do WATCH ERA40 para a construção do cenário 3, algumas dessas incertezas foram minimizadas e com isso foi possível obter melhores resultados comparando os três cenários.

Para investigar a influência do uso da terra na modelagem, utilizando os cenários com dados climáticos do WATCH ERA40 ajustado, realizou-se análises a partir das simulações para o período de vazão natural (1964 a 1975). Foram comparados dados calibrados com os mesmos parâmetros para os cenários 3, 4 e 5, utilizando dados de uso da terra do Mapbiomas 1985, Modis 2010 e IBGE 2015 respectivamente, os resultados apresentaram um incremento na vazão do modelo no cenário 5 para todas as regiões de controle, exemplificado na Figura 50, com dados da estação de controle de Afogados da Ingazeira.

Nestas simulações do cenário 5 percebe-se uma redução nas vazões médias diárias da bacia, para o período de 1964 a 1982, de 3% (comparado com os dados do cenário 3), neste cenário 21% da área da bacia é ocupada por pastagem. Já no cenário 4, houve um decréscimo na vazão de 18% (comparado com os dados do cenário 3). Neste cenário aproximadamente 89% da área é ocupado com vegetação, o que corresponde 13% a mais de áreas com vegetação, comparado com as mesmas áreas dos cenário 3 e 5. No cenário 3 aproximadamente 23% da área é utilizada para agricultura como apresentado na Tabela 14.

Esta análise indica que os dados de uso da terra influenciam nos resultados das simulações de vazão.

Figura 50 – Vazões simuladas nos cenários 3, 4 e 5 para o ponto de controle de Afogados da Ingazeira



Fonte: A Autora (2019).

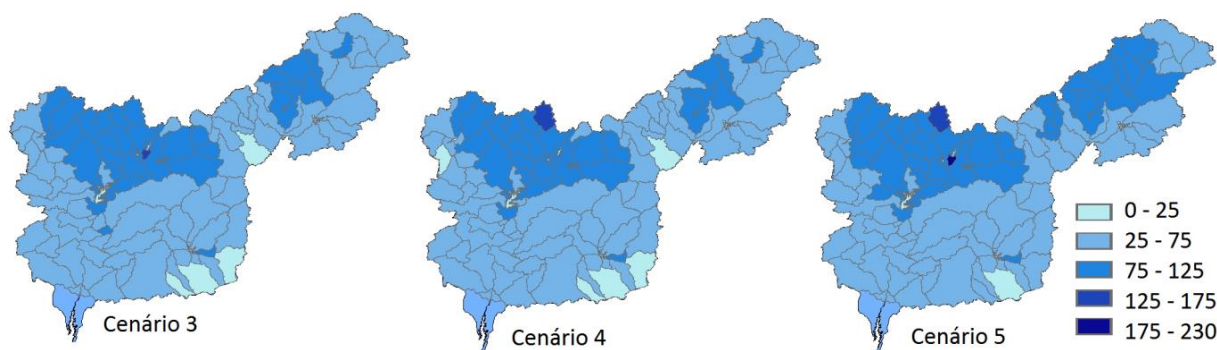
Ratificando as afirmações de Silva et al., (2016) e Baker e Miller, (2013), que investigaram a influência do uso da terra na modelagem e constataram que as mudanças no uso da terra da região, sobretudo com redução de áreas florestadas, têm gerado aumento do escoamento superficial e diminuição da recarga subterrânea, refletindo, significativamente, e, negativamente, no sistema fluvial, principalmente, naqueles onde o escoamento é efêmero.

Neste sentido, percebeu-se uma influência significativa da variação do uso da terra nas simulações, visto que, as vazões simuladas nos cenários com maior intervenção humana seja por agricultura (cenário 3) ou pecuária (cenário 5) superaram em 18% e 24% respectivamente, as vazões simuladas no cenário 4, considerado mais natural, com a maior parte da área coberta por florestas.

Os resultados encontrados nas simulações indicaram um bom desempenho do modelo SWIM, uma vez que apresentaram respostas aproximadas as esperadas quanto à variação de dados de clima e de uso da terra. Além de destacar a influência dos dados do uso da terra nas simulações.

Nos cenários que utilizaram maiores valores de precipitação, as vazões também foram superestimadas. Com relação aos usos da terra, um cenário com mais desmatamento, seja para pecuária ou agricultura, resultaram num incremento na vazão (Figura 51).

Figura 51 – Escoamentos totais médios anuais (mm/ano) simuladas nos cenários 3, 4 e 5, por sub-bacia.



Fonte: A Autora (2019).

4.3 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS COM RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO DA ÁGUA

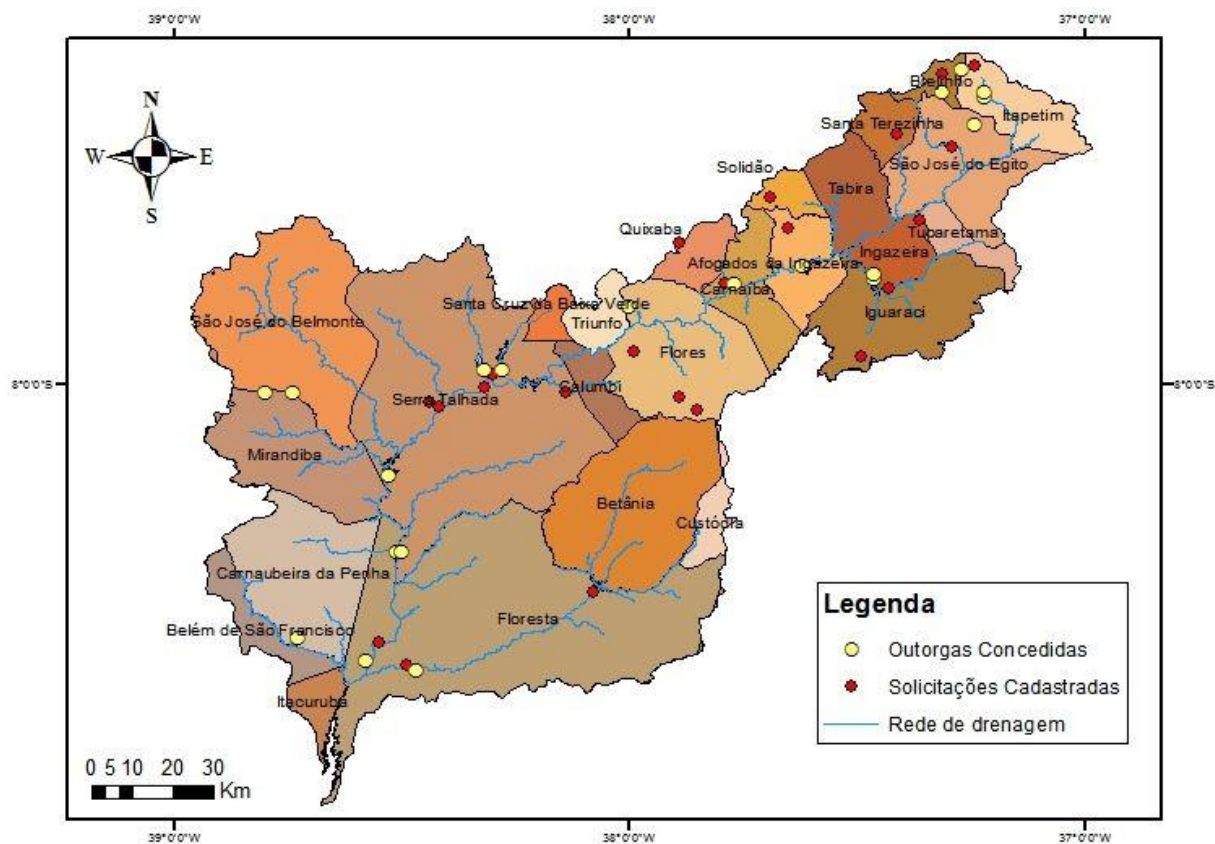
Após a calibração e validação para descargas naturalizadas, foram incluídos os reservatórios e as retiradas de água, os locais e quantidades de retirada de água são mostrados no apêndice III. As principais características dos maiores reservatórios são apresentadas no apêndice IV. Nesta etapa foram criados três cenários: 6, 7 e 8. O cenário 6 construído com os dados climáticos do WATCH ERA40 ajustado, hidrotopo 1 e outorgas concedidas, o 7 elaborado com os dados climáticos observados, hidrotopo 1 e outorgas concedidas, estas estão localizadas conforme ilustrado na Figura 52.

Observou-se que as outorgas concedidas na bacia do rio Pajeú correspondem a uma retirada de água de aproximadamente $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo 91% delas para fins de abastecimento público das cidades: Serra Talhada, Ingazeira, Brejinho, Carnaíba, Flores, Itapetim e Mirandiba. 8% é destinado para irrigação, principalmente na cidade de Floresta e 1% destinado para indústrias.

Já o cenário 8 foi criado com os dados climáticos observados, hidrotopo 1 e as demandas de uso da água cadastradas na APAC que foram deferidas ou indeferidas, caracterizando a demanda de uso de água da bacia, estas retiradas de água estão ilustradas na Figura 52.

Os dados dos reservatórios foram adquiridos junto a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Nesta pesquisa foram utilizadas as informações dos reservatórios de Arrodeio (2004 a 2015), Barra do Juá (1994 a 2015), Brotas (1994 a 2015), Cachoeira II (1997 a 2015), Jazigo (2000 a 2015), Rosário (1994 a 2015), Saco I (2012 a 2015), São José II (2001 a 2015) e Serrinha II (2005 a 2015), porém uma das dificuldades encontrada está relacionada às falhas nos dados observados.

Figura 52 – Localização das retiradas de água outorgadas e solicitadas na bacia e incluídas no modelo SWIM.



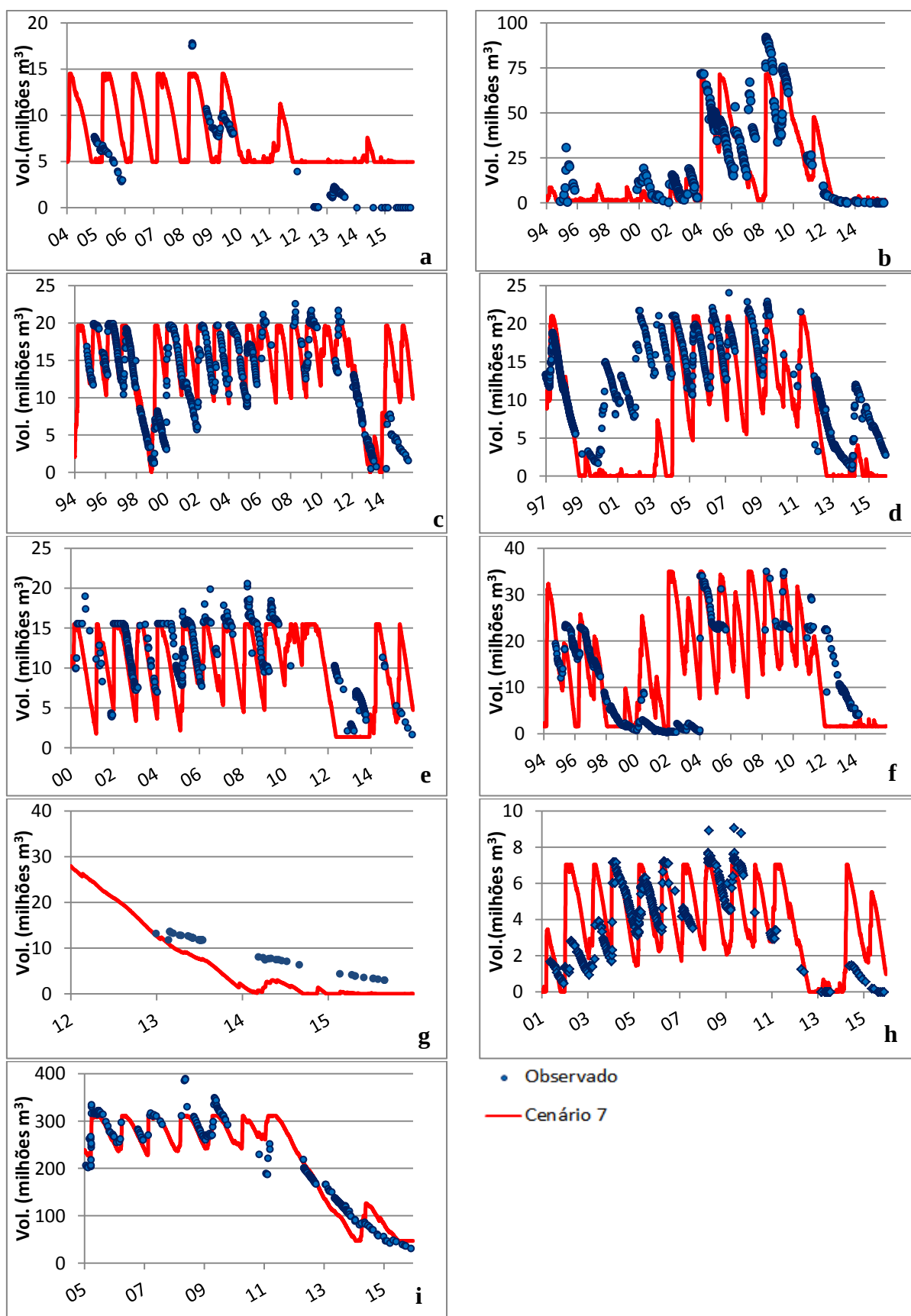
Fonte: A Autora (2019).

