



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
HIDROLOGIA DA BACIA DO RIO CAPIBARIBE – PE POR MEIO
DA INTEGRAÇÃO DE PROJEÇÕES DO CORDEX AO SISTEMA
SUP_{er}**

Gustavo Ribeiro da Silva

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

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2024



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
HIDROLOGIA DA BACIA DO RIO CAPIBARIBE – PE POR MEIO
DA INTEGRAÇÃO DE PROJEÇÕES DO CORDEX AO SISTEMA
SUP_{er}**

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

Gustavo Ribeiro da Silva

Orientador: Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Gustavo Ribeiro da.

Avaliação dos efeitos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe-PE por meio da integração de projeções do CORDEX ao sistema SUPER / Gustavo Ribeiro da Silva. - João Pessoa, 2024.
125 f. : il.

Orientação: Gerald Norbert Souza da Silva.
Coorientação: Cristiano das Neves Almeida.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Mudança climática. 2. Bacia hidrográfica. 3. Balanço hídrico. 4. SWAT. 5. Modelagem hidrológica. I. Silva, Gerald Norbert Souza da. II. Almeida, Cristiano das Neves. III. Título.

UFPB/BC


CDU 551.583(043)

GUSTAVO RIBEIRO DA SILVA


**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
HIDROLOGIA DA BACIA DO RIO CAPIBARIBE – PE POR MEIO
DA INTEGRAÇÃO DE PROJEÇÕES DO CORDEX AO SISTEMA
SUPeR**

Dissertação aprovada em 01/02/2024 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.


BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **GERALD NORBERT SOUZA DA SILVA**
Data: 01/02/2024 15:46:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da Silva – UFPB
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **CRISTIANO DAS NEVES ALMEIDA**
Data: 02/02/2024 08:20:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

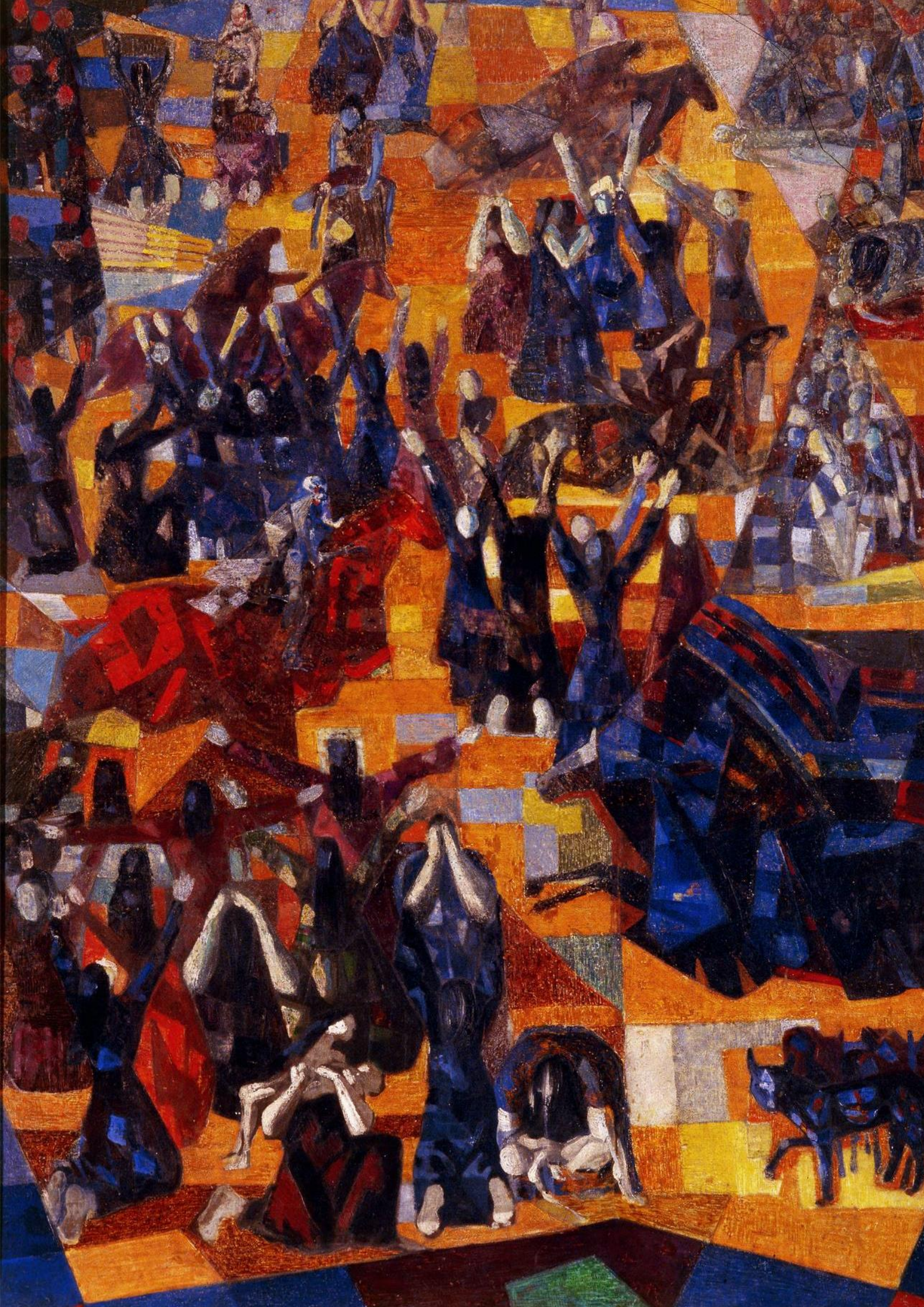
Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida – UFPB
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **CELSO AUGUSTO GUIMARAES SANTOS**
Data: 02/02/2024 18:45:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
(Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente
 **JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL**
Data: 08/02/2024 08:18:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(Examinador Externo)





Guerra e Paz (1952-1956)

Candido Portinari

Dedico este trabalho, com muito amor, aos meus pais, dois sertanejos de uma força incansável, que mesmo diante das dificuldades sempre priorizaram a minha educação e sempre me ajudaram a correr atrás dos meus sonhos, e eu sei que isso significou abrirem mão de muitas coisas.

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui me faz refletir sobre tudo o que aconteceu na minha vida e sobre as bênçãos que eu recebi, especialmente ao longo dos últimos dois anos. É meio louco estar vivenciando coisas que eu tanto sonhei, e agora, finalmente estar me tornando Mestre. Olhando um pouco para trás, vejo que eu tenho muito a agradecer, não apenas pelas oportunidades que eu tive, embora isso seja evidente, mas principalmente pelas pessoas que cruzaram o meu caminho e pelas que já estavam comigo e trilharam esse caminho junto de mim. Um fato nisso tudo é que eu jamais teria conseguido sozinho. Neste momento, gostaria de manifestar meu profundo reconhecimento a todos que possibilitaram transformar os meus desafios em conquistas e que, com muito amor, não mediram esforços para que eu subisse este degrau.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, que não somente durante essa jornada do mestrado, mas em todos os momentos da minha vida, sempre me deu forças para que eu pudesse seguir em frente, principalmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço, de maneira mais que especial, aos grandes e verdadeiros amores da minha vida, meus pais Maria Aparecida Ribeiro e José Pereira da Silva, que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas e sempre me encorajaram a ir mais longe do que eu imaginava ser capaz de ir. Mesmo em uma imensidão incalculável de existências, eu não conseguiria retribuir tudo o que vocês fizeram e continuam fazendo por mim. Agradeço também aos meus irmãos Isabelle Ribeiro e Guilherme Ribeiro, por sempre torcerem pela minha felicidade e por acreditarem tanto nos meus sonhos. Eu jamais seria capaz de descrever em palavras a grandeza do amor que sinto por vocês e a sorte que é tê-los comigo.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador Professor Dr. Gerald Norbert, por uma série de motivos significativos: primeiramente por ter me apresentado, com fascínio, o vasto universo da modelagem hidrológica, por todo o conhecimento compartilhado durante essa trajetória e pelo imenso apoio que recebi quando decidi me inscrever no programa de doutorado da Unicamp. Além disso, agradeço pela paciência em esclarecer todas as minhas dúvidas e por continuar confiando em mim, mesmo quando não consegui cumprir alguns prazos. Esta pesquisa jamais teria sido possível sem a sua contribuição.

Da mesma forma, também agradeço ao meu coorientador Professor Dr. Cristiano Almeida, por acreditar neste projeto desde o início, e acima de tudo pela sua notável

dedicação à ciência e à pesquisa científica. Aproveito para agradecer também aos membros da minha Banca Examinadora, Professor Dr. Celso Guimarães, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (DECA-UFPB) e Professor Dr. Jaime Cabral, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (DECIVIL-UFPE), por todas as contribuições dadas ao meu trabalho, e principalmente por serem grandes referências para mim. Sinto-me extremamente orgulhoso por ter a minha pesquisa enriquecida pela expertise de dois dos mais destacados pesquisadores na área de Recursos Hídricos, tanto no Brasil quanto no mundo.

Quero expressar imensa gratidão à Professora Dr.^a Rosmeri Porfírio, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), pela gentileza em me fornecer os dados de projeções climáticas do CORDEX, essenciais para que essa dissertação pudesse ser concretizada. Agradeço pela sua simpatia desde a nossa primeira troca de e-mails, por ter reconhecido o valor desta pesquisa e pelo interesse em me ajudar, mesmo não me conhecendo pessoalmente. Espero um dia poder conhecê-la e retribuí-la.

Gratidão também à Professora Dr.^a Josiclêda Galvêncio, do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco (DCG-UFPE), que se dispôs a me explicar algumas coisas sobre a interface do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer). Da mesma forma, estendo meus agradecimentos a Rodrigo Miranda, pós-doutorando da University of Guelph, Canadá, pelos esclarecimentos adicionais sobre o SUPer, na reta final desta pesquisa.

Agradeço, de uma forma muito especial, ao meu grande amigo Ítalo Carvalho, por ter estado sempre ao meu lado, principalmente nos momentos que mais precisei, e por ser um dos maiores entusiastas da minha causa, sempre enxergando o melhor de mim. Obrigado por me ensinar a rir das nossas dificuldades e a ter a certeza de que as coisas sempre vão dar certo. Este agradecimento é uma manifestação genuína do reconhecimento do valor da nossa amizade, que com absoluta certeza é algo que vai além desta vida.

Carinhosamente também deixo registrado aqui o meu amor e os meus mais sinceros agradecimentos à minha amiga Tamires Amorim, por sempre acreditar nos meus sonhos e por nunca me deixar abaixar a cabeça, sempre torcendo muito por mim e me motivando a ir cada vez mais longe. Agradeço imensamente por me mostrar como a vida pode ser simples e boa, e por me ensinar a sempre enxergar a beleza das coisas. Só consigo pensar que em um mundo tão grande, tão cheio de gente e tão vasto e imenso em tempo e espaço, em meio à uma infinidade de possibilidades, eu tive a sorte de ter te encontrado. Sou

também extremamente grato a Thainá Dantas, pela nossa amizade ser tão leve e genuína, e por estar sempre comigo, me apoiando e me encorajando a alçar voos cada vez mais altos, e eu sei que isso não se faz sem amar e querer bem. Eu não conseguiria descrever com palavras a singularidade e a fortuna que é ter você na minha vida.