Os resultados das simulações para o cenário 7 indicaram uma resposta aproximada dos volumes simulados ao comparar com os volumes observados nas estações de monitoramento (Figura 53). A quantidade de falhas nas séries históricas dos dados observados dificultou uma melhor análise das simulações dos reservatórios de Arrodeio (Figura 53a) e Saco (Figura 53g).

Além da dificuldade com as falhas nos dados observados, existe uma dificuldade maior para obtenção de bons resultados durante a calibração e validação quando as simulações são em bacias hidrográficas com muitos reservatórios, transferências e usuários de água (WANG e XIA, 2010).

Essas dificuldades na calibração podem ser influenciadas pelas operações de reservatório de curto prazo durante inundações, onde as tomadas de decisão precisam ser rápidas e pelas retiradas de água reais diferentes dos valores planejados ou superiores aos valores permitidos.

Figura 53 – Simulações do cenário 7.



Fonte: A Autora (2019).

A aplicação dos dados oficiais para a capacidade máxima nas simulações leva a desvios entre os volumes observados e simulados do reservatório e uma superestimação nas simulações nos altos fluxos a jusante das barragens.

Em alguns casos percebe-se que a capacidade máxima dos reservatórios, estipulada na ficha técnica dos reservatórios, e utilizada como capacidade máxima nas simulações, é superada frequentemente durante os altos fluxos. Fato observado nos reservatórios: Barra do Juá (Figura 53b), Brotas (Figura 53c), Cachoeira (Figura 53d), Jazigo (Figura 53e), Rosário (Figura 53f), São José II (Figura 53h) e Serrinha II (Figura 53i).

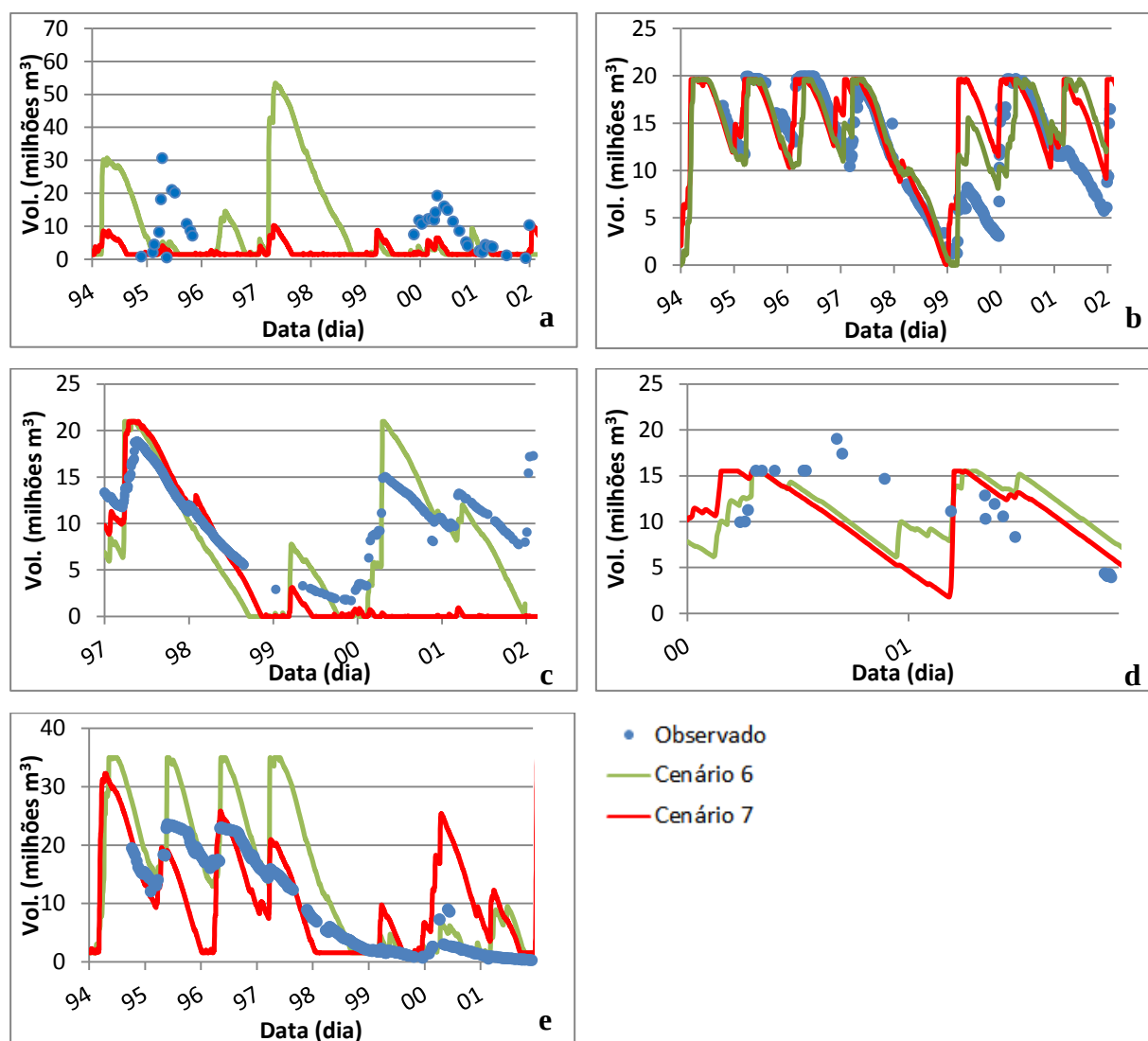
Desvios entre observações e resultados de simulação também vêm de inúmeros reservatórios de pequeno a médio porte, não inclusos. Segundo SECTMA (1998), para a bacia do rio Pajeú, existem 30 reservatórios com capacidade acima de 1 milhão de m³ de água, sendo a barragem de Serrinha II a que possui maior potencial de armazenamento com 311 milhões de m³. Nesta pesquisa, apenas os nove maiores reservatórios foram incluídos. Uma das principais dificuldades na inclusão dos demais está relacionada à falta de dados para ajuste do modelo.

Destacou-se ainda a existência de volumes observados muito baixos, principalmente para o reservatório de Arrodeio (Figura 53a), com volumes abaixo do volume morto, para o período de 2012 a 2015, e São José II (Figura 53h) para o período de 2014 a 2015. Este fato pode ter sido provocado pela influência da evaporação, já que se trata de reservatórios menores, por isso, mais vulneráveis a este tipo de influência. Ou ainda pode ter sido provocado por retiradas de água não cadastradas.

Comparando os resultados das simulações do cenário 7 com as do cenário 6, gerados com dados dos reservatórios de: Barra do Juá (Figura 54a), Brotas (Figura 54b), Cachoeira II (Figura 54c), Jazigo (Figura 54d), e Rosário (Figura 54e), observou-se uma elevação nos volumes gerados pelo cenário 6. Esta variação está ligada a influência das fontes de dados climáticos, uma vez que os cenários foram construídos com fontes distintas, o cenário 6 com os dados do WATCH ERA40 ajustado e o cenário 7 com dados observados.

Esta variação entre os cenários 6 e 7 ficou mais evidenciada nos resultados para os reservatórios de Cachoeira II, nos anos de 2000 a 2002, e de Barra de Juá, de 1997 a 1998. Esta constatação reforça a afirmação da influência dos dados climáticos nas simulações, principalmente da precipitação, uma vez que estes cenários foram criados utilizando dados climáticos distintos.

Figura 54 – Comparação das simulações dos cenários 6 e 7.

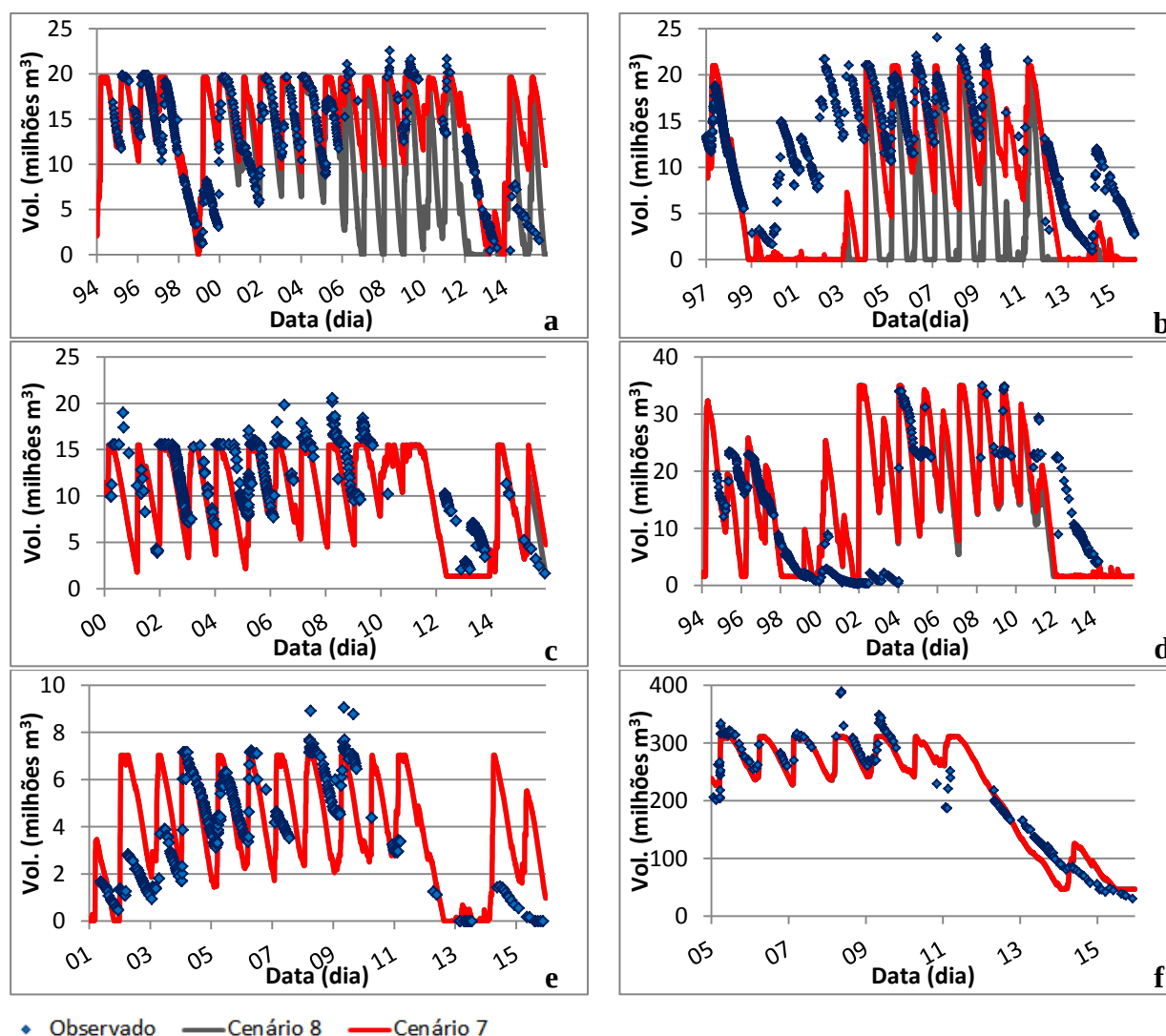


Fonte: A Autora (2019).

Após analisar um cenário mais próximo da realidade atual da bacia do ponto de vista de retirada de água (cenário 7), um cenário mais permissível no tocante a retirada de água da bacia (cenário 8) foi criado.

Este novo cenário considerou as retiradas de água outorgadas, incluídas no cenário 7, e acrescentou as solicitações de retirada de água na bacia, cadastradas na APAC, porém não atendidas por diversos motivos técnicos. Totalizando 54 pontos de retirada de água, correspondente a $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão retirada (Figura 55).

Figura 55 – Comparação das simulações dos cenários 7 e 8.



Fonte: A Autora (2019).

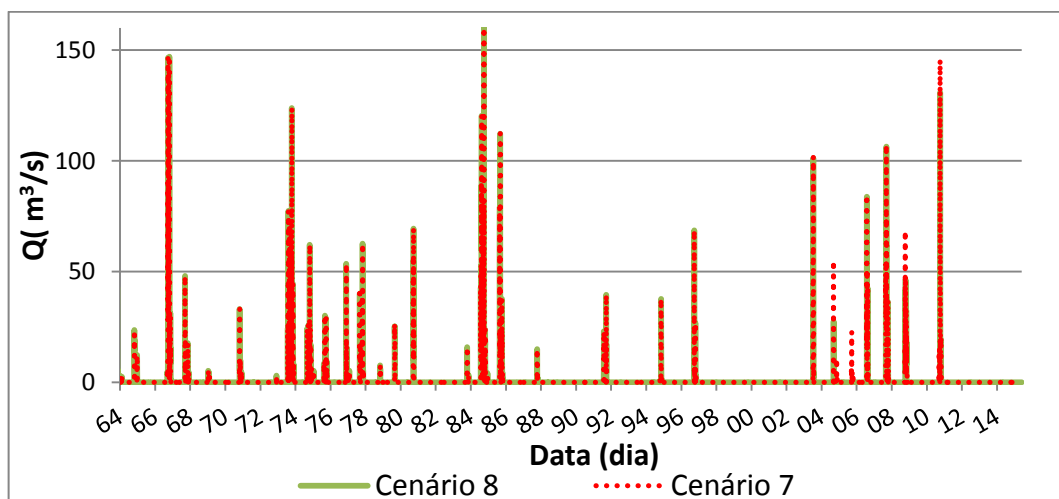
Os resultados das simulações apresentaram alterações nos volumes dos reservatórios de Brotas (Figura 55a), Cachoeira II (Figura 55b), Jazigo (Figura 55c), Rosário (Figura 55d), São José II (Figura 55e) e Serrinha II (Figura 55f).