Com imensa gratidão, também expresso meu reconhecimento a todos os amigos que fiz na luta frente ao Ativismo Socioambiental durante esses dois anos de vivência e resistência na Paraíba. Deixo aqui os meus agradecimentos ao Greenpeace Jampa, à Fundação SOS Mata Atlântica e ao projeto Mares Sem Plástico, pela dedicação constante e incansável na defesa do meio ambiente e na busca por um mundo mais justo, igualitário e sustentável.

Também gostaria de destacar o projeto de implantação da Horta Orgânica da Comunidade do Timbó, na Zona Sul de João Pessoa. Foi uma honra estar à frente desse projeto, ao lado da minha amiga e fonte inesgotável de inspiração Tamires Amorim. Gostaria de enaltecer os verdadeiros protagonistas dessa empreitada: Rey, William, Ruan, Jefferson, Allan, Renan, João Pedro e Wellington. Jovens pretos, crias da favela e amantes de futebol, que continuam a sonhar por um futuro melhor e a persistir, mesmo em meio às dificuldades. Sendo muito honesto, tenho diversas razões para agradecê-los, primeiramente por dedicarem suas manhãs de sábado para que esse projeto pudesse existir. Além disso, agradeço por resignificarem algumas coisas na minha vida, me mostrando que existe uma engenharia complexa por trás da simplicidade, e que isso é o tipo de coisa que a gente não aprende nos livros. E para ilustrar com as palavras de um pensador contemporâneo que eles me apresentaram, cito aqui MC Ryan SP: “Eu vou sonhar, vou conquistar, eu vou atrás”.

Gostaria de agradecer a Ana Carolina Bonfim, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC-UFPE), por ter sido uma parceira incrível ao longo dessa trajetória, pelas inúmeras reuniões pelo Google Meet e pelas trocas de conhecimento e colaborações mútuas, que com certeza tornaram os obstáculos um pouco mais fáceis de serem vencidos. Agradeço também a Avani Torres, pela amizade verdadeira que solidificamos durante essa caminhada e por ter me ajudado tanto em um dos momentos que mais precisei, facilitando minha mudança e permanência em João Pessoa, no início de 2022, quando eu estava meio perdido.

Quero agradecer também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (PPGECAM-UFPB), por possibilitar a realização deste sonho e pelo inestimável compromisso com os seus alunos, sempre os

incentivando a buscarem mais. Foram dois anos de muitos desafios, mas também de muito aprendizado e crescimento, e eu me sinto muito honrado em ter feito parte deste Programa.

Estendo os meus agradecimentos a todos os professores do PPGECAU-UFPB, com uma menção especial àqueles com quem tive o imenso prazer de aprender como aluno. Agradeço, acima de qualquer coisa, por reconhecerem o poder transformador que a educação tem na vida das pessoas, e pelo comprometimento, paciência e valiosas orientações, que foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal, e que transcenderam os rígidos ofícios da pós-graduação. Agradeço também a Millena Dayse, Raul Muniz, Deivid Araújo, Josi Guss, Aldilene Pinheiro, Filipe Carvalho, Cinthia Maria e Sérgio Pereira, verdadeiras amizades que construí ao longo do mestrado, e que tornaram essa trajetória um pouco mais fácil e com toda certeza muito mais prazerosa.

Além disso, gostaria de expressar minha profunda gratidão à Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que se tornou minha segunda casa ao longo desses dois últimos anos. Mesmo diante dos desafios impostos pelo desmonte da Universidade, na gestão do atual Reitor Valdíney Gouveia, a UFPB continua a resistir e a perseverar em sua missão educacional. É importante destacar que apesar da postura opressiva e autoritária do atual Reitor, a grandeza e a importância da Universidade transcendem qualquer gestão passageira. A UFPB é uma instituição sólida, e a comunidade acadêmica permanece firme na busca pela excelência e na defesa dos princípios éticos que norteiam a educação superior em nosso país. Agradeço a todos que, com dedicação e comprometimento, fazem desta Instituição um espaço de aprendizado, pesquisa e resistência. A Universidade prevalecerá, bem como o seu compromisso com o conhecimento e a liberdade acadêmica, superando qualquer obstáculo momentâneo.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado, que viabilizou não só a minha permanência em João Pessoa, como também a concretização desta etapa tão importante da minha vida. E por fim, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos os brasileiros, com especial reconhecimento à classe trabalhadora, por serem os verdadeiros pilares que sustentam e patrocina as Universidades Públicas.

RESUMO

As mudanças climáticas impõem uma ameaça significativa aos recursos hídricos, intensificando eventos climáticos extremos e modificando padrões de temperatura e precipitação. Essa problemática pode comprometer a disponibilidade de água, demandando abordagens sustentáveis e adaptações eficazes para enfrentar os desafios hídricos emergentes. Este estudo oferece uma análise dos possíveis impactos dessas mudanças no balanço hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, localizada em Pernambuco, Nordeste do Brasil, considerando as relações entre padrões climáticos, evapotranspiração e fluxos hidrológicos. As simulações foram realizadas por meio do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer), que utiliza a modelagem do SWAT como mecanismo base. Os ambientes hidrológicos foram gerados a partir de projeções do CORDEX, na janela temporal 2030-2099, sob o cenário RCP8.5, proporcionando uma visão detalhada dos possíveis futuros hídricos da bacia. Para abordar essa problemática, a pesquisa adotou a ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática, utilizando estatísticas das projeções climáticas para alimentar o SUPer. As projeções foram obtidas a partir das médias anuais de todos os pontos dispostos ao longo da bacia, agrupadas em intervalos decenais, proporcionando uma análise detalhada dos padrões climáticos futuros. Ao aplicar os conjuntos de projeções climáticas, a pesquisa mapeou aumentos nas taxas de evapotranspiração potencial e real em comparação com o balanço hídrico de referência. Entre os sete contextos analisados, destaca-se o de número 4, referente à década 2060-2069, como o mais crítico, apresentando o maior crescimento percentual na evapotranspiração real (8,40%). Em todas as situações, mesmo com um aumento nos volumes pluviométricos, observou-se simultaneamente um aumento na evapotranspiração real, destacando a complexidade da interação entre temperatura e precipitação. Os resultados revelam ainda uma tendência preocupante de um aumento de até 4 °C na temperatura média até o final do século, aumentando consequentemente a demanda atmosférica por água, e enfatizando a necessidade crítica de estratégias adaptativas específicas diante das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: mudanças climáticas, bacia hidrográfica, balanço hídrico, SWAT, modelagem hidrológica.

ABSTRACT

Climate change poses a significant threat to water resources, intensifying extreme climate events and altering temperature and precipitation patterns. This issue can compromise water availability, requiring sustainable approaches and effective adaptations to address emerging water challenges. This study provides an analysis of the potential impacts of these changes on the water balance of the Capibaribe River Basin, located in Pernambuco, Northeast Brazil, considering the relationships between climate patterns, evapotranspiration, and hydrological flows. Simulations were conducted through the Hydrological Response Unit System for Pernambuco (SUPer), utilizing SWAT modeling as the foundational mechanism. Hydrological scenarios were generated from CORDEX projections within the 2030-2099 timeframe, under the RCP8.5 scenario, offering a detailed insight into possible future hydrological conditions in the basin. To address this issue, the research adopted the tool of sensitivity and climate variability analyses, using statistics from climate projections to feed into SUPer. Projections were derived from annual averages across all points along the basin, grouped in decadal intervals, providing a detailed analysis of future climate patterns. By applying sets of climate projections, the study mapped increases in potential and actual evapotranspiration rates compared to the reference water balance. Among the seven contexts analyzed, scenario number 4, corresponding to the 2060-2069 decade, stands out as the most critical, presenting the highest percentage growth in actual evapotranspiration (8.40%). In all situations, even with an increase in rainfall volumes, a simultaneous rise in actual evapotranspiration was observed, highlighting the complexity of the interaction between temperature and precipitation. The results also reveal a concerning trend of up to a 4 °C increase in average temperature by the end of the century, consequently elevating atmospheric water demand and emphasizing the critical need for specific adaptive strategies in the face of climate change.

KEYWORDS: climate change, watershed, water balance, SWAT, hydrological modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização simplificada do processo de <i>downscaling</i> (regionalização) de modelos climáticos globais	32
Figura 2 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com sua discretização	38
Figura 3 - Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.....	59
Figura 4 - Identificação dos municípios localizados total ou parcialmente na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe	60
Figura 5 - Regime pluviométrico médio anual na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe .	62
Figura 6 - Perfil de elevação e visualização hipsométrica da Bacia do Rio Capibaribe	64
Figura 7 - Mapa de tipos de solos que compõem a Bacia do Rio Capibaribe	65
Figura 8 - Mapa das classes de uso e ocupação do solo presentes na Bacia do Rio Capibaribe	67
Figura 9 - Interface do SUPER.....	71
Figura 10 - Ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática do SUPER ..	72
Figura 11 - Obtenção de diferentes saídas e interface do SUPER após a execução do projeto	73
Figura 12 - Identificação da sub-bacia 42 na Bacia do Rio Capibaribe	74
Figura 13 - Localização dos pontos utilizados para a obtenção das projeções climáticas do CORDEX ao longo da Bacia do Rio Capibaribe	77
Figura 14 - Divisão da Bacia do Rio Capibaribe em Unidades de Afluência	78
Figura 15 - Isoietas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe	79
Figura 16 - Isotermas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe	80
Figura 17 - Comparação das médias anuais de temperatura projetadas e obtidas do CORDEX (2030-2099)	85

Figura 18 - Média anual de temperatura para a Bacia do Rio Capibaribe obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)	86
Figura 19 - Média anual de temperatura e acumulados de chuva na Bacia do Rio Capibaribe por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)	86
Figura 20 - Médias dos acumulados mensais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe obtidos por meio de projeções do CORDEX (2030-2099).....	87
Figura 21 - Médias anuais de temperatura na fração Agreste da Bacia do Rio Capibaribe obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)	89
Figura 22 - Acumulados anuais de precipitação na fração Agreste da Bacia do Rio Capibaribe obtidos por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)	89
Figura 23 - Médias anuais de temperatura na fração correspondente à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife, que integram a Bacia do Rio Capibaribe, e obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)	90
Figura 24 - Acumulados anuais de precipitação na fração correspondente à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife, que integram a Bacia do Rio Capibaribe, e obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099).....	91
Figura 25 - Médias anuais de temperatura na Bacia do Rio Capibaribe, obtidas por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais	92
Figura 26 - Acumulados anuais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe, obtidos por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais	93
Figura 27 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe	94
Figura 28 - Média diária mensal da precipitação na Bacia do Rio Capibaribe	95
Figura 29 - Média diária mensal de evapotranspiração potencial na Bacia do Rio Capibaribe	96
Figura 30 - Média diária mensal de evapotranspiração real na Bacia do Rio Capibaribe...	97

Figura 31 - Média diária mensal de fluxo de base na Bacia do Rio Capibaribe	98
Figura 32 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 1 de variabilidade climática (2030-2039)	99
Figura 33 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 2 de variabilidade climática (2040-2049)	99
Figura 34 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 3 de variabilidade climática (2050-2059)	100
Figura 35 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 4 de variabilidade climática (2060-2069)	100
Figura 36 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 5 de variabilidade climática (2070-2079)	101
Figura 37 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 6 de variabilidade climática (2080-2089)	101
Figura 38 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 7 de variabilidade climática (2090-2099)	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização dos Modelos Hidrológicos.....	39
Tabela 2 - Principais Modelos Hidrológicos utilizados na literatura	41
Tabela 3 - Principais Modelos Climáticos utilizados na literatura	42
Tabela 4 - Conjuntos de temperatura e precipitação para realização das simulações	82
Tabela 5 - Alteração das evapotranspirações potenciais e reais entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico de referência.....	103
Tabela 6 - Perda percentual da precipitação por evapotranspiração real em cada cenário	104
Tabela 7 - Aumentos percentuais de percolação, escoamento lateral, fluxo de base e escoamento superficial entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico atual	106

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Balanço Hídrico Simplificado.....	49
Equação 2 – Green-Ampt.....	49
Equação 3 – <i>SCS Curve Number</i>	49
Equação 4 – Penman-Monteith.....	50
Equação 5 – Equação Universal de Perdas de Solo.....	50
Equação 6 – <i>Aquifer Response Unit</i>	50
Equação 7 – Estimativa da Temperatura no SUPer.....	52
Equação 8 – Estimativa da Precipitação no SUPer.....	53
Equação 9 – Estimativa do Escoamento de Base no SUPer.....	53
Equação 10 – Estimativa do Balanço Hídrico no SUPer.....	54
Equação 11 – <i>Inverse Distance Weighting</i>	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1. Mudanças climáticas e vulnerabilidades em escala regional	29
2.2. Gestão integrada dos recursos hídricos na adaptação aos impactos das mudanças climáticas no contexto de bacias hidrográficas	34
2.3. Modelagem hidrológica e projeções climáticas	37
2.4. Incertezas e limitações na modelagem hidrológica e nas projeções climáticas aplicadas a bacias hidrográficas	42
2.5. O modelo <i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT)	47
2.6. O Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer)	51
2.7. O papel da disponibilidade hídrica na sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas	54
3. ÁREA DE ESTUDO	59
3.1. Clima	60
3.2. Relevo	63
3.3. Tipos de solo	65
3.4. Uso e ocupação do solo	66
4. MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1. Utilização do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer).....	69
4.2. Obtenção e incorporação das projeções climáticas do CORDEX ao SUPer.....	75
4.3. Panoramas de mudanças climáticas	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
5.1. Projeções climáticas do CORDEX	84

5.1.1. Projeções CORDEX de temperatura e precipitação na Bacia do Rio Capibaribe – Fração Agreste.....	88
5.1.2. Projeções CORDEX de temperatura e precipitação na Bacia do Rio Capibaribe - Fração Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife	90
5.2. Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe.....	93
5.3. Balanços hídricos médios anuais da Bacia do Rio Capibaribe após a utilização da ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática.....	98
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
6.1. Recomendações para estudos futuros.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

CAPÍTULO I



1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica é uma preocupação crucial em todo o planeta, sendo fundamental para o desenvolvimento sustentável das regiões e para a garantia das necessidades básicas do meio ambiente e da população. No entanto, as mudanças climáticas têm potencializado os desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos, gerando incertezas quanto à qualidade e quantidade de água disponível.

Atualmente, muitas regiões do globo terrestre estão sofrendo com problemas econômicos e socioambientais relacionados à dinâmica de distribuição espaço-temporal dos recursos hídricos, isto é, observa-se cada vez mais a ocorrência de eventos climatológicos extremos, como chuvas intensas em algumas localidades, concentradas em poucos meses do ano, em contrapartida a períodos cada vez mais longos de estiagem, que acometem outras regiões, especialmente as que estão inseridas em contextos ambientais semiáridos, como por exemplo, o Nordeste Brasileiro (PBMC, 2016).

Essas modificações recebem influência direta do agravamento nos cenários de comportamento climático, que se configuram como alterações na temperatura média global, sendo esses, fenômenos que já ocorrem desde a formação do planeta Terra - e foram fundamentais na história evolutiva - porém na contemporaneidade estão sofrendo oscilações rápidas e em grandes magnitudes, essencialmente em decorrência das ações antrópicas poluentes (Bressiani *et al.*, 2015).

As mudanças climáticas são fenômenos globais de grande relevância, influenciados principalmente pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), espera-se que tais mudanças tenham efeitos significativos no ciclo hidrológico, alterando a distribuição temporal e espacial da precipitação, da evapotranspiração e dos padrões de escoamento. Essas alterações podem resultar em eventos extremos mais frequentes, afetando diretamente a disponibilidade hídrica em muitas regiões, seja em termos de escassez ou de excesso de chuvas.

Segundo Marengo *et al.* (2011), o Nordeste Brasileiro é uma região extremamente vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, no qual com a continuidade dos aumentos de temperatura, a região pode se tornar árida em algumas localidades, impactando diretamente a agricultura de subsistência, bem como a disponibilidade de água, e consequentemente a saúde da população, ou desencadear uma variação no comportamento pluvial, promovendo chuvas intensas com maior frequência, ocasionando assim, enchentes

e inundações em outros pontos específicos. Vários estudos relacionados à compreensão dos regimes pluviais em escalas de bacias hidrográficas, sejam estas, bacias com pequenas ou grandes extensões territoriais, foram e continuam sendo realizados, como por exemplo, os trabalhos de Cheung, Senay e Singh (2008); Ly, Charles e Degré (2013); e Orke e Li (2021).

A fim de compreender e antecipar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na dinâmica hidrológica, é essencial aplicar modelos hidrológicos confiáveis, capazes de simular o comportamento do sistema hídrico sob diferentes condições climáticas. A associação de modelos climatológicos com modelos hidrológicos é uma abordagem que permite analisar os efeitos que as mudanças climáticas provocarão sobre os recursos hídricos em uma determinada área de estudo (Faramarzi *et al.*, 2013; Rimmer *et al.*, 2011; Vaghefi *et al.*, 2013; Zabaleta *et al.*, 2014).

Os modelos climáticos oferecem, por exemplo, projeções futuras de precipitação e temperatura, informações que podem ser empregadas como dados introdutórios em um modelo hidrológico, obtendo assim, respostas acerca do comportamento de uma bacia hidrográfica em um determinado cenário futuro (Liu *et al.*, 2017). Dessa forma, é possível realizar uma avaliação dos efeitos nocivos que essas mudanças podem causar no que concerne à qualidade e disponibilidade hídrica, bem como entender a maneira como essas alterações irão modificar o ecossistema.

Realizar estudos a nível de bacias hidrográficas possibilita a análise de uma área que engloba, na maioria das vezes, um número considerado de municípios e cursos d'água. Através de uma observância unificada, porém detalhada, pode-se gerar informações comuns a várias subáreas que compartilham, a título de exemplo, as mesmas características de distribuição de chuvas, uso e ocupação do solo, cobertura vegetal, clima e relevo. Essas informações são cruciais para a compreensão dos processos hidrológicos e sua relação com os cenários climáticos.

Nas últimas décadas, não apenas o número, mas também a complexidade e a funcionalidade dos modelos climáticos e hidrológicos aumentaram consideravelmente, devido à disponibilidade de máquinas cada vez mais potentes, além da utilização de Sistemas de Informação Geográfica - SIG (Singh, 1995). Essas ferramentas e avanços tecnológicos têm permitido uma melhor compreensão dos processos hidrológicos e a realização de simulações mais precisas e detalhadas.

Para compreender e projetar os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica, é essencial utilizar modelos hidrológicos avançados. Nesse sentido, o modelo

SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) destaca-se como uma ferramenta empregada para simular processos hidrológicos complexos em bacias hidrográficas. Esse modelo integra informações espaciais, hidrológicas e meteorológicas para simular o comportamento dos fluxos de água e nutrientes em uma área específica, permitindo ainda a avaliação dos efeitos de diferentes cenários climatológicos, como apontado por Viana *et al.* (2018).

A escolha do modelo SWAT como base para inúmeras pesquisas se justifica pela sua robustez e ampla aplicabilidade em estudos hidrológicos. Segundo Nangombe, Faramarzi e Beevers (2020), ele foi desenvolvido com base em princípios físicos e tem sido amplamente utilizado para avaliar os efeitos das mudanças de clima na disponibilidade hídrica em diversas regiões do mundo.

O Estado de Pernambuco enfrenta desafios específicos relacionados à escassez de água, mas também graves problemas de ocorrência de chuvas intensas, que desencadeiam enchentes, inundações e deslizamentos de encostas, fenômenos esses cada vez mais influenciados pelos impactos das variações climáticas, sobretudo na fração litorânea. Como exemplo, o município de Recife, capital do Estado, e localizado dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, foi classificado como a 16ª cidade mais ameaçada do planeta pelas mudanças climáticas com o aumento do nível do mar, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, 2021).

Além disso, diversas atividades econômicas e setores-chave, como agricultura, abastecimento público e geração de energia, dependem diretamente da disponibilidade de água. Sendo assim, verifica-se que a análise de bacias hidrográficas desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias de mitigação e gestão sustentável, visando garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade socioambiental.

Observando essas problemáticas, pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em parceria com pesquisadores da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Unidade do Semiárido (EMBRAPA-SEMIÁRIDO), do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), da *Texas A&M AgriLife Research*, da *Texas A&M University* e do *USDA Agricultural Research Service* desenvolveram o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer).

O SUPer é um sistema avançado de modelagem hidrológica e qualidade de água que emprega o modelo SWAT como seu mecanismo central, disponibilizando uma

interface web interativa, mapas, dados de entrada pré-carregados, e gerando resultados abrangentes, como tabelas, gráficos e dados de saída, além de fornecer um guia do usuário e suporte para o desenvolvimento, execução e armazenamento online de projetos de modelagem (Galvêncio, 2021).

Considerando o cenário contextual, esta pesquisa teve como objetivo principal analisar os efeitos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe, situada em Pernambuco, Nordeste do Brasil. Para alcançar esse propósito, utilizou-se a modelagem SWAT, integrando projeções climáticas do *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX) ao sistema SUPeR. A análise foi focada no cenário RCP8.5 e no período entre 2030 e 2099, oferecendo uma perspectiva abrangente sobre os potenciais efeitos das mudanças climáticas na região.

Através do emprego desse modelo, buscou-se investigar a disponibilidade hídrica futura nessas regiões, identificando possíveis cenários de escassez ou excesso de água, a fim de fornecer subsídios relevantes para a gestão integrada de recursos hídricos e para a mitigação de potenciais problemas socioambientais e geopolíticos.