Neste cenário o principal uso da água é abastecimento público, responsável por 59% das solicitações. Observou-se também que o maior impacto de retirada de água ocorreu no reservatório de Cachoeira II (Figura 55b), localizado no município de Serra Talhada, com uma redução do volume de aproximadamente 48% no período analisado, seguido pelo reservatório de Brotas (Figura 55a), localizado no município de Afogados da Ingazeira, com uma redução de volume de aproximadamente 22%.

Esta constatação indicou que o cenário 8, que considerou o atendimento a todas as demandas cadastrada na APAC até o ano de 2015, impactaria consideravelmente o volume

dos reservatórios de Cachoeira II e Brotas, os mesmos chegam a secar em alguns períodos dos anos. Estas influências são mais evidenciadas a partir do ano de 2005 para ambos os reservatórios, a Figura 56, ilustra os resultados para o reservatório de Cachoeira II.

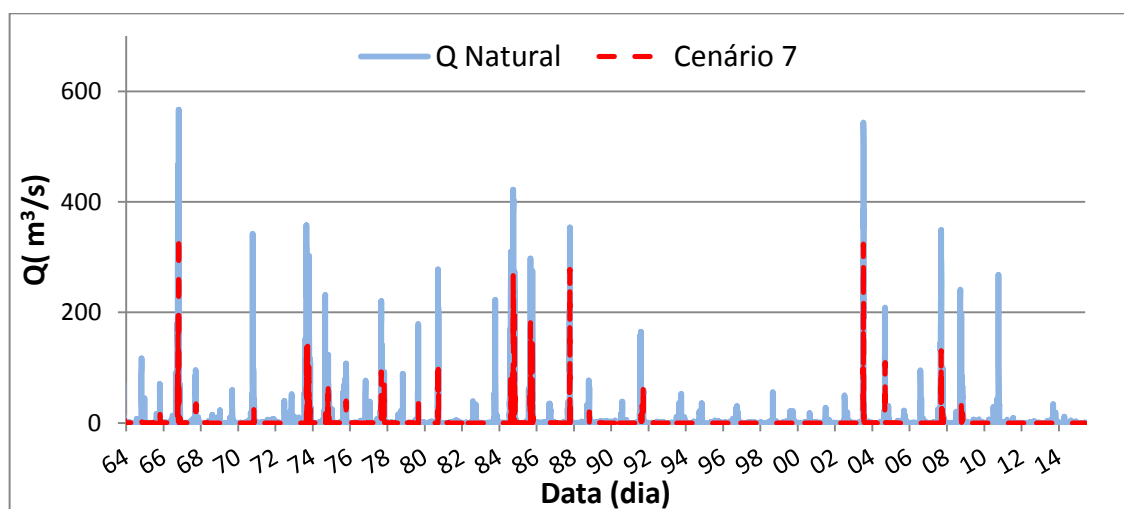
Figura 56 – Comparação das simulações dos cenários 7 e 8 para o reservatório de Cachoeira II.



Fonte: A Autora (2019).

No tocante à influência das retiradas de água nas vazões simuladas observa-se uma redução significativa nas simulações dos cenários com retirada de água (cenário 7) ao comparar com os resultados das simulações com vazões naturais (cenário 2). A Figura 58 ilustra esta relação para a estação de Ilha Grande localizada a jusante do reservatório de Barra de Juá.

Figura 57 – Comparação das simulações do cenário 7 com as vazões naturais do cenário 2 (Q_{natural}).



Fonte: A Autora (2019).

Os resultados indicam que a bacia do rio Pajeú tem demanda de água superior à disponibilidade, mesmo considerando a existência dos reservatórios. As vazões se aproximam de zero frequentemente. Analisando as vazões médias diárias geradas para a estação de Afogados da Ingazeira, no período de 1964 a 2015, percebeu-se uma redução de $7,4 \text{ m}^3/\text{s}$ para $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ do cenário 2 (natural) para o cenário 7 (atual), mostrando que o conjunto de reservatórios e a demanda de retirada de água da bacia acarretam uma redução significativa. Na prática, isto significa que alguns trechos do rio estão secando com alguma frequência, o que não ocorre no cenário natural, evidenciando a necessidade de ações de gestão deste recurso, na tentativa de minimizar conflito entre demanda e oferta de água na Bacia.

Os resultados encontrados nos cenários 7 e 8, para a foz da bacia do rio Pajeú, período de 1964 a 2015, indicaram vazões de $28,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e $27,80 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, demonstrando que não houve variações significativas neste trecho da bacia entre estes cenários. Porém ao comparar os resultados dos cenários 7 e 8 com os simulados no cenário 2 ($32,83 \text{ m}^3/\text{s}$), percebeu-se uma redução nas vazões de aproximadamente 15%. Esta redução indica a influência dos retiradas da água no balanço hídrico da bacia.

Percebeu-se que as reduções mais significativas nas vazões foram nos trechos da bacia do rio Pajeú com menores vazões, a exemplo a região de Afogados da Ingazeira e de Ilha Grande.

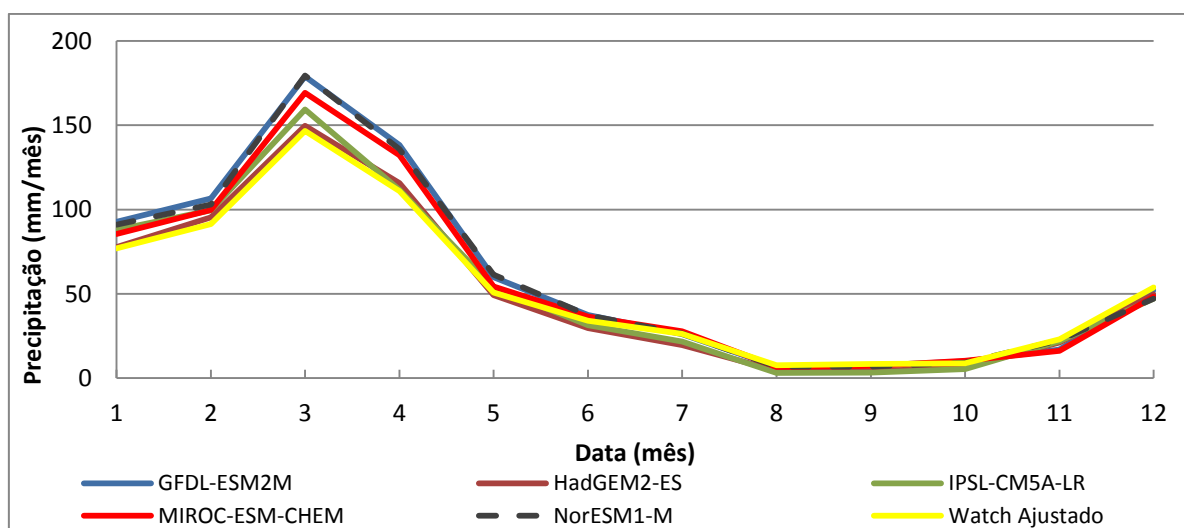
4.4 PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

Os resultados das simulações dos cenários futuros serão descritos nesta seção.

4.4.1 Representação da dinâmica histórica das descargas pelo SWIM, impulsionada por modelos climáticos para o período de referência (1976 a 2005)

Após a escolha dos GCMs do CMIP5 que foram utilizados nesta pesquisa, quais sejam: HadGEM2-ES ajustado, IPSL-CM5A-LR ajustado, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M e NorESM1-M, analisou-se a média de longo termo da precipitação, para o período de referência de 1976 a 2005 com o objetivo de identificar a tendência de cada modelo (Figura 58).

Figura 58 – Médias de longo termo das precipitações geradas pelos ESM.

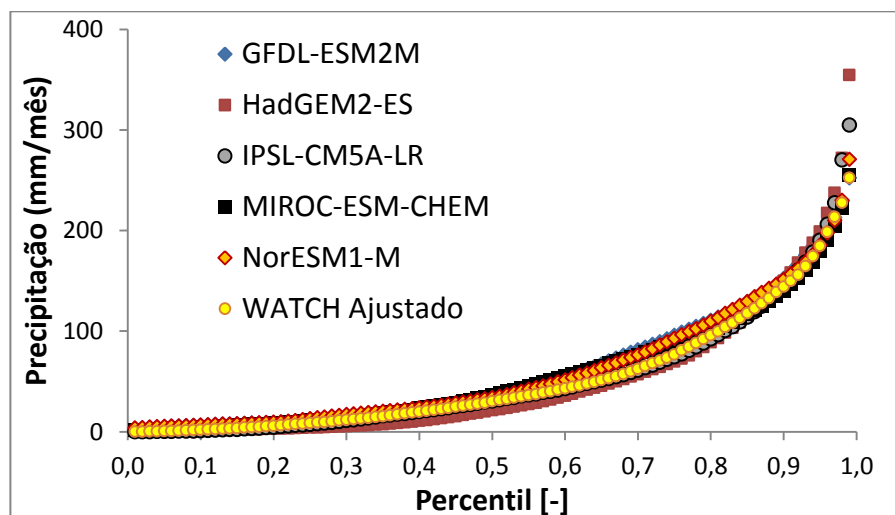


Fonte: A Autora (2019).

Observou-se uma diminuição nas médias de longo termo nos dados de precipitação, principalmente nos meses mais chuvosos, dos cenários dos modelos HADGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR, após o ajuste descrito na metodologia, os mesmos são os modelos que mais se aproximam dos dados de precipitação do WATCH ERA40 ajustado. Destaca-se ainda que os modelos GFDL-ESM2M e NORESM1-M foram os que mais superestimaram os valores ao comparar com os dados do WATCH ERA40 ajustados.

Porém, apesar modelos HADGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR se aproximarem dos valores do WATCH ERA40 ajustados na análise da média de longo prazo, ao comparar os percentis de cada modelo observou-se que os mesmos apresentam valores muito altos em relação aos demais modelos (Figura 59).

Figura 59 – Análise dos percentis das precipitações geradas pelos modelos.



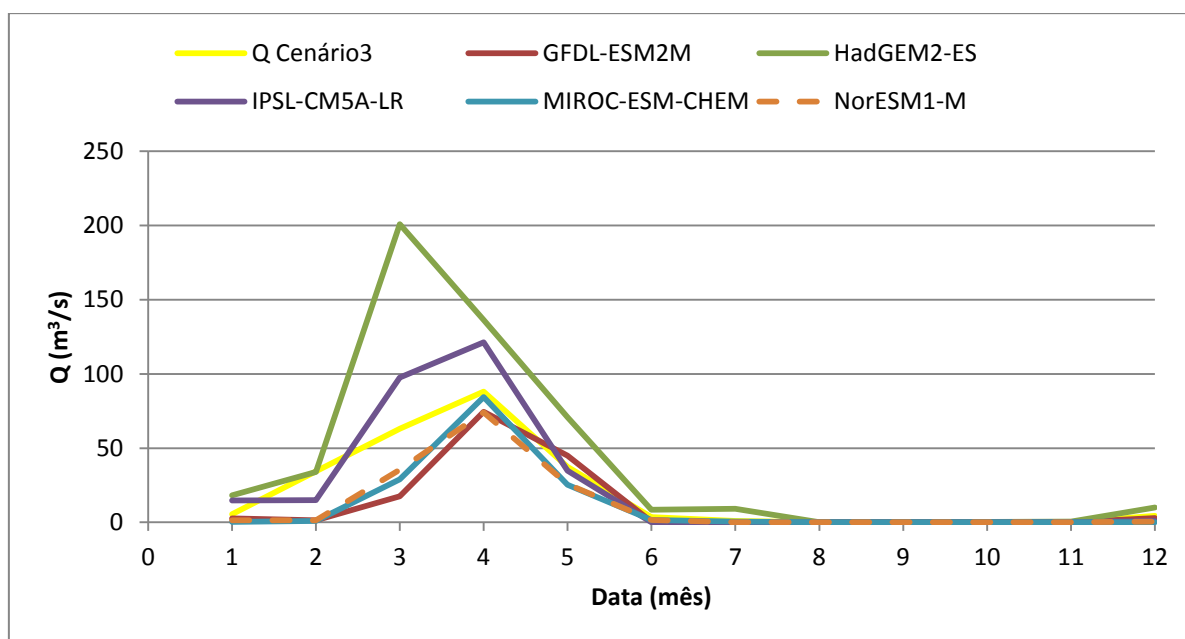
Fonte: A Autora (2019).

Estas análises indicaram que os modelos HADGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR apresentam precipitações muito discrepantes para a região da bacia do rio Pajeú, pois mesmo com os ajustes realizados, existem alguns meses/anos extremamente chuvosos e outros meses/anos extremamente secos.