Como objetivos específicos da pesquisa têm-se:

- Realizar a caracterização detalhada da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe em termos de suas características hidrológicas, climáticas e geoespaciais;
- Avaliar o balanço hídrico da bacia em diferentes conjunturas de projeções climáticas, isto é, por meio de combinações específicas de aumentos de temperatura e alterações na precipitação, com base nas projeções do CORDEX, e considerando intervalos decenais dentro do horizonte temporal 2030-2099;
- Analisar as projeções do CORDEX considerando a divisão da bacia hidrográfica em duas regiões distintas: a primeira, compreendendo a fração que compõe a parcela da Mesorregião do Agreste e, a segunda, englobando a Mata Pernambucana e Região Metropolitana do Recife, a fim de fornecer uma compreensão mais detalhada do comportamento hidroclimático, levando em consideração a complexidade e a heterogeneidade da bacia;
- Fornecer subsídios para a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, oferecendo informações que possam contribuir para a adaptação e mitigação de impactos socioambientais decorrentes das mudanças climáticas, bem como auxiliar na elaboração de estratégias de uso sustentável dos recursos hídricos nessas regiões.

Ao utilizar o SUPER na referida bacia, foi possível analisar como as mudanças climáticas poderão afetar o comportamento hidrológico futuro nessa área. Os resultados obtidos poderão subsidiar tomadas de decisão fundamentadas e a implementação de medidas adequadas, visando minimizar os impactos negativos associados às mudanças no regime hidrológico. Além disso, espera-se que as respostas encontradas se tornem uma ferramenta essencial para a adoção de estratégias de gestão sustentável frente à dinâmica dos recursos hídricos, contribuindo para enfrentar os desafios socioambientais e geopolíticos decorrentes do cenário de mudanças climáticas na região em análise.

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, cada um abordando aspectos cruciais para o desenvolvimento deste estudo. Neste primeiro capítulo (INTRODUÇÃO), foi apresentada uma contextualização ampla sobre o tema da pesquisa, bem como os principais componentes deste trabalho, incluindo os objetivos almejados. O segundo capítulo (FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA) abrange as referências teóricas relacionadas aos elementos centrais deste estudo. São discutidos aspectos como as mudanças climáticas, a vulnerabilidade a que muitos ambientes estão submetidos, modelagem hidrológica, gestão dos recursos hídricos, projeções climáticas e respostas hidrológicas a nível de bacias hidrográficas, além de conceituações sobre o modelo SWAT e o Sistema SUPER.

No terceiro capítulo (ÁREA DE ESTUDO), são abordadas as características da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, com enfoque nos aspectos de clima, hidrologia, solos, relevo e outras informações relevantes. O quarto capítulo (MATERIAIS E MÉTODOS) detalha a metodologia adotada para atingir os objetivos propostos. Os resultados obtidos ao longo da dissertação, incluindo análises das projeções climáticas do CORDEX e das repostas hidrológicas obtidas através do SUPER, bem como discussões acerca dos efeitos de mudanças climáticas, são apresentados no quinto capítulo (RESULTADOS E DISCUSSÕES). Por fim, a última seção (CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES) traz as considerações finais em relação aos resultados obtidos durante a pesquisa, além da abordagem de recomendações para a realização de estudos futuros.

CAPÍTULO II



2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está compartimentado em seis partes, de acordo com os elementos fundamentais para a compreensão da proposta desse estudo. Na primeira parte é realizada uma conceituação acerca das mudanças climáticas, dando ênfase aos efeitos causados ao meio ambiente e também às características de vulnerabilidade regional a que muitos ambientes estão submetidos frente às alterações no comportamento do clima. Na segunda parte são apresentados conceitos acerca da importância da gestão integrada dos recursos hídricos na adaptação aos impactos das mudanças climáticas no contexto de bacias hidrográficas.

Na terceira parte da fundamentação teórica são abordados aspectos sobre a modelagem hidrológica e as projeções climáticas, evidenciando a importância de se integrar essas duas ferramentas metodológicas, a fim de se projetar cenários hidrológicos futuros frente à influência dos avanços de poluição atmosférica e dos agravamentos da crise climática. Na quarta parte realizamos uma abordagem acerca das incertezas e limitações na modelagem hidrológica e projeções climáticas aplicadas às bacias hidrográficas, destacando a importância de analisar os resultados de forma cautelosa e considerar diferentes cenários para tomadas de decisões mais robustas e efetivas em relação à gestão dos recursos hídricos.

A quinta parte traz informações relevantes acerca do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), interface utilizada nesta pesquisa para realização da modelagem hidroclimatológica, sendo assim, são exploradas as suas características, capacidades no que concerne ao alcance de projeções hidrológicas considerando as mudanças climáticas, e seu funcionamento teórico e metodológico. Levando em consideração que o SUPER utiliza como mecanismo de modelagem, o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), também é discutido sobre este modelo ao longo da sexta parte. Por fim, na sétima seção é discutido o papel da disponibilidade hídrica na sustentabilidade socioambiental, na manutenção de atividades de subsistência e na garantia de vida à sociedade e ao meio natural.

2.1. Mudanças climáticas e vulnerabilidades em escala regional

As mudanças climáticas referem-se a alterações significativas e de longo prazo nos padrões e condições climáticas da Terra. Essas mudanças são impulsionadas por uma

variedade de fatores, incluindo atividades humanas e fenômenos naturais (IPCC, 2014). Nos últimos séculos, o aumento das emissões de gases de efeito estufa, decorrentes de atividades industriais, queima de combustíveis fósseis e índices crescentes de desmatamento, têm desempenhado um papel fundamental no agravamento das mudanças climáticas.

Essas atividades antrópicas têm contribuído para o aquecimento global e para uma série de impactos climáticos, como o aumento da temperatura média na superfície da Terra, mudanças nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos. Além disso, as mudanças climáticas também são influenciadas por fatores naturais, como atividades vulcânicas e variações nas órbitas terrestres (IPCC, 2014; NASA, 2021).

De acordo com Marengo (2008), essas mudanças têm implicações profundas e variadas para os ecossistemas, comunidades humanas, economias e recursos naturais. Portanto, a compreensão das mudanças climáticas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação que visem minimizar os efeitos adversos e garantir a sustentabilidade ambiental e social no futuro.

As mudanças climáticas têm se revelado como um dos principais desafios globais do século XXI, provocando alterações significativas em todo o mundo. Essas transformações manifestam-se em diversas dimensões, incluindo padrões de temperatura mais extremos, eventos climáticos mais intensos, alterações nos regimes de precipitação e impactos notáveis nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Além disso, observa-se uma influência significativa nas atividades humanas, afetando setores como agricultura, recursos hídricos, saúde pública e infraestrutura.

Essa ampla gama de impactos destaca a complexidade e a abrangência das mudanças climáticas, exigindo abordagens multidisciplinares e esforços colaborativos para enfrentar esse desafio crescente. Em escala regional, os efeitos dessas mudanças se manifestam de maneira peculiar, trazendo consigo vulnerabilidades específicas e desafiadoras para as comunidades e ecossistemas locais (Alpino *et al.*, 2022).

Segundo Tavares, Arruda e Silva (2019), as causas das mudanças climáticas regionais estão intrinsecamente ligadas às atividades humanas, tais como a emissão de gases de efeito estufa, resultantes da queima de combustíveis fósseis, a expansão da agricultura e a degradação dos ecossistemas naturais. Esses fatores contribuem para o aumento das temperaturas médias, a intensificação de eventos climáticos extremos e o desequilíbrio nos ciclos hidrológicos.

A vulnerabilidade das regiões às mudanças climáticas é influenciada por uma série de fatores complexos, incluindo características geográficas, socioeconômicas e ambientais. Regiões costeiras estão particularmente expostas ao risco de elevação do nível do mar e eventos climáticos extremos, enquanto áreas agrícolas podem enfrentar desafios relacionados à disponibilidade de água e alterações nos padrões de cultivo (Roderick, Wasko e Sharma, 2019; Tabari, 2020).

Os sistemas naturais também são afetados pelas mudanças climáticas regionais, levando à perda de biodiversidade, mudanças na distribuição de espécies e ocorrência de fenômenos climáticos extremos, como secas prolongadas e tempestades intensas. Para enfrentar essas vulnerabilidades e mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas em escala regional, ações de adaptação são fundamentais.

De acordo com Tang *et al.* (2019) a adaptação envolve a implementação de estratégias que visem fortalecer a resiliência das comunidades e dos ecossistemas. Isso inclui o desenvolvimento de infraestruturas mais resilientes, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, a proteção e restauração de áreas naturais e a implementação de políticas de gestão de riscos climáticos. Além disso, a integração de conhecimentos científicos, tecnológicos e tradicionais é essencial para desenvolver políticas de adaptação efetivas e engajar a população local na tomada de decisões relacionadas às mudanças climáticas.

Em suma, a compreensão das mudanças climáticas e vulnerabilidades em escala regional é de extrema importância para direcionar políticas públicas, planejamentos e ações que possam contribuir para a resiliência e sustentabilidade das comunidades e ecossistemas frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. A pesquisa científica contínua e a cooperação internacional são fundamentais para enfrentar esse cenário complexo e promover a construção de um futuro mais resiliente e adaptativo para as regiões afetadas pelas mudanças climáticas.

Segundo Salmi e Fleury (2022), a compreensão aprofundada das mudanças climáticas em escala regional requer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo não apenas as ciências naturais, mas também as ciências sociais e as ciências humanas. A análise dos efeitos das mudanças climáticas em diferentes regiões é sustentada pelo uso fundamental de estudos de modelagem climática e projeções futuras.

Uma abordagem crucial nesse processo envolve a aplicação de técnicas de *downscaling* às projeções climáticas globais, permitindo a redução da escala geográfica e, por conseguinte, a obtenção de projeções climáticas em níveis regionais, como mostra a

Figura 1. Essa estratégia refinada proporciona uma visão mais detalhada e precisa das alterações climáticas em áreas específicas, permitindo uma avaliação mais precisa dos impactos potenciais que essas mudanças podem ter. Essas projeções fornecem informações valiosas para orientar a formulação de estratégias de adaptação e mitigação (Fleury, Miguel e Taddei, 2019).