Após a análise dos dados de precipitação dos modelos climáticos, verificou-se o desempenho do modelo SWIM, no período de referência de 1976 a 2005, comparando os dados gerados pelas simulações dos cenários 9, 10, 11, 12 e 13, que usaram respectivamente os modelos GFDL-ESM2M, HADGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM e NORESM1-M, com os dados gerados no cenário 3.

Os resultados da média de longo termo para a bacia do rio Pajeú indicaram uma maior dispersão dos valores das vazões simuladas com dados do WATCH ERA40 e as geradas com dados dos cenários climáticos nos meses mais chuvosos, quais sejam março e abril. Identificou-se ainda que os incrementos nas vazões simuladas, ocorreram principalmente nos cenários 10 e 11, como ilustrado na Figura 60.

Figura 60 – Médias de longo termo das vazões geradas pelos ESM.



Fonte: A Autora (2019).

Essa tendência também foi observada para regiões de controle de Afogados da Ingazeira, Flores e Serra Talhada, a exemplo da região de Afogados da Ingazeira, onde a vazão média diária simulada pelo cenário 3, com dados do WATCH ERA40 ajustado, para o período de 1972 a 2001, foi de 4,81 m³/s. Já as vazões simuladas, para o período de

referência, nos cenários: 9, 10, 11, 12 e 13 foram respectivamente 5,95 m³/s, 13,58 m³/s, 7,84 m³/s, 6,65 m³/s e 5,97 m³/s. Estes resultados apresentaram incrementos na vazão, sendo a menor diferença (aproximadamente 19%) observada nos cenários 9 e 13, gerados com os modelos climáticos GFDL-ESM2M e NorESM1-M. E a maior diferença foi encontrada no cenário 10 (aproximadamente 65%), elaborado com os dados do modelo climático HadGEM2-ES ajustado.

As melhores simulações foram encontradas na região sul do município de Serra Talhada próximo ao açude Serrinha, onde a vazão média diária gerada no cenário 3 foi de 12,68 m³/s e as vazões encontradas nos cenários 9 e 13 foram de 12,68 m³/s e 12,11 m³/s respectivamente.

Analisando as vazões simuladas para a região da foz da bacia do rio Pajeú para o período de 30 anos (1976 a 2005), observou-se uma vazão média diária de aproximadamente 17,64 m³/s gerada no cenário 3. Já para as vazões geradas com os dados dos cenários climáticos, para o período de referência, percebeu-se uma redução das vazões dos cenários 9 (aproximadamente 26%), 12 (aproximadamente 66%) e 13 (aproximadamente 35%). E um incremento nas vazões dos cenários 10 e 11 de aproximadamente 59% e 24% respectivamente.

De forma geral, os cenários 9, 12 e 13 subestimam as vazões geradas nas regiões mais próximas da foz da bacia, e superestimam as mesmas na região mais a norte. Nesta região os dados de precipitação do WATCH-ERA40 apresentam precipitações elevadas, o que pode influenciar nos resultados das vazões simuladas. Foram encontrados os melhores ajustes na região central da bacia. Já os cenários 10 e 11 superestimaram as vazões em todas as regiões de controle, indicando que estes modelos podem ser considerados mais chuvosos.

4.4.2 Análise das vazões geradas sobre efeito das mudanças climáticas

Concluída a análise dos dados climáticos para o período de referência de 1976 a 2005, foram escolhidos dois modelos climáticos para apresentar os resultados da projeção dos efeitos das mudanças climáticas: o HADGEM2-ES e o MIROC-ESM-CHEM, a escolha destes cenários se baseou na análise do período de referência, onde o HADGEM2-ES se apresentou mais chuvoso e o MIROC-ESM-CHEM mais seco.

Para essa etapa foram gerados, no modelo SWIM, quatro cenários: dois considerando o cenário mais otimista, o RCP2.6 (cenários 14 e 15) e dois considerando um cenário mais pessimista RCP8.5 (cenários 16 e 17).

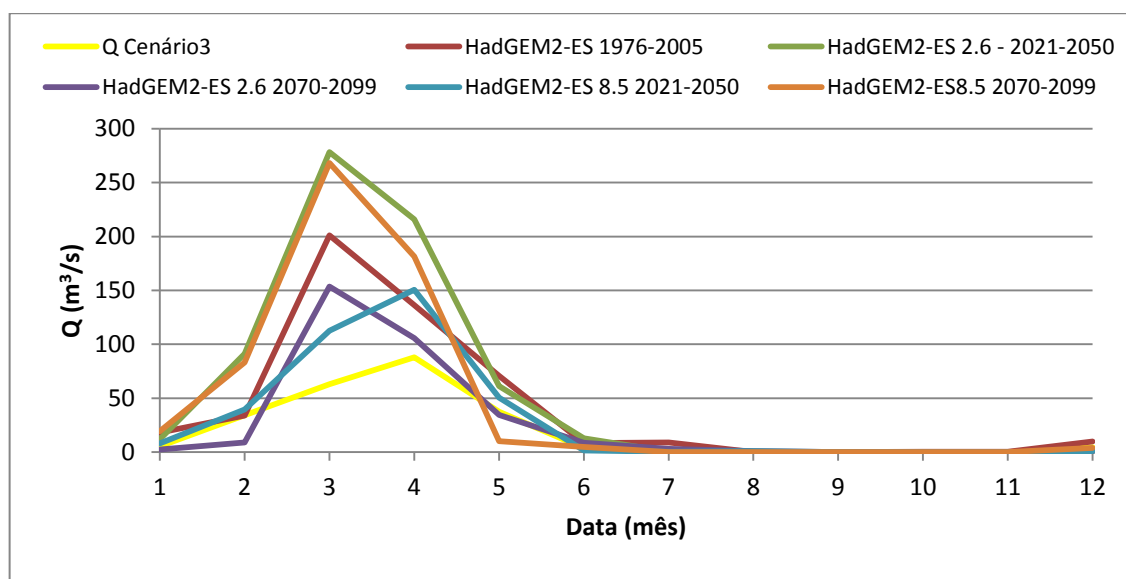
O cenário 14 foi criado utilizando o modelo HADGEM2-ES e a projeção climática do RCP2.6, o cenário 15 usou o modelo MIROC-ESM-CHEM e a projeção climática do RCP2.6. Já o cenário 16 aplicou o modelo HADGEM2-ES e a projeção climática do RCP8.5 e o cenário 17, gerado com o MIROC-ESM-CHEM e a projeção climática do RCP8.5.

Estes quatro cenários foram analisados em dois intervalos de tempo distintos, ambos para um período de 30 (trinta) anos. O primeiro, considerado um futuro próximo, de 2021 a 2050, e o segundo, um futuro mais distante de 2070 a 2099.

A Figura 61 ilustra os resultados da dinâmica média anual de descarga natural de longo termo, para a foz da bacia do rio Pajeú, nos intervalos de tempo intermediário, futuro próximo, (2021 a 2050) e futuro distante (2070 a 2099) e o período de referência (1976 a 2005), todos impulsionados pelas projeções climáticas no cenário RCP2.6 e RCP 8.5.

Comparando os resultados encontrados nos cenários impulsionados pelo RCP 2.6 e RCP8.5 com os do cenários de referência (1976 a 2005), observou um aumento significativo da vazão ao longo do ano para a foz do rio Pajeú nos cenários: HADGEM2-ES RCP2.6, para o futuro próximo (2021 a 2050), e HADGEM2-ES RCP8.5, para um futuro distante (2070 a 2099). Identificou-se ainda uma permanência na sazonalidade, em particular, o pico de descarga deve ocorrer aproximadamente no mês de março, com exceção das projeções do cenário do futuro próximo (2021-2050) para cenário RCP8.5 que manteve a tendência no mês de abril, em consonância com a vazão de pico do cenário 3.

Figura 61 – Médias de longo termo das vazões naturais geradas pelo ESM HADGEM2-ES.



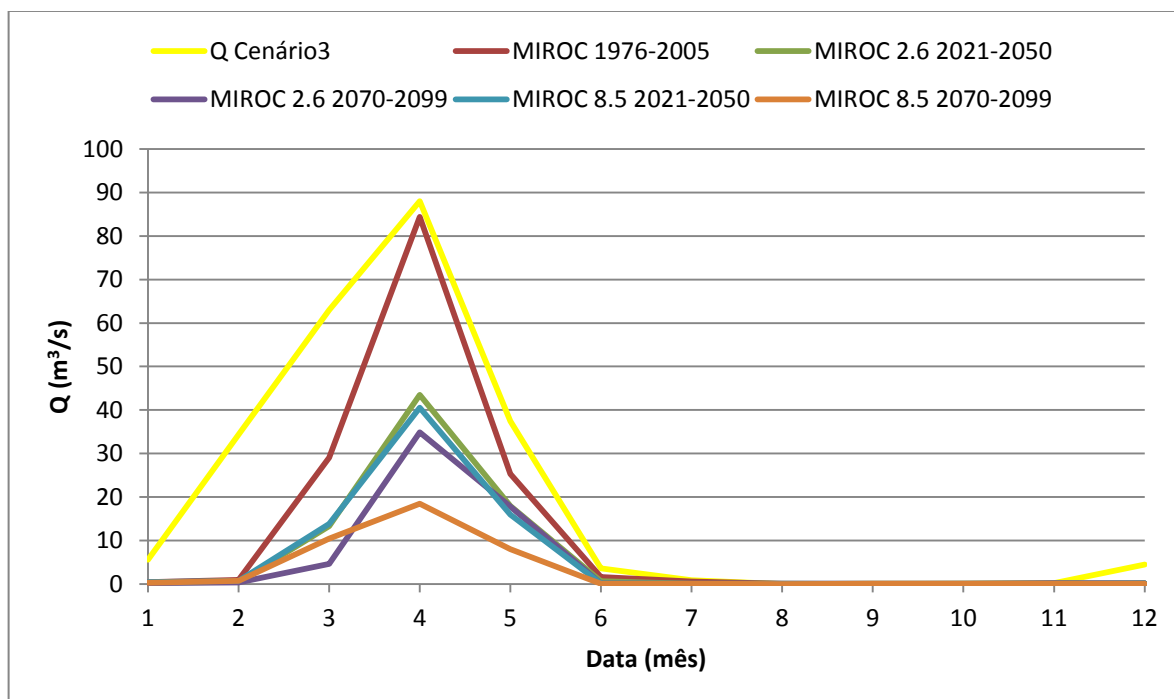
Fonte: A Autora (2019).

A diferença entre os períodos de futuro próximo e futuro distante é óbvia no cenário RCP8.5 para a foz da bacia, onde a tendência crescente está se desenvolvendo ainda mais, podendo observar um incremento nas vazões de 54%, enquanto no RCP2.6 a diferença entre os períodos futuro distante e futuro próximo indica uma redução de 52% .

Em consonância com os resultados encontrados por Brito et al., (2019), o modelo HADGEM2-ES apresenta esta heterogeneidade nas projeções por muitos anos secos e poucos normais. Mas alguns anos apresentam um maior número de dias chuvosos, e esses anos influenciam a elevação dos picos, aumentando consideravelmente as vazões médias em alguns períodos.

Analisando os resultados encontrados nas simulações utilizando o modelo mais seco MIROC-ESM-CHEM, a partir da comparação da dinâmica média anual de descarga natural de longo termo nos intervalos de tempo intermediário (2021 a 2050) e futuro distante (2070 a 2099) com a do período de referência, conduzido pelas projeções climáticas no cenário RCP2.6 e RCP 8.5. Observou-se uma permanência na sazonalidade, onde o pico da descarga deve ocorrer no mês de abril em todos os cenários (Figura 62).

Figura 62 – Médias de longo termo das vazões naturais geradas pelos MIROC-ESM-CHEM.



Fonte: A Autora (2019).

Para estes cenários, tanto nos cenários RCP2.6 quanto no RCP8.5 existe uma previsão de redução nas vazões para o século. Esta redução fica mais evidente no futuro distante do RCP8.5.

A diferença entre as simulações do futuro próximo e futuro distante foi mais acentuada nos cenários do RCP8.5 para a foz da bacia, podendo observar uma redução de 47%, enquanto no RCP2.6 a diferença entre os períodos futuro distante e próximo indica uma menor redução, porém ainda acentuada, de 24%.

Os resultados dos cenários futuros HADGEM2-ES, considerado mais chuvoso no período de referência, indicaram heterogeneidade nas projeções para os cenários futuros próximo e distante. Já o MIROC-ESM-CHEM, considerado mais seco no período de referência, projetaram, tanto para o futuro próximo e quanto distante, a mesma tendência observada no período de 1976 a 2005, com previsão de vazões baixas.