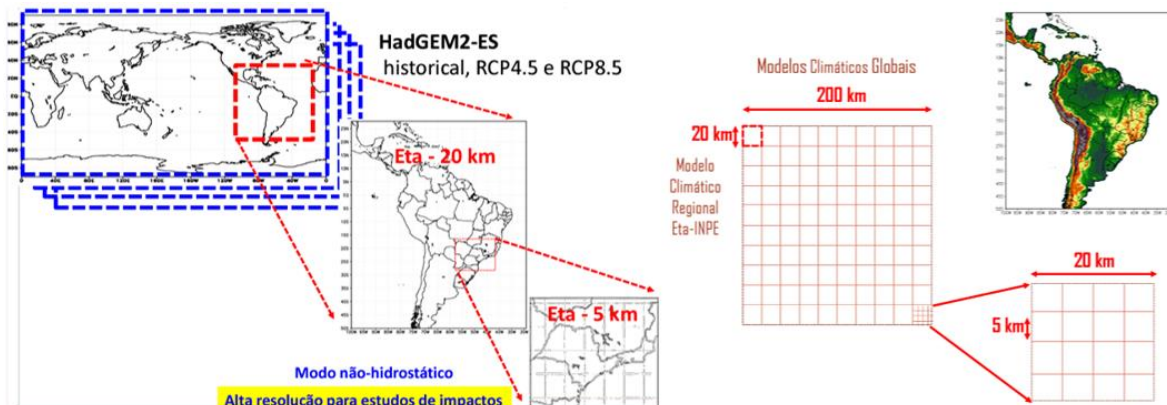


Figura 1 - Esquematização simplificada do processo de *downscaling* (regionalização) de modelos climáticos globais. Fonte: Lyra (2018); Marengo et al. (2007)

Além disso, a vulnerabilidade de uma região às mudanças climáticas é fortemente influenciada pelo grau de desenvolvimento socioeconômico e pela capacidade institucional para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças ambientais. Comunidades com baixa capacidade de resposta e recursos limitados podem ser mais suscetíveis a eventos climáticos extremos e a perturbações nos sistemas naturais, como apontado por Carlos, Cunha e Pires (2019).

A gestão integrada dos recursos hídricos é um aspecto crucial no contexto das mudanças climáticas em escala regional. A disponibilidade e distribuição de recursos hídricos podem ser alteradas significativamente por mudanças no regime de chuvas e pela elevação do nível do mar. Nesse sentido, estratégias de conservação, armazenamento e uso eficiente da água são fundamentais para garantir a segurança hídrica das populações locais e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos (Cunha, Coelho e Féres, 2015; Pires e Cunha, 2014; Schembergue *et al.*, 2017).

No que diz respeito aos setores agrícola e alimentar, as mudanças climáticas podem desencadear modificações nos padrões de cultivo, afetando a produtividade e a qualidade dos alimentos produzidos. A diversificação de culturas, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e a promoção de sistemas de produção resilientes são estratégias-chave para garantir a segurança alimentar em face das mudanças climáticas.

Segundo Fernandes, Hacon & Novais (2021), as regiões urbanas também são impactadas pelas mudanças climáticas, especialmente em relação ao aumento da temperatura devido ao chamado "efeito ilha de calor urbano". Essa elevação da temperatura pode trazer riscos à saúde da população, além de demandar maior consumo de energia para resfriamento de ambientes internos. A implementação de estratégias de adaptação nas cidades, como o planejamento de áreas verdes, a melhoria da infraestrutura urbana e a promoção da mobilidade sustentável, pode contribuir significativamente para mitigar os efeitos do calor excessivo.

A questão da equidade social também é um fator crítico quando se trata de vulnerabilidades regionais às mudanças climáticas. Populações mais vulneráveis, como comunidades tradicionais, povos indígenas e grupos de baixa renda, são frequentemente as mais afetadas pelos eventos climáticos extremos e têm menos recursos para se adaptar (Artaxo, 2020). É fundamental que as políticas de enfrentamento das mudanças climáticas sejam sensíveis às necessidades específicas dessas comunidades e busquem promover a justiça social e a inclusão.

De acordo com Mengistu *et al.* (2021), à medida que as mudanças climáticas se intensificam, a vulnerabilidade das bacias hidrográficas se torna uma preocupação central. Essas áreas geográficas são fundamentais para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que são delimitadas pelos limites naturais de uma rede de rios e seus afluentes, abrangendo uma variedade de ecossistemas e comunidades humanas. O entendimento das mudanças climáticas e suas implicações específicas para as bacias hidrográficas é essencial para o planejamento adequado e sustentável dos recursos hídricos.

Os efeitos das mudanças climáticas em bacias hidrográficas podem variar consideravelmente devido à diversidade de suas características geográficas, climáticas e socioeconômicas. Regiões costeiras podem enfrentar desafios adicionais devido ao aumento do nível do mar e à intrusão salina em águas subterrâneas e estuários. Por outro lado, bacias hidrográficas localizadas em regiões semiáridas podem ser mais suscetíveis a eventos de seca prolongada, o que pode afetar a disponibilidade de água para abastecimento e atividades agrícolas (Bates *et al.*, 2008; Di Baldassarre *et al.*, 2011; McCartney e Girma, 2012).

Como apontado por Bhatta *et al.* (2019), uma das principais consequências das mudanças climáticas em bacias hidrográficas é a alteração dos padrões de precipitação e escoamento. A intensificação das chuvas em determinadas áreas pode levar a inundações e deslizamentos de terra, causando danos às infraestruturas e colocando em risco a segurança

das comunidades. Ao mesmo tempo, outras regiões podem experimentar diminuição nas chuvas, resultando em diminuição das vazões dos rios e escassez hídrica, o que pode comprometer a disponibilidade de água para uso humano e atividades econômicas.

A variabilidade climática e a incerteza associada às mudanças climáticas têm implicações significativas para o gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Estratégias de adaptação devem ser desenvolvidas para enfrentar eventos climáticos extremos e incertos, além de considerar projeções futuras de disponibilidade hídrica. O planejamento adequado e o uso eficiente dos recursos hídricos são cruciais para garantir a resiliência das bacias hidrográficas e a sustentabilidade dos ecossistemas e comunidades que dependem delas (Karki *et al.*, 2017; You *et al.*, 2015; Zhan *et al.*, 2017).

A modelagem hidrológica desempenha um papel fundamental na avaliação dos impactos das mudanças climáticas em bacias hidrográficas. Khatiwada *et al.* (2016) afirmam que modelos computacionais podem simular o comportamento hidrológico, como o fluxo de água nos rios, a recarga de aquíferos e a distribuição espacial da precipitação. Esses modelos fornecem informações para o desenvolvimento de estratégias de gestão de recursos hídricos, permitindo a formulação de políticas mais eficazes e sustentáveis.

Além disso, de acordo com Chen *et al.* (2020) é fundamental considerar as interações entre os aspectos naturais e sociais em bacias hidrográficas. Comunidades locais, setores econômicos e atividades humanas estão intrinsecamente conectados aos recursos hídricos. Portanto, a gestão integrada e participativa dos recursos hídricos é essencial para garantir a equidade social, a justiça ambiental e a sustentabilidade econômica em face das mudanças climáticas.

Essa problemática representa um desafio complexo e abrangente para as bacias hidrográficas. O conhecimento científico, a cooperação entre governos e a participação da sociedade civil são fundamentais para desenvolver soluções inovadoras e eficazes. A proteção e gestão sustentável das bacias hidrográficas são essenciais para garantir a segurança hídrica e a qualidade de vida das populações, bem como a preservação dos ecossistemas aquáticos para as gerações presentes e futuras.

2.2. Gestão integrada dos recursos hídricos na adaptação aos impactos das mudanças climáticas no contexto de bacias hidrográficas

A complexa interação entre as mudanças climáticas e a disponibilidade de recursos hídricos tem destacado a urgência de implementar estratégias de adaptação eficazes para

lidar com os desafios decorrentes desse cenário em constante evolução. De acordo com Senra e Nascimento (2017), nas últimas décadas, a interdependência entre os sistemas climáticos e hidrológicos ganhou reconhecimento, impulsionando a necessidade de repensar a maneira como os recursos hídricos são gerenciados e alocados em face das mudanças climáticas.

As bacias hidrográficas, como unidades geográficas fundamentais para a gestão de recursos hídricos, têm se tornado foco de abordagens que buscam a integração de diferentes setores e interesses em prol da resiliência hídrica. Kramer e Pahl-Wostl (2014) pontuam que a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) surge como uma estratégia multidisciplinar e holística que visa otimizar a utilização dos recursos hídricos ao considerar as necessidades de múltiplos usuários e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, a adaptação aos impactos das mudanças climáticas ganha uma nova dimensão, uma vez que se torna essencial abordar os desafios climáticos e hídricos de forma integrada.

A GIRH, ao promover a colaboração entre atores governamentais, organizações da sociedade civil, setor privado e comunidades locais, estabelece uma plataforma para a identificação e implementação de estratégias de adaptação orientadas por dados científicos e conhecimento técnico. Através da aplicação de ferramentas como modelagem hidrológica avançada, análise de risco e desenvolvimento de cenários climáticos adaptativos, é possível avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas e desenvolver medidas de adaptação robustas (Machado, 2015).

Segundo Millington (2018), a sinergia entre a GIRH e a adaptação climática é especialmente pertinente em um contexto no qual eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e enchentes intensas, podem perturbar o equilíbrio hídrico e afetar significativamente comunidades e ecossistemas. A implementação de estratégias flexíveis, que consideram cenários climáticos diversos e evoluem de acordo com as mudanças observadas, é essencial para garantir a eficácia das ações de adaptação (Pollachi, 2021). A GIRH proporciona um mecanismo para a contínua avaliação e ajuste dessas estratégias à medida que as condições evoluem.

Nesse sentido, a gestão integrada dos recursos hídricos emerge como uma abordagem fundamental para abordar os desafios da adaptação climática em bacias hidrográficas. De acordo com Brito, Lopes e Neta (2019), a colaboração entre as partes interessadas, a utilização de abordagens baseadas em dados e a consideração cuidadosa dos

aspectos sociais, econômicos e ambientais são elementos-chave para desenvolver sistemas hídricos resilientes e sustentáveis.

A intersecção entre as mudanças climáticas e os recursos hídricos é complexa e multifacetada. Nesse contexto, à medida que as mudanças climáticas continuam a moldar o mundo, a aplicação prática dos princípios da GIRH na adaptação hídrica não apenas reduzirá vulnerabilidades, mas também pavimentará o caminho para uma coexistência harmoniosa entre a sociedade e os ecossistemas hídricos em um futuro em constante mudança (Cortinas, 2019; Ribeiro e Rolim, 2017).

Segundo Silva, Herreros e Borges (2017), à medida que os padrões climáticos se tornam mais voláteis e extremos, os regimes de precipitação, evaporação e a disponibilidade de água estão sendo alterados de maneiras que desafiam as estruturas tradicionais de gestão de recursos hídricos. Essas mudanças climáticas aceleradas podem resultar em eventos hidrológicos mais intensos e imprevisíveis, colocando em risco a segurança hídrica, a produção de alimentos, a energia hidrelétrica, a saúde pública e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

No entanto, a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos surge como uma resposta pragmática e sustentável a esses desafios. Essa abordagem não apenas reconhece as interconexões entre água, solo, clima, ecossistemas e sociedade, mas também busca incorporar essa compreensão em estratégias de adaptação práticas (Morais *et al.*, 2022). A GIRH considera que a água é um recurso limitado, e a gestão responsável e eficiente desse recurso requer ações coordenadas que transcendam fronteiras políticas, disciplinares e setoriais.

A adaptação aos impactos das mudanças climáticas por meio da GIRH envolve uma série de etapas interligadas. Primeiramente, é crucial avaliar os riscos climáticos e os impactos potenciais nas bacias hidrográficas. Isso requer a coleta e análise de dados climáticos, hidrológicos e socioeconômicos para entender como os padrões de fluxo de água podem mudar no futuro. Em seguida, é possível identificar vulnerabilidades específicas, como áreas suscetíveis a secas, inundações ou escassez de água, e direcionar ações adaptativas de acordo (Abers e Keck, 2017; Abrucio e Oliveira, 2017).