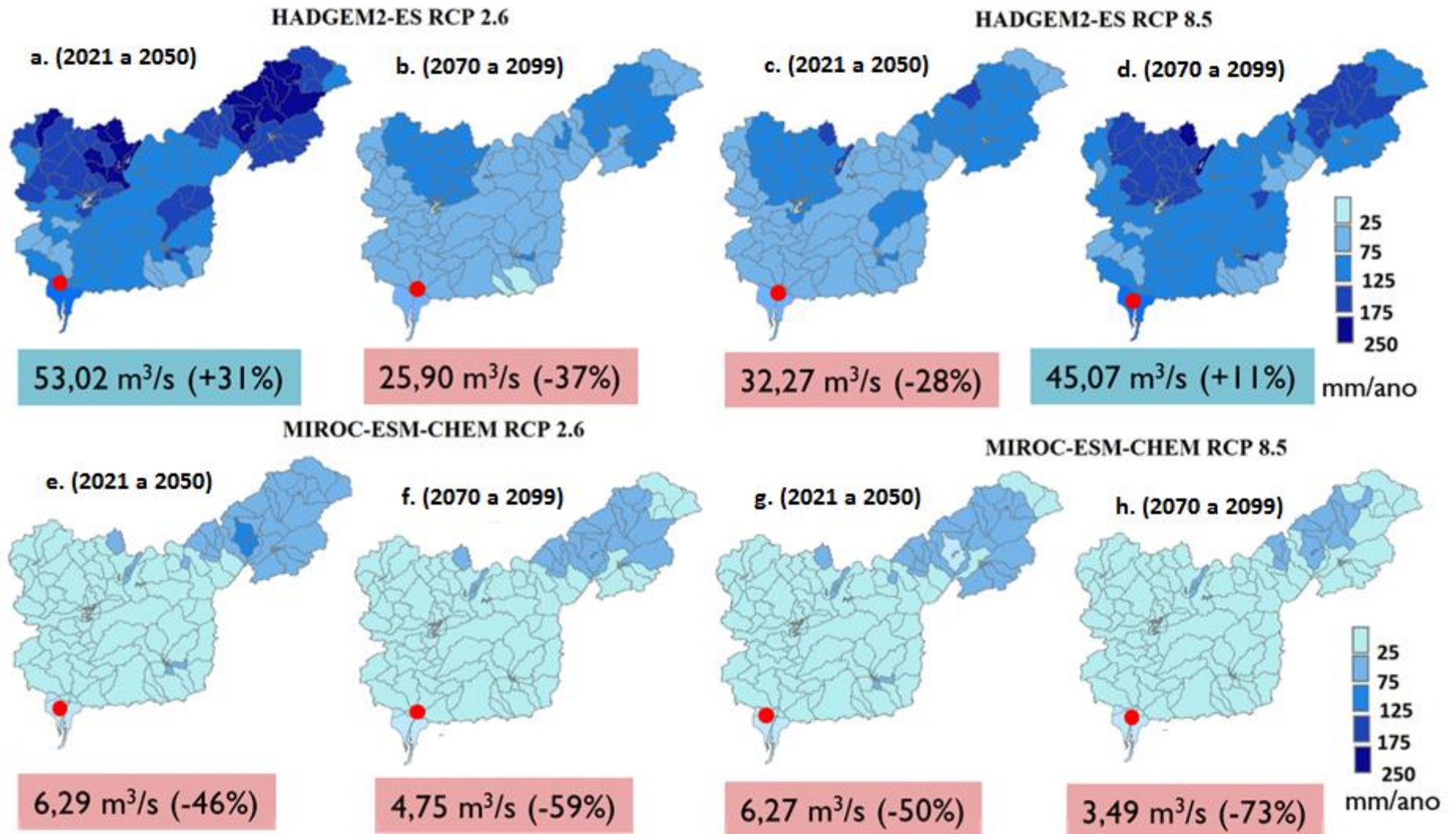
As possíveis influências desses modelos climáticos nas previsões de descargas para até o fim deste século, baseadas nos cenários do IPCC RCP2.6 e RCP8.5, foram observadas nas sub-bacias do rio Pajeú (Figura 63). A região com tendência de maiores escoamentos está localizada a montante da estação de Afogados da Ingazeira, no norte da bacia. O inverso pode ser observado na região sul da bacia, onde observou-se tendências de menores escoamentos.

As análises dos impactos das mudanças projetadas no clima na disponibilidade de recursos hídricos na bacia do rio Pajeú indicaram uma heterogeneidade nos resultados principalmente os gerados com o modelo HADGEM2-ES, tanto na média de longo termo quanto nas sub-bacias. Nesta etapa da pesquisa compararam-se as projeções de descargas geradas no período de referência (1976 a 2005) com as projeções de vazão para o futuro próximo (2021 a 2050) e o futuro distante (2070 a 2099).

Percebeu-se que, para a foz da bacia, no futuro próximo para o cenário mais otimista (RCP2.6) com o modelo HADGEM2-ES (Figura 64a) existiu uma tendência para os maiores incrementos na vazão na bacia, de aproximadamente 31% comparado com a vazão encontrada para o período de referência do mesmo modelo, esta última com projeção para a vazão de 42,19 m³/s. Seguida de uma redução das descargas de aproximadamente de 37% (Figura 64b) num futuro distante.

Analisando os resultados para o modelo HADGEM2-ES para o cenário RCP8.5, considerado o cenário mais pessimista, identificou-se uma redução de aproximadamente 28% nas vazões comparado ao período de referência, num futuro próximo (Figura 63c) e uma elevação de aproximadamente 11% num futuro distante (Figura 63d).

Figura 63 – Projeções de escoamentos totais médios anuais (mm/ano) utilizando MCGs MIROC-ESM-CHEM e HADGEM2-ES.



Fonte: A Autora (2019).

Já os resultados com o modelo MIROC-ESM-CHEM sugere uma maior possibilidade de reduções nas vazões, divergindo apenas em magnitude. A projeção da descarga na foz da bacia, no período de referência (1975 a 2005), foi de 11 m³/s. No cenário mais otimista (RCP2.6) as vazões tendem a reduzir em 46% num futuro próximo (Figura 63e), comparado com o período de referência (1976 a 2005). Fato também observado no futuro distante com reduções de aproximadamente 59% (Figura 63f). Para o cenário mais pessimista (RCP8.5), as reduções chegam a 50% e 73% no futuro próximo (Figura 63g) e distante (Figura 63h) respectivamente.

Analisando as simulações utilizando os modelos de circulação global para gerar cenários climáticos futuros observa-se uma maior influência na variação dos modelos do que dos cenários climáticos RCP 2.6 e 8.5 do IPCC. Visto que modelos mais chuvosos no período de referência tendem a superestimar consideravelmente as vazões futuras da bacia e os modelos mais secos tendem a subestimar as vazões futuras.

Com isso, a previsão dos cenários impulsionada pelo modelo HADGEM2-ES há possibilidades de aumento de frequência dos eventos de cheia e inundações. A redução da disponibilidade hídrica nas regiões prevista nas simulações do modelo MIROC-ESM-CHEM deve evidenciar o acirramento de conflitos entre usos múltiplos, a desaceleração da economia devido à redução da disponibilidade hídrica para a agricultura e indústria, bem como o desabastecimento de cidades.

O cenário impulsionado pelo modelo MIROC-ESM-CHEM demanda uma maior preocupação do ponto de vista de gestão dos recursos hídricos da bacia do rio Pajeú, visto que a região atualmente já apresenta condições críticas de oferta de água. Este cenário esta em consonância com a tendência observada por Soares et al., (2018). Os autores identificaram que os volumes anuais de precipitação estão diminuindo e os episódios de seca estão se tornando mais severos na bacia do rio Pajeú.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões desta pesquisa bem como sugestões para os gestores da Bacia do rio Pajeú e recomendações para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados das simulações na etapa de calibração e validação do modelo, utilizando a variável vazão observada, indicaram que o modelo SWIM adaptado para regiões semiáridas foi capaz de representar a dinâmica da descarga do rio Pajeú;

As incertezas nas simulações foram observadas tanto na escolha dos dados climáticos como dos dados de uso do solo;

Os resultados dos cenários com reservatórios e alocação da água indicaram que a bacia do rio Pajeú tem demanda de água superior à disponibilidade, pois alguns trechos do rio estão secando com frequência, o que não foi observado nas simulações do cenário natural, sem influência dos reservatórios. Evidenciando a necessidade de ações de gestão deste recurso, na tentativa de minimizar conflito entre demanda e oferta de água na bacia.

As simulações utilizando os modelos de circulação global apresentaram, para o período de referência, tendência dos modelos HadGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR serem os mais chuvosos e os modelos GFDL-ESM2M, MIROC-ESM-CHEM e NorESM1-M, mais secos para a região do rio Pajeú.

A previsão do cenário RCP 8.5 impulsionada pelo modelo HADGEM2-ES indicou uma tendência a elevar as vazões no futuro distante (2070 a 2099), acentuando as possibilidades de aumento de frequência dos eventos de cheia e inundações.

Já as simulações do modelo MIROC-ESM-CHEM apresentaram tendência de redução da disponibilidade hídrica na região, fato que deve evidenciar o acirramento de conflitos entre usos múltiplos, a desaceleração da economia devido à redução da disponibilidade hídrica para a agricultura e indústria, bem como o desabastecimento de cidades. Este cenário é o que mais se aproxima da tendência esperada para a região, discutida em trabalhos anteriores.

Os resultados apresentados nesta pesquisa indicaram que o modelo SWIM adaptado mostrou-se uma ferramenta robusta e eficaz para o gerenciamento dos recursos hídricos em regiões semiáridas, capaz de gerar uma gama de informações relacionadas aos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas, podendo auxiliar no processo de tomada de decisão.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Com o objetivo de melhorar a gestão da bacia sugere-se aos gestores:

- Instalar postos de monitoramento climatológicos e fluviométricos em pontos estratégicos, principalmente no sul da bacia do rio Pajeú, para possibilitar uma melhor análise da variabilidade espaço-temporal destas variáveis.
- Ampliar o monitoramento dos reservatórios existentes na bacia, viabilizando a inclusão dos mesmos nos modelos.
- Melhorar a gestão de oferta e demanda e a gestão de conflitos.
- Investir na fiscalização dos pontos de retirada de água da bacia, com o objetivo de evitar retiradas irregulares.
- Aprimorar os programas de proteção e monitoramento da cobertura vegetal da bacia, com o propósito de evitar a ampliação das áreas degradadas e proteger os recursos hídricos;
- Analisar e compreender as vulnerabilidades do sistema, com vistas ao aumento da sua resiliência,

Como sugestões para pesquisas futuras, estão:

- Aplicar o modelo SWIM em estudos hidrológicos de outras bacias hidrográficas do Brasil.
- Inserir os pequenos reservatórios na modelagem hidrológica da bacia, a fim de obter resultados mais precisos e consistentes.
- Investigar os efeitos das demandas futuras de alocação de água na bacia.
- Incluir o módulo de qualidade da água do modelo SWIM em futuras simulações.
- Analisar os efeitos das mudanças climáticas para a bacia do rio Pajeú com o modelo regional ETA.

Esta pesquisa pode servir de reflexão e análise do tema, visto a importância da gestão dos recursos hídricos na atual conjuntura mundial. Podendo contribuir para a formulação de estudos futuros, mais abrangentes e em diferentes regiões.

REFERÊNCIAS

- AICH, V. et al. Flood projections within the Niger River Basin under future land use and climate change. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 666-677, 2016.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **FAE**, v. 20, p. 129 - 137, 2017.
- ANAND, J. et al. Regional scale hydrologic modeling for prediction of water balance, analysis of trends in streamflow and variations in streamflow: The case study of the Ganga River basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 16, p. 32-53, 2018.
- ANDRADE, C. W. L. et al. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 2(3), 227-238, 2017.
- ANJOS, R. S.; CANDEIAS, A. L. B.; NÓBREGA, R. S. Mapeamento da precipitação estimada e observada no semiárido pernambucano e sua relação com a modelagem de dados espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 3, p. 447-462, 2017.
- ARNOLD, J. G. et al. A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. **Texas A&M Univ. Press**, College Station. 255 pp.142, 1990.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 142, n. 1-4, p. 47-69, 1993.
- ARNOLD, J.; WILLIAMS, J.; SRINIVASAN, R.; KING, K.; GRIGGS, R.: **SWAT: Soil water assessment tool**, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, 1994.
- ARROIO JUNIOR, P. P. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool-SWAT**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- ASBJORNSEN, H. et al. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. **Journal Plant Ecol.**, v. 4, p. 3-22, 2011.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C.; SOUZA, W. M. Análise de detecção de variabilidades climáticas com base na precipitação nas bacias hidrográficas do Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 3, 2012.
- ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. Análise climática da precipitação no submédio da bacia do Rio São Francisco com base no índice de anomalia de chuva. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 36, p. 115-127, 2015.
- ATV-DVWK: Verdunstung In Bezug Zu Landnutzung, B. U. B. **DWA-Merkblatt atv-dvwm 504, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.** Hennef: DWA 2002.

AZEVEDO, J. R. G. D. (Org.) **Hidrologia aplicada a gestão de recursos hídricos**. Recife: Editora Universitária da UFPE. 2010. 484 p.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p.100-111, 2013.

BALME, M. et al. Assessing the water balance in the Sahel: impact of small scale rainfall variability on runoff, Part 1: rainfall variability analysis. **Journal of Hydrology**. 331, 336–348, 2006.

BAND, L. E. et al. Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 63, n. 1-2, p. 93-126, 1993.

BARROS, A. B.; BARROS, A. M. A. A difícil aplicabilidade da política de águas no Brasil. **InterSciencePlace**, v. 1, n. 7, 2015.

BELTRÃO, B. A. et al. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, Estado de Pernambuco**. CPRM, 2005.