Além disso, a GIRH encoraja a participação ativa das partes interessadas, desde comunidades locais até agências governamentais e setor privado. A criação de plataformas para o envolvimento público e o diálogo permite a coleta de conhecimentos tradicionais, experiências locais e preocupações específicas que podem ser integradas às estratégias de adaptação. Essa abordagem inclusiva pode gerar uma maior compreensão das necessidades

e aspirações das comunidades afetadas e promover uma maior aceitação e implementação das medidas adaptativas propostas.

A alocação de recursos hídricos também é um aspecto central da adaptação baseada na GIRH. Sobral *et al.* (2018) apontam que em um contexto de incertezas climáticas, é fundamental explorar opções de gerenciamento flexíveis, como a realocação estratégica de recursos hídricos, armazenamento em épocas de excesso e uso eficiente da água em tempos de escassez. Essas estratégias podem ser guiadas por análises de risco e modelagem hidrológica avançada, permitindo uma tomada de decisão informada que minimize os impactos adversos.

Por fim, a eficácia da adaptação com base na GIRH requer uma abordagem contínua de monitoramento, avaliação e ajuste. A implementação das estratégias adaptativas deve ser vista como um processo dinâmico, capaz de responder às mudanças climáticas observadas e a novas informações científicas. Isso exige sistemas de alerta precoce, mecanismos de aprendizado contínuo e colaboração constante entre todas as partes envolvidas (Dias, 2020).

Em suma, a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos emerge como uma resposta robusta e holística aos desafios impostos pelas mudanças climáticas nas bacias hidrográficas. Através da interconexão de conhecimentos, tecnologias e práticas, essa abordagem promove a resiliência hídrica, a segurança alimentar, a sustentabilidade energética e a conservação dos ecossistemas (Puga, 2018).

2.3. Modelagem hidrológica e projeções climáticas

Os modelos hidrológicos podem ser categorizados como “concentrados”, “distribuídos” ou ainda “semi-distribuídos”, dependendo do grau de generalização ao descrever o terreno da bacia, isto é, de acordo com sua discretização, como encontra-se evidenciado na Figura 2. De acordo com Refsgaard (1996), os modelos de consideração física descrevem o ambiente natural utilizando as representações matemáticas simplificadas do fluxo de massa, momento e variadas alternativas de energia em escala local. Esses modelos são, portanto, categorizados como “distribuídos” e podem explicar a oscilação geográfica-espacial dentro de uma bacia hidrográfica.

Ruelland *et al.* (2008) afirmam que os modelos distribuídos de base física são geralmente considerados superiores aos modelos conceituais, gerando melhores respostas, isso porque representam melhor uma determinada realidade do ciclo hidrológico local.

Alguns modelos de caráter físico têm sido desenvolvidos e utilizados para realização de simulações hídrica/hidrológicas, com uma ampla aplicação em bacias hidrográficas, como por exemplo, estudos desenvolvidos por Bormann *et al.* (2007); Green *et al.* (2006) e Stackelberg *et al.* (2007), que realizaram modelagens e simulações utilizando o SWAT.

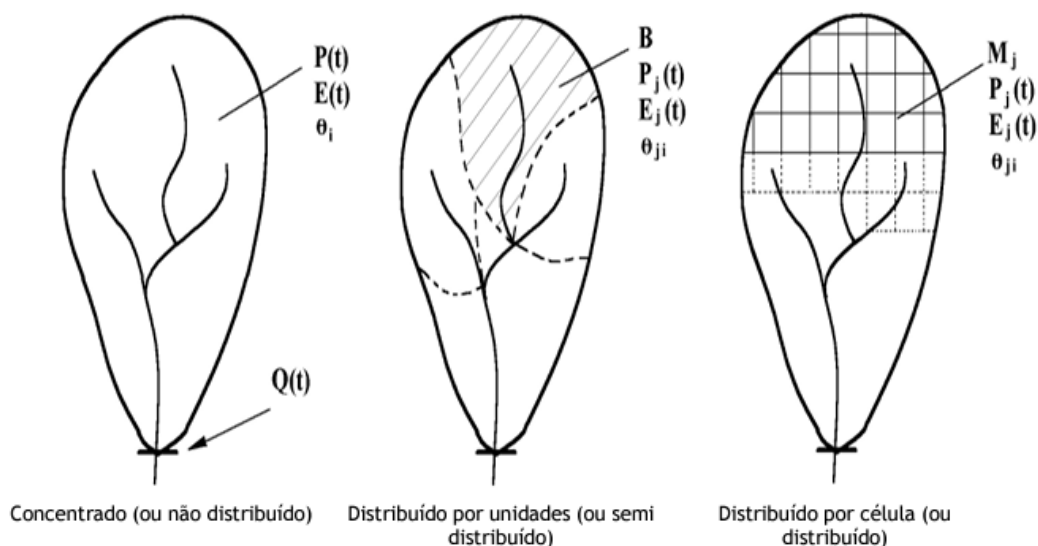


Figura 2 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com sua discretização. Fonte: Tucci (2005)

A crescente urgência das mudanças climáticas tem destacado a necessidade de compreender os impactos climáticos nos recursos hídricos e desenvolver estratégias adaptativas eficazes. Nesse contexto, Suekame *et al.* (2021) afirmam que a modelagem hidrológica emerge como uma ferramenta crucial para prever e entender as alterações nos padrões de fluxo de água e as respostas dos sistemas hidrológicos a essas mudanças. A interligação intrincada entre modelagem hidrológica e projeções climáticas permite uma compreensão mais completa dos desafios hídricos futuros (Farias *et al.*, 2020).

A modelagem hidrológica é um processo complexo que envolve a representação matemática dos processos de fluxo de água em uma bacia hidrográfica. Através da simulação de eventos hidrológicos, como chuvas, escoamento superficial, infiltração e fluxo subterrâneo, os modelos hidrológicos oferecem visões sobre a dinâmica dos sistemas hídricos e suas respostas a diferentes cenários (Silva, Tucci e Collischonn, 2006). De acordo com Miranda *et al.* (2023), os modelos hidrológicos podem variar em complexidade, desde abordagens simples baseadas em equações empíricas até modelos mais avançados que incorporam dados meteorológicos, topográficos e geológicos.

Além da classificação quanto à discretização, os modelos hidrológicos também podem ser categorizados de acordo com outras variáveis, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Categorização dos Modelos Hidrológicos

Categorização	Subcategorização	Descrição
ABORDAGEM	Modelos empíricos	Esses modelos são baseados principalmente em observações empíricas e relações estatísticas entre variáveis hidrológicas, sem levar em consideração os processos físicos subjacentes. Podem ser determinísticos ou estocásticos, dependendo da natureza das variáveis usadas e da incerteza associada às previsões.
	Modelos de processo	Esses modelos tentam representar os processos físicos reais que ocorrem no ciclo hidrológico, considerando fatores como precipitação, evaporação, escoamento etc. Eles podem ser determinísticos ou estocásticos e são mais complexos do que os modelos empíricos, pois incorporam conhecimento físico e matemático.
NATUREZA DAS VARIÁVEIS	Determinísticos	Esses modelos consideram valores específicos para as variáveis hidrológicas, sem levar em conta a incerteza. Eles geralmente fornecem resultados únicos e previsíveis.
	Estocásticos	Modelos estocásticos consideram a incerteza nas variáveis hidrológicas, gerando distribuições de probabilidade para os resultados. Isso ajuda a lidar com a variabilidade natural das condições hidrológicas.
VARIÁVEL TEMPO	Estacionários	Modelos estacionários assumem que as propriedades do sistema hidrológico não mudam ao longo do tempo, o que pode ser uma simplificação inadequada para muitos cenários.
	Dinâmicos	Modelos dinâmicos levam em conta as mudanças ao longo do tempo nas condições hidrológicas e processos. Eles são mais realistas em situações onde as condições variam significativamente.
DISCRETIZAÇÃO	Concentrados	Modelos concentrados consideram a bacia hidrográfica como uma entidade única e não levam em conta variações espaciais internas.
	Distribuídos por bacia	Modelos distribuídos por bacia dividem a bacia hidrográfica em subáreas e consideram as características específicas de cada subárea.
	Distribuídos por célula	Modelos distribuídos por célula dividem a bacia em células menores e consideram as interações entre essas células, permitindo uma análise mais detalhada das características espaciais.

Fonte: Garcia e Fransozi (2017)

As projeções climáticas fornecem um vislumbre das mudanças futuras nas variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, com base em cenários de emissões de gases de efeito estufa. Essas projeções são geradas por modelos climáticos globais que simulam os sistemas atmosféricos, oceânicos e terrestres (Bressiani *et al.*, 2015; Raju e Kumar, 2018). Higuera-Castro (2022) afirma que embora as projeções climáticas possuam

incertezas inerentes, elas fornecem informações valiosas sobre as tendências climáticas futuras, permitindo que os pesquisadores avaliem os possíveis impactos nas bacias hidrográficas.

Segundo Verçosa (2019), a interação entre modelagem hidrológica e projeções climáticas é simbiótica. As mudanças climáticas afetam diretamente os padrões de precipitação e evaporação, influenciando os fluxos de água na bacia hidrográfica. Modelos hidrológicos, ao considerar essas mudanças climáticas, permitem prever como as respostas hidrológicas, como enchentes, secas e disponibilidade de água, podem ser alteradas no futuro. Por outro lado, as projeções climáticas podem ser aprimoradas e validadas usando dados hidrológicos observados, melhorando assim a confiabilidade das projeções (Sales *et al.*, 2015).

A integração da modelagem hidrológica com as projeções climáticas não está isenta de desafios. A incerteza intrínseca em ambos os campos pode se propagar e ampliar nas previsões combinadas. A seleção apropriada dos modelos climáticos e hidrológicos, bem como a consideração das incertezas, é vital para obter resultados robustos. Além disso, a disponibilidade de dados confiáveis e de alta resolução é essencial para garantir a precisão dos modelos (Rocha e Lima Neto, 2020).

No entanto, apesar dos desafios, essa integração oferece oportunidades significativas. Ela capacita os tomadores de decisão a avaliar riscos e desenvolver estratégias de gerenciamento de recursos hídricos adaptativas e sustentáveis. De acordo com Brêda *et al.* (2019), a combinação de modelagem hidrológica e projeções climáticas pode guiar ações informadas para a segurança hídrica, otimizando o uso da água, protegendo ecossistemas aquáticos e garantindo a resiliência de comunidades diante das mudanças climáticas em curso.

Partindo dessa abordagem, Zákha *et al.* (2021) evidenciam que a modelagem hidrológica e as projeções climáticas representam uma ponte entre a complexidade dos sistemas naturais e a necessidade urgente de planejamento adaptativo. Essa interação não apenas impulsiona a compreensão científica, mas também capacita ações concretas para enfrentar os desafios hídricos associados às mudanças climáticas, contribuindo para um futuro mais resiliente e sustentável.

No âmbito da modelagem hidrológica, diversos modelos têm sido desenvolvidos para compreender os processos complexos que regem o comportamento das águas em bacias hidrográficas. Alguns exemplos notáveis (Tabela 2) incluem o Modelo Hidrológico de Balanço Hídrico (HBV), o Modelo de Hidrologia de Fluxo Contínuo (VIC) e o Modelo

de Aprendizado de Máquina para Previsão de Fluxo (MLFP), cada um abordando diferentes aspectos da interação entre precipitação, escoamento e armazenamento de água. Um outro modelo hidrológico de grande destaque na literatura é o SWAT – modelo base desta pesquisa, e amplamente reconhecido e usado para simular processos de fluxo de água, sedimentação, qualidade da água e avaliação da influência do aquecimento global no funcionamento hídrico em bacias hidrográficas.

Tabela 2 - Principais Modelos Hidrológicos utilizados na literatura

Modelos Hidrológicos	Descrição
Modelo Hidrologia do SCS	Modelo amplamente utilizado para estimar escoamento superficial, considerando parâmetros físicos e antecedentes de chuva.
Modelo Hidrologia Baseada em Física	Utiliza equações físicas para representar os processos hidrológicos, como precipitação, infiltração e escoamento.
Modelo SWAT (<i>Soil and Water Assessment Tool</i>)	Modelo de escala de bacia que simula o ciclo hidrológico, considerando processos de uso da terra, manejo de solos, práticas agrícolas e mudanças climáticas.
Modelo Hidrológico de Balanço Hídrico (HBV)	Modelo semi-distribuído que considera processos de balanço hídrico, incluindo evaporação, infiltração e escoamento, para prever vazões em bacias hidrográficas.
Modelo de Hidrologia de Fluxo Contínuo (VIC)	Modelo hidrológico que simula processos de balanço de água na superfície terrestre, considerando interações entre precipitação, evaporação, escoamento e armazenamento.
Modelo de Aprendizado de Máquina para Previsão de Fluxo (MLFP)	Utiliza técnicas de aprendizado de máquina para prever vazões em bacias hidrográficas com base em dados históricos e variáveis meteorológicas.

Fonte: Martínez, López e Chamorro (2018)

Segundo Martins *et al.* (2020), o SWAT é especialmente útil para avaliar os impactos das práticas de uso da terra, mudanças climáticas e gestão de recursos hídricos em uma variedade de cenários. Sua abordagem integrada e capacidade de representar interações complexas entre os componentes hidrológicos e climáticos fazem dele uma ferramenta valiosa na análise das respostas das bacias hidrográficas às mudanças climáticas.

Paralelamente, os modelos climáticos globais, frequentemente chamados de Modelos de Circulação Geral (GCM's), desempenham um papel fundamental na geração de projeções climáticas. Instituições como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) empregam uma série de GCM's para simular os sistemas climáticos terrestres e oceânicos. Configuram-se como modelos que possibilitam a projeção de cenários climáticos que auxiliam na avaliação dos impactos das mudanças climáticas tanto em bacias hidrográficas quanto em outras regiões geográficas (Araújo, Matricardi e Nappo, 2012; Martins *et al.*, 2018; Sousa *et al.*, 2019).

Alguns exemplos proeminentes encontram-se evidenciados na Tabela 3:

Tabela 3 - Principais Modelos Climáticos utilizados na literatura

Modelos Climáticos	Descrição
Modelo GCM (<i>General Circulation Model</i>)	Modelos que simulam o sistema climático global, considerando interações entre atmosfera, oceanos, gelo e superfície terrestre.
Modelo RCM (<i>Regional Climate Model</i>)	Modelos que refinam as projeções climáticas globais para escalas regionais, fornecendo informações mais detalhadas sobre mudanças climáticas em áreas específicas.
Modelo CMIP (<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>)	Projeto que reúne uma série de modelos climáticos globais para avaliar e comparar projeções de mudanças climáticas, sendo uma referência importante para estudos climáticos.
Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (AGCM)	Modelos numéricos que simulam a atmosfera global, considerando processos físicos, químicos e dinâmicos, para prever padrões climáticos e variações de temperatura.
Modelo de Circulação Geral do Oceano (OGCM)	Simula o movimento dos oceanos em escala global, considerando circulação termohalina, correntes oceânicas e interações com a atmosfera para entender os padrões climáticos oceânicos.

Fonte: Adaptado do IPCC (2014)

2.4. Incertezas e limitações na modelagem hidrológica e nas projeções climáticas aplicadas a bacias hidrográficas

A modelagem hidrológica e as projeções climáticas são ferramentas fundamentais para compreender os sistemas hidrológicos e antecipar os impactos das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas. No entanto, é essencial reconhecer que essas abordagens não estão isentas de incertezas e limitações. Segundo Troin *et al.* (2022), a

complexidade dos sistemas naturais, a variabilidade climática e as interações multifacetadas entre os processos hidrológicos e climáticos contribuem para um grau significativo de incerteza nas previsões.

De acordo com Clark *et al.* (2016), as incertezas nas projeções climáticas estão associadas às limitações dos modelos climáticos globais em representar de maneira precisa os fenômenos complexos que ocorrem na atmosfera, oceano e terra. As simulações climáticas dependem de hipóteses sobre emissões futuras de gases de efeito estufa, padrões de uso da terra e outros fatores socioeconômicos, introduzindo incertezas na modelagem. Além disso, as projeções são sensíveis às resoluções espaciais e temporais dos modelos, podendo levar a resultados distintos (Rocha *et al.*, 2020; Shrestha, Du e Wang, 2017).

No que diz respeito à modelagem hidrológica, Zhang *et al.* (2016) apontam que as incertezas surgem devido à variabilidade nas características da bacia, como geologia, uso da terra, cobertura vegetal e topografia. As equações e parâmetros utilizados nos modelos hidrológicos também podem apresentar variações significativas, dependendo da região e do contexto em que são aplicados. A falta de dados precisos, especialmente em regiões menos monitoradas, também introduz incertezas nos resultados modelados, como evidenciado por Joseph e Guillaume (2013).

É crucial abordar essas incertezas de maneira transparente e responsável. Isso envolve a divulgação clara dos pressupostos, limitações e fontes de incerteza associados às projeções e aos resultados da modelagem. A adoção de abordagens de modelagem sensíveis à incerteza, como análises de sensibilidade e métodos estatísticos, pode ajudar a quantificar e comunicar as incertezas aos gestores, formuladores de políticas e comunidades afetadas.

Além das incertezas, as limitações na modelagem hidrológica e nas projeções climáticas também devem ser reconhecidas. Modelos hidrológicos simplificam a complexidade dos sistemas naturais, o que pode resultar em simplificações excessivas e imprecisões em determinadas situações. As projeções climáticas são apenas um conjunto possível de cenários futuros, e as condições reais podem variar consideravelmente. As limitações tecnológicas e de recursos podem restringir a precisão das simulações, especialmente em regiões com dados escassos ou falta de capacidade técnica (Wang e Huang, 2015; Wu e Fan, 2008).

Em resumo, as incertezas e limitações inerentes à modelagem hidrológica e às projeções climáticas são incontornáveis, mas não invalidam sua utilidade. Elas são um lembrete de que a tomada de decisões informadas deve ser guiada por uma compreensão

cuidadosa das incertezas envolvidas. Essas ferramentas fornecem perspectivas valiosas, mas é fundamental interpretar os resultados com cautela, considerar uma variedade de cenários possíveis e adotar abordagens adaptativas para lidar com as mudanças climáticas e os desafios hídricos.

Segundo Panday *et al.* (2014), a gestão de incertezas e limitações na modelagem hidrológica e projeções climáticas requer uma abordagem holística e baseada em princípios de gestão de risco. Uma maneira de abordar a incerteza é através do uso de modelos de conjuntos, nos quais vários modelos climáticos são executados com diferentes cenários de emissões e parâmetros, permitindo avaliar a variabilidade das projeções. A análise de sensibilidade também desempenha um papel crucial, identificando quais parâmetros e processos têm o maior impacto nas previsões e, assim, fornecendo direcionamento para a coleta de dados mais precisos (Wongchuig-Correa *et al.*, 2020).

As incertezas na modelagem hidrológica podem ser tratadas com abordagens semelhantes, como a análise de incerteza de parâmetros e a execução de múltiplas simulações para abranger diferentes condições. Sheil (2018) argumenta que a incorporação de observações e dados de campo para calibrar e validar os modelos também ajuda a melhorar sua precisão. No entanto, é importante reconhecer que mesmo os modelos mais avançados não podem capturar completamente a complexidade dos sistemas naturais, e as limitações tecnológicas podem influenciar a resolução espacial e temporal dos resultados.

Além disso, a comunicação eficaz das incertezas e limitações é essencial para o uso responsável das projeções e resultados da modelagem. Os formuladores de políticas, gestores de recursos hídricos e outras partes interessadas devem ser informados sobre a natureza das incertezas, para que possam tomar decisões informadas e implementar estratégias adaptativas adequadas. A transparência na apresentação dos resultados, incluindo gráficos de intervalo e discussões sobre as fontes de incerteza, promove uma compreensão realista das projeções (Siqueira *et al.*, 2018; Thielen-Del Pozo *et al.*, 2010).

No final, as incertezas e limitações não devem desencorajar o uso da modelagem hidrológica e das projeções climáticas, mas sim enfatizar a importância de uma abordagem cuidadosa e informada. Elas destacam a necessidade de adotar uma mentalidade adaptativa, planejando para diferentes cenários e ajustando as estratégias de gestão conforme novas informações se tornem disponíveis. A capacidade de tomar decisões robustas em face da incerteza é fundamental para promover a resiliência das bacias hidrográficas diante das mudanças climáticas e dos desafios relacionados à água.

O SWAT, assim como qualquer modelo, pode apresentar limitações e incertezas que os usuários devem considerar ao interpretar seus resultados. Miranda (2017) destaca que uma das principais limitações do SWAT é a simplificação dos complexos processos hidrológicos e ambientais. Essa simplificação pode levar a uma representação imprecisa de fenômenos interligados, como as interações solo-planta-atmosfera e os processos de transporte de nutrientes. Outra questão é a dependência de dados de entrada precisos. Como observado por Bhatta *et al.* (2019), o desempenho do modelo está diretamente ligado à qualidade dos dados, como uso da terra, cobertura vegetal, solos, topografia e informações climáticas. Regiões com dados limitados podem enfrentar resultados menos confiáveis.

Além disso, o SWAT possui uma série de parâmetros que requerem calibração específica para cada bacia hidrográfica. Essa calibração pode ser desafiadora e os parâmetros ajustados para uma bacia podem não se aplicar bem à outra. A representação espacial também é uma preocupação, neste contexto, a variabilidade dentro de uma bacia, como diferentes tipos de solo e uso da terra, pode não ser adequadamente capturada pelo modelo (Suekame *et al.*, 2021). Processos menos comuns ou específicos de certas regiões também podem não ser considerados pelo modelo, o que limita sua aplicabilidade nessas situações.