BENNETT, K. E. et al. Global Sensitivity of Simulated Water Balance Indicators Under Future Climate Change in the Colorado Basin. **Water Resources Research**, v. 54, n. 1, p. 132-149, 2018.

BERNARD, A. Development of a soil moisture based distributed hydrologic model for determining hydrologically based critical source areas. **Hydrological Processes**, 2017.

BOE, J. et al. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies, **International Journal of Climatology**, 27, 1643–1655, doi:10.1002/joc.1602, 2007.

BRACKEN, L. J.; COX, N. J.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. **Hydrological Processes** 22, 683–696, 2008.

BRESSIANI, D. D. A. et al. 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. 9, 2015a.

BRESSIANI, D. A. et al. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil, **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 125-139. 2015b.

BRESSIANI, D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2016. 192p.

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

BRITO, C. *et al.* The role of nighttime water balance on *Olea europaea* plants subjected to contrasting water regimes. **Journal of Plant Physiology**, v. 226, p. 56-63, 2018.

BRITO, Adriane Lima *et al.* Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 165-177, 2019.

CABRAL, S. L.; SAKURAG, J.; SILVEIRA, C. D. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 1, p. 57-70, 2017.

CAMARASA, A. M.; TILFORD, K. A. Rainfall-runoff modelling of ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). **Hydrological Processes** 16, 3329–3344, 2002.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão gráfica, 2009.

CÁRDENAS, M. F.; TOBÓN, C.; BUYTAERT, W. Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 24, p. 4440-4449, 2017.

CBDB, Comitê Brasileiro de Barragens. **A História das barragens no Brasil: Séculos XIX, XX e XXI**. Rio de Janeiro: Ed. Corrado Piasentin, 2011.

CBHSF. Comitê da Bacia do Rio São Francisco. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco 2016-2025** Alagoas. Volume 1 e 2. : 520 p. 2016.

CHEN, L. *et al.* Overview of ecohydrological models and systems at the watershed scale. **Ieee Systems Journal**, v. 9, n. 3, p. 1091-1099, 2015.

CIRILO, J. A. **O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semiáridas**. UFPE, 2007.

CONRADT, T. *et al.* Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin – Part 2: from eco-hydrology to water demand management. **Advances in Geosciences**, v. 11, p. 93-99, 2007.

CONRADT, T.; WECHSUNG, F.; BRONSTERT, A. Three perceptions of the evapotranspiration landscape: comparing spatial patterns from a distributed hydrological model, remotely sensed surface temperatures, and sub-basin water balances. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2947-2966, 2013.

COSTELLOE, J. F.; GRAYSON, R. B.; MCMAHON, T. A. Modelling stream flow for use in ecological studies in a large, arid zone river, central Australia. **Hydrological Processes** 19, 1165–1183, 2005.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes>. Acesso em: 20 jun. 2018.

DANTAS, J. C. **Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João pessoa, 2018.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

DIAZ, C. C. F.; PEREIRA, J. A. dos S.; NOBREGA, R. S. Comparação de dados estimados pelo método da ponderação regional (PR) e dados estimados pelo TRMM para o preenchimento de falhas de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. **Revista Brasileira de Climatologia**, V. 22, 2018.

DÖLL, P. *et al.* Integrating risks of climate change into water management. **Hydrological Sciences Journal**, 60, 4–13, 2014.

DVWK: ERMITTLUNG DER VERDUNSTUNG VON LAND- UND WASSERFLÄCHEN, D.-M. D.-M. **DWA-Merkblatt DVWK-M 238. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.** . Hennef: DWA 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

FATICHI, S.; IVANOV, V.; CAPORALI, E. A mechanistic ecohydrological model to investigate complex interactions in cold and warm water-controlled environments: 1. Theoretical framework and plot-scale analysis. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 4, n. 2, 2012.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

FERREIRA, R. S.; UAGODA, R. E. S. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10 p. 880-893, 2017.

FERREIRA, P. D. S. *et al.* Variability Space-Time of Precipitation Trends in South Mesoregion Cearense and its Relationship with the Faults TSM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 141-152, 2018.

FIX, M. J. *et al.* A comparison of US precipitation extremes under RCP8. 5 and RCP4. 5 with an application of pattern scaling. **Climatic Change**, v. 146, n. 3-4, p. 335-347, 2018.

FONTES JÚNIOR, R. V. D. P.; MONTENEGRO, A. A. D. A. Impacto da mudança do uso do solo no balanço hídrico em bacia representativa do semiárido do Estado de Pernambuco usando o modelo SWAT. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p110-117, 2019.

FRANÇA, L. M. de A. **Impacto das ações antrópicas e do clima no uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

GIMENO, T. E. et al. Elevated CO₂ did not affect the hydrological balance of a mature native Eucalyptus woodland. **Global Change Biology**, v. 24, n. 7, p. 3010-3024, 2018.

GÓES, V. C. **Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodenagem em centros urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

GOMES, H. A. et al. **Geologia e recursos minerais do Estado de Pernambuco**. Recife, 2001.

GONÇALVES, B. D. F.; VITAL, T. W. Análise de sustentabilidade da área rural do município de Triunfo (PE). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 195-218, 2019.

GOOSSE, H. **Climate system dynamics and modeling**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

HABERLANDT, U. From hydrological modelling to decision support. **Advances in Geosciences**, v. 27, n. 27, p. 11-19, 2010.

HANASAKI, N. et al. An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 1007–1025, 2008.

HANASAKI, N. et al. A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways-Part 2: Water availability and scarcity. . **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 2393-2413, 2013.

HARDING, R. J. et al. The future for global water assessment. **Journal of Hydrology**. 518, 186–193, 2014.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Irrigation water requirements for Senegal River basin. **Journal of Irrigation & Drainage Engineering**, v. 111, p. 265-275, 1985.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HATTERMANN, F. et al. Multiscale and multicriterial hydrological validation of the ecohydrological model SWIM. **Environmental Modelling and Software Society**, p. 281-286., 2002.

HATTERMANN, F. et al. Model-Supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany Under Climate Change—A Case Study. **Water Resources Management**, v. 25, n. 13, p. 3113-3134, 2011.

- HATTERMANN, F. et al. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 561-576, 2017.
- HEMPEL, S. et al. A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. **Earth System Dynamics**, v. 4, n. 2, p. 219-236, 2013.
- HESSE, C. et al. Eco-hydrological modelling in a highly regulated lowland catchment to find measures for improving water quality. **Ecological Modelling**, v. 218, n. 1–2, p. 135-148, 2008.
- HUANG, S. et al. From meso- to macro-scale dynamic water quality modelling for the assessment of land use change scenarios. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 19, p. 2543-2558, 2009.
- HUANG, S. et al. Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 23, p. 3289-3306, 2010.
- HUANG, S. et al. Impact of intensive irrigation activities on river discharge under agricultural scenarios in the semiarid Aksu River basin, northwest China. **Water Resources Management**, v. 29, n. 3, p. 945-959, 2015.
- IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção agrícola municipal (Agricultural Production on Municipality Level). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Disponível em: https://serieestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&de=83&no=1 Acesso em: 15 abr. 2018.
- IVANOV, N. N. Estimation of the amount of evaporation ability. In: *Izv. Vsesojuzn. Obshch.-va*, T 86, 1954.
- JUNQUEIRA, R.; SILVA A.; J.; OLIVEIRA, A. S. Comparação entre diferentes metodologias para preenchimento de falhas em dados pluviométricos. **Sustentare**, v. 2, n.1, p. 198-210. 2018.
- KAUFFELDT, A. et al. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 68-76, 2016.
- KEULER, K. et al. Climate change alternatives for Central Europe. In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE, 2018. **Abstracts** [...]. Viena: EGU, 2018. p. 12882.
- KNISEL, W. G. CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. **USDA Conserv. Res. Rept.** No. 26. 643 pp. 1980.

KOCH, H.; LIERSCH, S.; HATTERMANN, F. Integrating water resources management in eco-hydrological modelling. **Water Science and Technology**, v. 67, n. 7, p. 1525-1533, 2013.

KOCH, H. et al. Scenarios of climate and land-use change, water demand and water availability for the São Francisco river basin. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 36, p. 96-114, 2015.

KOCH, H. et al. Integrated hydro- and wind power generation: a game changer towards environmental flow in the Sub-middle and Lower São Francisco River Basin? **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 1927-1942, 2018a.

KOCH, H. et al. Assessment of observed and simulated low flow indices for a highly managed river basin. **Hydrology Research**, v. 49, n. 6, p. 1831-1846, 2018b.

KOLLET, S. et al. The integrated hydrologic model intercomparison project, IH-MIP2: A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. **Water Resources Research**, v. 53, n. 1, p. 867-890, 2017.

KRYSANOVA, V. et al. Simulation Modeling of the Coastal Waters Pollution from Agricultural Watershed. **Ecological Modelling**, 49, 7-29. 1989.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I.; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, v. 106, n. 2-3, p. 261-289, 1998.

KRYSANOVA, V.; BECKER, A. Integrated Modelling of Hydrological Processes and Nutrient Dynamics at the River Basins Scale. **Hydrobiologia**, n. 410, p. 131-138, 1999.

KRYSANOVA, V. et al. Factors affecting nitrogen export from diffuse sources: a modelling study in the Elbe basin. In: L. Heathwaite (ed.) *Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources*. **IAHS Publications**, n. 257, p. 201-212, 1999.

KRYSANOVA, V. et al. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, PIK Report 69. **Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany**, 2000.

KRYSANOVA, V.; HABERLANDT, U. Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins: Part I. Simulation experiments using a process-based model. **Ecological Modelling**, v. 150, n. 3, p. 255-275, 2002.

KRYSANOVA V, HATTERMANN F., WECHSUNG F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. **Hydrol Process** 19:763-783, 2005.

KRYSANOVA, V. et al. Modelling climate and land-use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 4, p. 606-635, 2015.

- KRYSANOVA, V. et al. Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide-a synthesis. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 105002, 2017.
- KUMAR, C.; PURANDARA, B.; CHACHADI, A. Subsurface water modelling using SWIM and FEFLOW. **Asia Pacific Journal of Research**, V. I. Issue XLVII. 2017.
- LAVENNE, A. D.; ANDRÉASSIAN, V. Impact of climate seasonality on catchment yield: A parameterization for commonly-used water balance formulas. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 266-274, 2018.
- LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: groundwater loading effects of agricultural management systems. **Transactions of the ASAE** 30 (5): 1403–1418. 1987.
- LOBANOVA, A. et al. Exploring socio-hydrological dynamics with a hybrid hydrological agent-based model. **8th International Congress on Environmental**. Toulouse, France. 2016.
- LOBANOVA, A. et al. Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 436-447, 2017.
- LOBANOVA, Anastasia. **The assessment of hydrological impacts of climate change and their implications for water management across scales: from the local to European scale**. 2018. Thesis (Doctoral) - Technical University of Berlin, Berlin, 2018.
- LOPES, I. et al. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. **Irriga** v. 22, p. 443-457, 2017.
- MADANI, E. M.; JANSSEN, P. E.; BABELON, I. Differences in water balance between grassland and forest watersheds using long-term data, derived using the CoupModel. **Hydrology Research**, v. 49, n. 1, p. 72-89, 2018.
- MARAUN, D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. **Journal of Climate**, 26(6), 2137-2143. 2013.
- MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.
- MELLO, Y. R. D.; OLIVEIRA, T. M. N. D. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.
- MELLO, Y. R. D.; KOHLS, W.; OLIVEIRA, T. M. N. D. Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Boletim de Geografia**, v. 35, n. 1, 2017.
- MONTEIRO, A. B.; VIADANA, A. G. Técnica alternativa e simplificada para a aferição de hidrotopos aplicada ao córrego Wenzel. **Revista Geonorte**, p. 1-15, Rio Claro/SP: 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7 ed. New York: Willey & Sons., 2009. 656 p.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia estatística**. CPRM. Belo Horizonte: 2007.

NARASIMHAN, B. et al. Development and Testing of a Physically Based Model of Streambank Erosion for Coupling with a Basin-Scale Hydrologic Model SWAT. **JAWRA - Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 2, p. 344-364, 2017.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NĚMEČKOVÁ, S.; SLÁMOVÁ, R.; ŠÍPEK, V. Climate change impact assessment on various components of the hydrological regime of the Malše River basin. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 59, n. 2, p. 131, 2011.

NIED, M.; HUNDECHA, Y.; MERZ, B. Flood-initiating catchment conditions: a spatio-temporal analysis of large-scale soil moisture patterns in the Elbe River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1401-1414, 2013.

OLIVEIRA, L. F.C. et al. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 11, 2010.

OLIVEIRA, G. G. D.; PEDROLLO, O. C.; REIS, N. M.. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo Eta CPTEC/HadCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 101-121, 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do Sistema Integrado Nacional – SIN**. Brasília: ONS, 2005. 220p.

PACHAURI, R. K. et al. **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2014.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças**

Climáticas. [ASSAD, E. D.;MAGALHÃES, A., et al. Rio de Janeiro: COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro 2014.

PELLICCIOTTI, F. **Empirical evapotranspiration models.** Zürich: Swiss Federal Institute of Technology in Züriched. 2012.

PEREIRA, L. H. **Análise de sensibilidade e propagação de incerteza em modelos hidrossedimentológicos: contribuição à modelagem de bacias hidrográficas.** 2016. Tese (Doutorado) - Unesp, Rio Claro-SP, 2016.

PEREIRA, M. L. T. *et al.* Variabilidade climática no Agreste de Pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. **JEAP**, v. 2, n. 4, p. 394-402, 2017.

PIANI, C. *et al.* Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, **Journal of Hydrology**, 395, 199–215, 2010.

RAKOVEC, O. *et al.* Improving the realism of hydrologic model through multivariate parameter estimation. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, p.14744, 2017.

REBOITA, M. S. *et al.* Previsao climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 0102-7786332001. 2018.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental:** INPE 2000.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica:** aplicação a bacias hidrográficas. São José dos Campos: INPE, 2003.

RHODEN, A. C. *et al.* A importância da água e da gestão dos recursos hídricos. **Revista de Ciências Agroveterinárias e Alimentos**, n. 1, 2016.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú.** 2016. Tese (Doutorado em Geografia) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

RIBEIRO, E. P. *et al.* Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. **Geosul**, v. 31, n. 62, p. 59-92, 2016.

RIBEIRO NETO, A. *et al.* Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.

RICHTER, D. Verdunstung, in: Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik – Ein Handbuch für die Praxis. **Meteorologischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik, Potsdam**, v. 6, 1984.

RINGARD, J.; SEYLER, F.; LINGUET, L. A quantile mapping bias correction method based on hydroclimatic classification of the Guiana shield. **Sensors**, 17(6), 1413. 2017.

ROCHA, P. C.; SANTOS, A. A. Análise Hidrológica em Bacias Hidrográficas. **Mercator**, v. 17, 2018a.

ROCHA, A. K. P. **Condições operacionais de estruturas hídricas destinadas ao armazenamento de água no Vale do Rio Pajeú.** (Monografia) Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2018.

ROCKWOOD, D. Columbia basin stream flow routing by computer. **Journal of Waterways and Harbour Division**, v. 84, p. 1874-1881, 1958.

SAMANIEGO, L. et al. Propagation of forcing and model uncertainties on to hydrological drought characteristics in a multi-model century-long experiment in large river basins. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 435-449, 2017.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. D. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTOS, K. A. D. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do rio Mundaú.** 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil).** 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SCHUSTER, Raíza. **Análise de cenários futuros de mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica da Laguna dos Patos.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) UFRGS. Porto Alegre, RS. 2019.

SECTMA - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco. **Plano Estadual de Recursos Hídricos.** Recife. 1998.

SENIOR, C. A. et al. Idealized climate change simulations with a high-resolution physical model: HadGEM3-GC2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 8, n. 2, p. 813-830, 2016.

SERRÃO, E. A. D. O. **Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas-PA.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grade - UFCG. Campina Grade, PB. 2018.

SILVA, A. L. C. **Utilização do modelo SWIM para análise da evapotranspiração de referência diária na Bacia Hidrográfica de Gameleira-Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife. 2014.

SILVA, R. M. et al. Efeitos de Cenários de uso da terra na vazão e produção de sedimentos na bacia do Rio Cobres, Portugal. **Revista Geociências**, v.35, n.4, p.609-622, 2016.

SILVA, J. R. I. et al. Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. **Scientia Plena**, v. 13, n.10, p. 1-10, 2017.

SILVA, G. N. S. D.; MORAES, M. M. G. A. D. Economic water management decisions: trade-offs between conflicting objectives in the sub-middle region of the São Francisco watershed. **Regional Environmental Change**, March 19 2018.

SILVEIRA, C. D. S. et al. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416 - 428, 2016.

SINES, T. R. et al. RegCM CORDEX-atlas simulations: experiment setup, model validation and future projections for two scenarios (RCP2. 6; RCP8. 5) over 9 CORDEX domains. *In: AGU Fall Meeting Abstracts*. 2018.

SMITH, R. E. Opus, an integrated simulation model for transport of non-point source pollutants at the field scale. Vol. I, **Documentation. USDA, ARS. ARS98**. 1992.

SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S.; GALVÍNCIO, J. D. Indicadores climáticos de desertificação na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, 22. 2018.

TAGUE, C.; BAND, L. RHESys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System-An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. **Earth Interactions**, v. 8, n. 19, p. 1-42, 2004.

TANG, Y. et al. A Bayesian alternative for multi-objective ecohydrological model specification. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 25-38, 2018.

TEBALDI, C.; WEHNER, M. F. Benefits of mitigation for future heat extremes under RCP4. 5 compared to RCP8. 5. **Climatic Change**, v. 146, n. 3-4, p. 349-361, 2018.

TEKLESADIK, A. et al. Inter-model comparison of hydrological impacts of climate change on the Upper Blue Nile basin using ensemble of hydrological models and global climate models. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 517-532, 2017.

TEIXEIRA, L. F. C. Análise de Sensibilidade de Parâmetros do Modelo Hidrológico Swat em Função de Diferentes Características de Bacias Hidrográficas. Universidade Federal do Espírito Santo. Dissertação. 2017.

THEMEßL, M. J.; GOBIET, A.; LEUPRECHT, A.: Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models, **International Journal of Climatology**, 31, 1530–1544, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia, ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012.

TURC, L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annals of Agronomy**, v.12, n.1, p. 13-49. 1961.

UPPALA, S. M. et al. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 131, n. 612, p. 2961-3012, 2005.

USDA-SCS. U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service. Hydrology In: Estados Unidos. Soil Conservation Service. **National Engineering Handbooks**. Washington: USDA (Section 4). 1972.

USGS. Reprocessing by the GLCF. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation, Reprocessed to GeoTIFF. College Park, **Maryland: The Global Land Cover Facility**. Version 1.0. 2004. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/conteudo/creditos.htm> Acesso em: 10 ago. 2019.

VALVERDE, M. C.; PAIVA JUNIOR, H. de. Temperatura do ar e emissões urbanas em região industrial de São Paulo, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 2, n. 2, p. 45-52, 2018.

VELASQUEZ, P.; MESSMER, M.; RAIBLE, C. C. A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states. **Geoscientific Model Development**. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-131>. 2019.

VERSLYPE, N. I.; MACHADO, J.; WANDERLEY, R. A. Microrregião Pajeú: economia, clima e desenvolvimento da agricultura através de modelo digital do terreno. **Revista Geama**, v. 1, n. 1, p. 16-30, 2016.

VIANA, J. F. S. **Impactos das mudanças do uso da terra sobre o balanço hidrossedimentológico**: bases para gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia do Rio Pirapama. 2019. Tese (Douorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

VIRGÍLIO, R. M. **Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob Condições de Mudanças Climáticas**: estudo de caso da UHE Três Marias. 2018. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

WANG, G.; XIA, J. Improvement of SWAT2000 modelling to assess the impact of dams and sluices on streamflow in the Huai River basin of China. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 24, n. 11, p. 1455-1471, 2010.

WENDLING, U.; SCHELLIN, H. Neue Ergebnisse zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. . **Zeitschrift f'ur Meteorologie**, v. 36, p. 214-217, 1986.

WILLIAMS, J. R. et al. The EPIC Crop Growth Model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 32, n. 2, p. 497-0511, 1989.

YAMAGATA, Y. et al. Estimating water–food–ecosystem trade-offs for the global negative emission scenario (IPCC-RCP2. 6). **Sustainability Science**, v. 13, n. 2, p. 301-313, 2018.

YANG, Z. et al. Applicability evaluation of the SWIM at river basins of the black soil region in Northeast China: A case study of the upper and middle Wuyuer River basin. **Journal of Geographical Sciences**, v. 27, n. 7, p. 817-834, July 01 2017.

YOUNG, R. A. et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. Soil Water Conserv.*, 44:168-173,1989.

APÊNDICE A – ARQUIVOS DE ENTRADA DO SWIM

Ordem	Nome interno	Nome externo	Descrição	Tipo
1	direc//gwdat	Sub/xxxNN.gw	Arquivo de entrada de dados da água subterrânea. Contém dados de aquíferos rasos, incluindo parametro de recessão e rendimento específico	Criado pelo SIG
2	direc//routdat	Sub/xxxNN.rte	Arquivo de entrada de dados da sub-bacia. Contém dados de dimensões do canal (comprimento, inclinação, largura, profundidade, etc.)	Criado pelo SIG
3	direc//subdat	Sub/xxxNN.sub	Arquivo de dados gerais das sub-bacia . Contém insumos específicos para cada sub-bacia (área, declividade e comprimentos, etc.)	Criado pelo SIG
4	file.cio	file.cio	Controle de entrada de arquivo. Contém todo o arquivo de entrada com nomes que são usados pelo modelo.	Criado pelo SIG
5	routin	xxx.fig	Contém os comandos de roteamento para rotear e adicionar fluxos através de uma bacia.	Criado pelo SIG
6	strlist	str.cio	Este é o arquivo de controle da estrutura da bacia. Contém arquivo para escrever a estrutura de sub-bacia.	Criado pelo SIG
7	struct	xxx.str	Este é o arquivo de estrutura da bacia. Descreve sub-bacias e hidrótopos por categorias de uso da terra e tipos de solo.	Criado pelo SIG
8	direc//strdat	Struc/subbNN.str	São arquivos de estrutura da sub-bacia criados pelo SWIM	Criado pelo SWIM
9	basndat	xxx.bsn	Este é o arquivo de entrada geral da bacia. Ele contém um conjunto de parâmetros gerais da bacia (incluindo área de drenagem) e um conjunto de parâmetros que podem ser usado para calibração.	Criado pelo usuário
10	clim.dat	clim.dat	Arquivo de dados de entrada de clima. Pode incluir todos os dados climáticos e hidrológicos, ou apenas dados climáticos para a bacia.	Criado pelo usuário
11	codedat	xxx.cod	Este é o código de controle de entrada Arquivo. Contém o número de sub-bacias, o número de anos de simulação, ano de inicio da simulação e impressão de códigos.	Criado pelo usuário
12	direct//soildat	Soil/soilNN.dat	Estes são os arquivos de parâmetros do solo. Eles contêm parâmetros físicos e químicos dos solos.	Criado pelo usuário
13	prec.dat	prec.dat	Arquivo de dados de entrada de precipitação. Inclui dados de precipitação de todas as estações usadas	Criado pelo usuário
14	radi.dat	radi.dat	Arquivo de dados de entrada de radiação solar.	Criado pelo usuário
15	runoff.dat	runoff.dat	Arquivo de dados de descarga. Inclui a descarga na saída da bacia (usado para validação hidrológica).	Criado pelo usuário

Arquivos de entrada do SWIM

(conclusão)

16	soillist	soil.cio	Este é o arquivo de controle para o banco de dados do solo. Contém arquivos com nomes dos solos.	Criado pelo usuário
17	sub-prst.dat	sub-prst.dat	Este arquivo estabelece correspondência entre sub-bacias e as estações de precipitação	Criado pelo usuário
18	temp.dat	temp.dat	Arquivo de dados de entrada de temperatura. Inclui dados de temperatura de todas as estações usadas	Criado pelo usuário
19	wgen.dat	wgen.dat	Arquivo de dados climáticos de entrada. Ele contém parâmetros estatísticos mensais exigidos para gerar dados climáticos diários.	Criado pelo usuário
20	wstor.dat	wstor.dat	Este arquivo inclui dados sobre o armazenamento inicial de água, em m ³ , correspondentes a sub-bacias.	Criado pelo usuário

APÊNDICE B – USOS DA TERRA NO SWIM

num	cpnm	Descrição	Tipo	Código
1	AGRL	terras agrícolas	culturas anuais	1
2	ASPR	aspargos	culturas anuais	1
3	BROC	broccoli	culturas anuais	1
4	CABG	repolho	culturas anuais	1
5	CANT	cantaloupe	culturas anuais	1
6	CAUF	couve-flor	culturas anuais	1
7	CELR	aipo	culturas anuais	1
8	CORN	milho em grão	culturas anuais	1
9	CORN	milho em grão	culturas anuais	1
10	COTP	algodão	culturas anuais	1
11	COTS	algodão	culturas anuais	1
12	CRRT	cenoura	culturas anuais	1
13	CUCM	pepino	culturas anuais	1
14	EGGP	berinjela	culturas anuais	1
15	GRSG	sorgo	culturas anuais	1
16	HMEL	mel	culturas anuais	1
17	ONIO	cebola	culturas anuais	1
18	PEPR	pimenta	culturas anuais	1
19	POTA	batata	culturas anuais	1
20	POTA	batata	culturas anuais	1
21	RICE	arroz	culturas anuais	1
22	SBAR	cevada	culturas anuais	1
23	SGBT	beterraba	culturas anuais	1
24	SGHY	sorgo	culturas anuais	1
25	SLMA	silagem de milho	culturas anuais	1
26	SPIN	espinafre	culturas anuais	1
27	STRW	morangueiro	culturas anuais	1
28	SUGC	cana-de-açúcar	culturas anuais	1
29	SUNF	girassol	culturas anuais	1
30	SWHT	trigo	culturas anuais	1
31	TOBC	tabaco	culturas anuais	1
32	TOMA	tomate	culturas anuais	1
33	WMEL	melancias	culturas anuais	1
34	BARL	cevada	culturas anuais de inverno	2
35	BARL	cevada	culturas anuais de inverno	2
36	BARL	cevada	culturas anuais de inverno	2
37	LETT	alface	culturas anuais de inverno	2
38	LETL	alface	culturas anuais de inverno	2
39	OATS	aveia	culturas anuais de inverno	2
40	RAPE	rape	culturas anuais de inverno	2
41	RYE	centeio	culturas anuais de inverno	2
42	RYE	centeio	culturas anuais de inverno	2
43	WHTD	trigo	culturas anuais de inverno	2
44	WWHT	trigo	culturas anuais de inverno	2

Usos da terra no SWIM

(conclusão)

45	WWHT	trigo	culturas anuais de inverno	2
46	HAY	grama => feno	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
47	PAST	pastagem	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
48	SPAS	pastagem de verão	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
49	WPAS	pastagem de inverno	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
50	RNGB	caatinga	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
51	COVC	cobertura de grama	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
52	URBN	área urbana	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
53	WATR	água	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
54	WETL	pantanal	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
55	WETN	pantanal não florestada	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
56	FRSD	floresta (decídua)	madeiras	4
57	FRSE	floresta (folha persistente)	madeiras	4
58	FRST	bosques	madeiras	4
59	FORD	floresta (decídua)	madeiras	4
60	FORE	floresta (folha persistente)	madeiras	4
61	FORM	floresta (misto)	madeiras	4
62	PINE	pinheiro	madeiras	4
63	WETF	pantanal	madeiras	4
64	GRBN	feijão verde	Leguminosas Anuais	5
65	LIMA	lima	Leguminosas Anuais	5
66	PEAS	ervilhas	Leguminosas Anuais	5
67	PNUT	amendoim	Leguminosas Anuais	5
68	SOYB	soja	Leguminosas Anuais	5
69	LEN1	lentilhas	Leguminosas Anuais de inverno	6
70	WPEA	ervilha	Leguminosas Anuais de inverno	6
71	ALFA	alfafa	Leguminosas perenes	7
72	TEFF	tefe	culturas anuais de inverno	2
73	RNGE	pastagem	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
74	APPL	maçã	Leguminosas perenes	7
75	GRAP	uva	Leguminosas perenes	7
76	OILP	palmeiras-de-óleo	Leguminosas perenes	7
77	RUBR	árvore de borracha	Leguminosas perenes	7
78	BANA	banana	Leguminosas perenes	7
79	COFF	café	Leguminosas perenes	7
80	PTBN	feijão carioca	culturas anuais	1
81	ALMD	amêndoa	Leguminosas perenes	7
82	GRAR	grarigue	Cobertura de terra perene (não florestada)	3
83	OLIV	azeitona	Leguminosas perenes	7
84	ORAN	laranja	Leguminosas perenes	7
85	COCO	coco	Leguminosas perenes	7
86	CASH	caju	Leguminosas perenes	7
87	PAPA	mamão	Leguminosas perenes	7
88	PINP	abacaxi	Leguminosas perenes	7
89	SPOT	batata doce	culturas anuais	1

APÊNDICE C – ALOCAÇÃO DA ÁGUA INCLUÍDOS NO MODELO SWIM

Lat_Y	Long_X	codigo_SWIM	Codigo_APAC	Municipio	Finalidade	Q_m3_dia	Q_m3_s	SubBacia
-8.20	-38.53	1	657_12	SERRA TALHADA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	2400	0,028	113
-7.97	-38.32	2	738_11	SERRA TALHADA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	14496,72	0,168	115
-7.77	-37.46	3	801_12	INGAZEIRA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	5730,72	0,066	119
-7.76	-37.46	4	197_11	INGAZEIRA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	2114,16	0,024	119
-7.36	-37.31	5	1215-S/06	BREJINHO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	444	0,005139	111
-7.31	-37.27	6	1229-S/06	BREJINHO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	85,1	0,000985	111
-7.78	-37.77	7	01515-S/08	CARNAIBA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	89,86	0,00104	89
-8.63	-38.47	8	534-S/02	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	298,07	0,00345	4
-8.61	-38.58	9	891-S/05	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	414,18	0,004794	7
-8.37	-38.51	10	388-S/01	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	489,47	0,005665	21
-8.37	-38.50	11	390-S/01	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	489,47	0,005665	21
-8.02	-38.74	12	1754-S/10	MIRANDIBA	TERRAPLENAGEM	300	0,003472	49
-7.97	-38.28	13	980-S/05	SERRA TALHADA	IRRIGAÇÃO	718,24	0,008313	54
-7.74	-37.62	14	162-S/99	AFOGADOS DA INGAZEIRA	INDÚSTRIA	120	0,001389	96
-7.83	-38.00	15	312-S/00	FLORES	ABASTECIMENTO PÚBLICO	533,09	0,00617	82
-8.56	-38.73	16	1112-S/06	FLORESTA	INDÚSTRIA	91	0,001053	13
-7.37	-37.22	17	226-S/99	ITAPETIM	ABASTECIMENTO PÚBLICO	1.055,81	0,01222	111
-7.36	-37.22	18	227-S/99	ITAPETIM	ABASTECIMENTO PÚBLICO	1.056,00	0,012222	111
-8.02	-38.80	19	229-S/99	MIRANDIBA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	161,35	0,001867	53
-7.43	-37.24	20	01388-S/08	SAO JOSE DO EGITO	INDÚSTRIA	120	0,001389	106
-7.97	-38.32	21	223-S/99	SERRA TALHADA	OUTROS	123.250,00	1,426505	115
-7.94	-37.49	22	1206-S/06	IGUARACI	ABASTECIMENTO PÚBLICO	94.164,00	1,089861	72

Alocação da água incluídos no Modelo SWIM

(Continuação)

-7.93	-37.99	23	1027-S/06	FLORES	ABASTECIMENTO PÚBLICO	25.853,00	0,299225	57
-7.97	-38.32	24	690-S/03	SERRA TALHADA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	12.960,00	0,15	115
-7.74	-37.62	25	309-S/00	AFOGADOS DA INGAZEIRA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	11.664,00	0,135	96
-7.48	-37.29	26	222-S/99	SAO JOSE DO EGITO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	4.114,37	0,04762	106
-7.97	-38.32	27	218-S/99	SERRA TALHADA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	3.042,48	0,035214	115
-8.01	-38.32	28	2394-S/14	SERRA TALHADA	DILUIÇÃO DE ESGOTOS SANITÁRIOS	1.300,32	0,01505	52
-7.78	-37.79	29	233-S/00	CARNAIBA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	1.054,08	0,0122	95
-7.78	-37.79	30	221-S/99	TRIUNFO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	1.036,80	0,012	95
-8.62	-38.49	31	163-S/99	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	816	0,009444	4
-7.79	-37.43	32	2714-S/16	IGUARACI	ABASTECIMENTO PÚBLICO	787,45	0,009114	119
-7.79	-37.43	33	225-S/99	IGUARACI	ABASTECIMENTO PÚBLICO	615,24	0,007121	119
-7.59	-37.69	34	219-S/99	SOLIDAO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	565,05	0,00654	101
-7.74	-37.62	35	061-S/98	AFOGADOS DA INGAZEIRA	INDÚSTRIA	518	0,005995	96
-8.02	-38.14	36	2098-S/12	SERRA TALHADA	INDÚSTRIA	500	0,005787	51
-7.64	-37.36	37	234-S/00	TUPARETAMA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	431,42	0,004993	102
-8.57	-38.55	38	2089-S/12	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	420	0,004861	7
-8.37	-38.51	39	389-S/01	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	360	0,004167	21
-7.66	-37.65	40	310-S/00	AFOGADOS DA INGAZEIRA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	345,6	0,004	96
-7.69	-37.89	41	732-S/03	QUIXABA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	265,92	0,003078	87
-7.30	-37.24	42	2583-S/15	ITAPETIM	ABASTECIMENTO PÚBLICO	192	0,002222	111
-8.46	-38.08	43	475-S/02	BETANIA	IRRIGAÇÃO	181,44	0,0021	12
-8.62	-38.49	44	386-S/01	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	180	0,002083	4

Alocação da água incluídos no Modelo SWIM

								(Conclusão)
-8.62	-38.49	45	387-S/01	FLORESTA	IRRIGAÇÃO	180	0,002083	4
-8.03	-37.89	46	1723-S/10	FLORES	TERRAPLENAGEM	160	0,001852	62
-8.06	-37.85	47	1716-S/10	BETANIA	TERRAPLENAGEM	140	0,00162	62
-7.32	-37.31	48	231-S/00	BREJINHO	ABASTECIMENTO PÚBLICO	122,36	0,001416	111
-7.45	-37.41	49	220-S/99	SANTA TEREZINHA	OUTROS	120,6	0,001396	110
-7.69	-37.89	50	228-S/99	QUIXABA	ABASTECIMENTO PÚBLICO	118,33	0,00137	87
-7.43	-37.24	51	2931-S/17	SAO JOSE DO EGITO	IRRIGAÇÃO	96	0,001111	106
-7.98	-38.30	52	1671-S/10	SERRA TALHADA	OUTROS	80	0,000926	54
-8.04	-38.44	53	1679-S/10, de 09/03/10	SERRA TALHADA	TERRAPLENAGEM	80	0,000926	48
-8.05	-38.42	54	1680-S/10	SERRA TALHADA	TERRAPLENAGEM	80	0,000926	48

Observação: As demandas destacadas em azul na Tabela foram utilizadas para gerar os cenários 6 e 7. Já para a geração do cenário 8, todas as demandas foram incluídas.

**APÊNDICE D – CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS UTILIZADAS NO ARQUIVO “RESERVOIR_CTRL” DO
MODELO SWIM**

#rsv_01	#rsv_02	#rsv_03	#rsv_04	#rsv_05	#rsv_06	#rsv_07	#rsv_08	#rsv_09	#Descrição
9									# número de reservatórios na bacia hidrográfica
112	113	114	115	116	117	118	119	120	# número das sub-bacias de cada reservatório, A ordem deve ser semelhante à ordem dos reservatórios no arquivo reservoir.csv
Saco1	Serrinha II	Arrodeio	Cachoeira II	Jazigo	Brotas	Sao_Jose II	Rosário	Barra_de_Jua	# Nome do reservatório
36,0	311,0	14,52	21,03	15,54	19,64	7,15	34,99	71,47	# Capacidade máxima do reservatório, incluindo armazenamento morto [milhões m ³]
0,0	46,7	4,95	0,03	1,35	0,02	0,11	1,56	1,48	# Armazenamento morto [milhões de m ³]
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	# Preenchimento do reservatório para o 1º dia de simulação [Start_Fill * Rsv_Cap_Act (1)], entre 0,00 e 1,00
1	1	1	1	1	1	1	1	1	# Reservatório existente? não: 0 OU sim: 1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	#Nível de água máximo de HPP [mNN]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	# Nível mínimo de água da HPP [mNN]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	# Altura máxima de queda de HPP [m]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	# Capacidade do HPP [m3/s]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	# Eficiência da HPP (Max: 1,0 = 100%), (Min: 0,0 = 0%)
0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	# Infiltração em [m ³ / s] por [milhão de m ³ de volume de enchimento]
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	# Fração que contribui para as águas subterrâneas (encaminhadas a jusante)
0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	# Correção da evaporação sobre o lago
1936	1996	1956	1965	1983	1978	1981	1985	1982	# Ano de início do enchimento do novo reservatório
0	0	0	0	0	0	0	0	0	# Dia do ano para o início do enchimento do novo reservatório (Res_ativo = 0)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	# Tipo de Gerenciamento de Reservatório
0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	# Proporção de enchimento do reservatório disponível para retirada diretamente do reservatório (Máx: 1,0 = 100%; Min: 0,0 = 0%)

APÊNDICE E – PRINCIPAIS PARÂMETROS DO SWIM

Parâmetro	Descrição
abf	Fator alfa para águas subterrâneas. A abf caracteriza a recessão das águas subterrâneas e a taxa na qual o fluxo das águas subterrâneas é retornado ao fluxo.
bff	Fator de fluxo básico para calcular o tempo de retorno da água para corpos d' água
delay	Atraso nas águas subterrâneas (dias). O tempo que leva para a água sair do fundo da zona radicular até atingir o aquífero raso, onde pode se tornar um fluxo de água subterrânea.
ecal	Fator de correção para evapotranspiração potencial
gwht	Altura inicial das águas subterrâneas (m)
gwq	Contribuição inicial do fluxo de águas subterrâneas para o fluxo I(mm / dia)
rchrhc	Coeficiente de percolação do aquífero profundo (0-1). A quantidade de água que penetra no aquífero profundo (a partir do aquífero raso) é determinada pela multiplicação da percolação da zona radicular pelo RCHRC.
revapc	O coeficiente de revap (0-1) é a fração de recarga (percolação da zona raiz) que vai para REVAP. A quantidade de evaporação do aquífero raso é determinada pela multiplicação do potencial ET pelo REVAPC
revapmn	Revap armazenamento (mm). O armazenamento superficial de aquíferos deve exceder o REVAPMN antes que o fluxo das águas subterrâneas possa começar.
roc2	Coeficientes de roteamento para calcular a constante de tempo de armazenamento para o alcance do fluxo superficial,
roc4	Coeficientes de roteamento para calcular a constante de tempo de armazenamento para o alcance do fluxo subsuperficial
sccor	Fator de correção para condutividade saturada (aplicado para todos os solos)
syld	Rendimento específico
thc	Fator de correção para evapotranspiração, definidos valores no intervalo de 0 a 1.
tlrch	Fator de correção para perda de transmissão