A incerteza climática é uma questão crítica. O modelo depende de projeções climáticas que, por sua vez, estão sujeitas a incertezas, incluindo as inerentes aos próprios modelos climáticos globais e às emissões futuras de gases de efeito estufa, como observado por Tang *et al.* (2023). Além disso, as projeções do SWAT são baseadas em cenários futuros, mas as mudanças reais na bacia podem divergir dos cenários projetados. Interpretações precisas também podem ser desafiadoras devido às interações complexas entre fatores climáticos, hidrológicos, geológicos, biológicos e antropogênicos, que podem ser simplificadas pelo modelo.

Jalbert, Mathevet e Favre (2011) argumentam que a escala espacial e temporal do modelo também influencia seu desempenho, o que significa que ele pode ser mais adequado para certas situações do que para outras. Por fim, limitações tecnológicas, como a disponibilidade de dados e capacidade de processamento, podem impactar a precisão dos resultados obtidos com o SWAT. Portanto, é fundamental que os usuários estejam cientes dessas limitações ao aplicar o modelo e interpretar seus resultados de maneira informada e responsável.

As projeções climáticas, que têm como objetivo prever as mudanças futuras no clima, enfrentam várias fontes de incerteza que podem afetar sua precisão e confiabilidade. Essas incertezas têm implicações significativas para as políticas e decisões tomadas com base nessas projeções.

Os modelos climáticos globais, fundamentais para as projeções, são simplificações da complexidade do sistema climático global. Eles podem não capturar todos os processos climáticos de maneira precisa, resultando em discrepâncias entre diferentes modelos. As projeções climáticas dependem dos cenários de emissões futuras de gases de efeito estufa, que são incertos e variam com base em decisões políticas, desenvolvimentos tecnológicos e mudanças econômicas (Kabir, Pokhrel e Felfelani, 2022; Schreiner-McGraw e Ajami, 2022).

O clima é influenciado por fatores naturais, como atividade solar, vulcanismo e oscilações oceânicas. Essa variabilidade natural introduz incertezas nas projeções, já que esses elementos podem ter impactos consideráveis no clima. Bárdossy *et al.* (2022) explicam que a resolução espacial e temporal das projeções também é um fator importante. Resoluções mais baixas podem não capturar eventos climáticos regionais ou de curto prazo, enquanto resoluções mais altas podem ser computacionalmente intensivas e menos precisas.

Os *feedbacks* climáticos, que são interações complexas entre diferentes componentes do sistema climático, como nuvens, vapor d'água e albedo, são difíceis de prever e introduzem incertezas nas projeções (Biancamaria *et al.*, 2017). Uma limitação fundamental é que as projeções climáticas são feitas para um futuro que ainda não ocorreu. Isso significa que não há observações diretas para validar os resultados, o que aumenta a incerteza associada.

Os modelos climáticos também podem ter dificuldades em prever eventos climáticos extremos e raros, como furacões intensos ou secas prolongadas. As ações humanas, como políticas de mitigação das mudanças climáticas, podem influenciar as emissões futuras de gases de efeito estufa, o que acrescenta mais incertezas ao quadro.

Rafiei Emam *et al.* (2018) explicam que as limitações tecnológicas, incluindo capacidade computacional e recursos disponíveis, podem restringir a resolução e complexidade dos modelos climáticos, impactando a precisão das projeções. Por fim, é importante notar que as projeções climáticas globais podem não capturar adequadamente as variações regionais do clima, introduzindo incertezas específicas para certas áreas.

Lidar com essas incertezas é um desafio constante na pesquisa climática. Khoi e Thom (2015) concluem que abordagens de análise de incerteza, comparação entre diferentes modelos e cenários, e avaliação rigorosa dos resultados com base em observações históricas, podem ajudar a compreender melhor as incertezas e fornecer informações mais sólidas para a tomada de decisões informadas.

2.5. O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

O Modelo SWAT foi desenvolvido por pesquisadores da *Texas A&M University*, em parceria com o *USDA Agricultural Research Service*, como parte de um esforço contínuo para abordar desafios relacionados à gestão de recursos naturais e à sustentabilidade agrícola. Sua criação teve início entre as décadas de 1980 e 1990, quando as preocupações sobre os impactos ambientais da agricultura e o manejo inadequado dos recursos hídricos começaram a ganhar destaque. O seu desenvolvimento foi liderado por um grupo diversificado de cientistas, engenheiros e pesquisadores que buscavam uma abordagem inovadora para compreender a complexidade das interações entre a hidrologia, o uso da terra e posteriormente as mudanças climáticas.

O SWAT foi primeiramente lançado em 2000, como uma ferramenta para auxiliar na avaliação dos impactos das práticas de manejo agrícola e do uso da terra na qualidade da água e na disponibilidade hídrica. Segundo Serrão *et al.* (2019), sua abordagem avançada e capacidade de considerar uma variedade de fatores influenciadores, rapidamente ganharam reconhecimento na comunidade científica e na gestão de recursos naturais.

O SWAT não só se estabeleceu como uma ferramenta poderosa para simulação hidrológica e avaliação de cenários, mas também desempenhou um papel crucial na formulação de políticas e práticas sustentáveis de uso da terra e gestão de recursos hídricos em todo o mundo. Passos, Silva e Silva (2021) destacam que seu desenvolvimento histórico reflete a crescente conscientização sobre a necessidade de abordagens integradas e baseadas em evidências para lidar com os desafios complexos e interconectados enfrentados pelas bacias hidrográficas em um contexto de mudanças climáticas e crescente demanda por água e alimentos.

Miranda (2017) defende que o SWAT apresenta elevado valor, no que tangencia estudos e projeções hidrológicas, atuando tanto no setor de empresas privadas como também em órgãos públicos, e instituições educacionais. O SWAT torna possível a

modelagem em grandes bacias hidrográficas, mesmo apresentando parâmetros bastante complexos e variáveis, como diferentes tipos e usos do solo ao longo de grandes intervalos de tempo e da distribuição espacial (Dupasa *et al.*, 2015).

Oo, Zin e Kyi (2020) afirmam que uma das características distintivas do SWAT é sua capacidade de simular diversos processos hidrológicos, incluindo a geração de escoamento superficial, percolação, evapotranspiração, sedimentação e transporte de nutrientes. Isso é possível devido à sua representação detalhada da bacia hidrográfica em sub-bacias, permitindo a consideração das características físicas e meteorológicas específicas de cada região.

Em termos de projeções hidrológicas considerando as mudanças climáticas, o SWAT se destaca por sua capacidade de integrar dados climáticos históricos e cenários futuros. Ele pode ser alimentado com informações climáticas de modelos globais e regionalizados, permitindo avaliar como as mudanças climáticas podem influenciar os padrões de escoamento, disponibilidade de água e outros processos hidrológicos em diferentes cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa (Higuera-Castro, 2022).

De acordo com Arnold *et al.* (2012), o funcionamento teórico e metodológico do SWAT baseia-se em diferentes componentes interligados. A bacia hidrográfica é dividida em unidades de resposta hidrológica (HRUs), que representam unidades homogêneas de uso da terra e solo. Cada HRU é composta por sub-bacias, nas quais são aplicadas inúmeras equações para estimar os fluxos de água, erosão, nutrientes e outros processos. O modelo utiliza equações do balanço hídrico para estimar os volumes de água em cada componente do ciclo hidrológico, levando em consideração fatores como precipitação, evapotranspiração, percolação e escoamento (Daggupati *et al.*, 2015; Wellen *et al.*, 2014).

A calibração e validação do Modelo SWAT para uma bacia hidrográfica específica representam etapas cruciais na obtenção de resultados confiáveis e realistas. Shivhare, Dikshit e Dwivedi (2018) explicam que durante o processo de calibração, os parâmetros do modelo são ajustados por meio da comparação entre os valores simulados e observados de variáveis hidrológicas, como vazão de rios e concentrações de poluentes. Esse ajuste visa otimizar o desempenho do modelo, minimizando as discrepâncias entre as saídas simuladas e as observações reais.

O SWAT é executado em períodos de tempo discretos, como diário ou mensal, e sua capacidade de simulação abrange desde eventos de curta duração até avaliações de longo prazo. O uso de equações específicas em suas diferentes etapas de modelagem demonstra o rigor científico por trás do modelo e sua capacidade de representar com

fidelidade a complexa interação entre fatores hidrológicos e ambientais (Moutahir *et al.*, 2017; Touhami *et al.*, 2015).

As equações do modelo SWAT variam de acordo com as etapas da modelagem. A equação de Balanço Hídrico Simplificado (Equação 1), por exemplo, é fundamental para determinar a vazão de saída da bacia hidrográfica. Ela leva em consideração a chuva, a evapotranspiração, a infiltração, o escoamento superficial, o escoamento subterrâneo e outras contribuições. Já a equação de Infiltração descreve como a água da chuva penetra no solo. Modelos como a Equação de Green-Ampt (Equação 2) ou a Equação de Horton são usados para estimar a taxa de infiltração.

$$Q = P - (Q_i + E) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde Q representa o escoamento superficial direto (*runoff*), P é a precipitação total que ocorre na bacia hidrográfica, Q_i é a lâmina de escoamento interno (infiltração excessiva ou *baseflow*), e E é a evaporação da água da superfície do solo.

$$F = (S + K_s) \cdot t + (\theta_i - \theta_s) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde F é a taxa de infiltração (mm/hora), S é a capacidade de infiltração inicial (mm/hora), K_s é a taxa de condutividade hidráulica saturada do solo (mm/hora), t é o tempo de infiltração (horas), θ_s é a umidade do solo no ponto de saturação, e θ_i é a umidade inicial do solo.

No que diz respeito ao transporte de nutrientes e sedimentação, equações específicas relacionadas aos processos de erosão, sedimentação e interações entre o solo e a água também são empregadas. Segundo Silva e Farias (2021), um dos pontos fortes do SWAT reside na sua habilidade de considerar uma ampla variedade de processos hidrológicos e ambientais.

A equação de *SCS Curve Number* (Equação 3), por exemplo, é fundamental na estimativa do volume de escoamento gerado a partir das chuvas, levando em conta as características da cobertura do solo, uso da terra e capacidade de infiltração.

$$Q = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{(P - 0.2 \cdot S) + S} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde Q representa o escoamento superficial (mm), P é a precipitação (mm), e S é o armazenamento potencial (mm).

Além disso, para modelar a evapotranspiração, o SWAT emprega a equação de Penman-Monteith (Equação 4), considerada uma das abordagens mais precisas para estimar a perda de água da superfície terrestre para a atmosfera. Essa equação leva em consideração fatores como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, fornecendo uma estimativa refinada da evapotranspiração em diferentes tipos de cobertura do solo.

$$ET = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde ET é a evapotranspiração real (mm/dia), Δ é o declive da curva de pressão de vapor (kPa/°C), R_n é o saldo de radiação líquida (MJ/m²/dia), G é o fluxo de calor do solo (MJ/m²/dia), γ é a constante psicrométrica (kPa/°C), T é a temperatura média do ar (°C), U_2 é a velocidade do vento a 2 metros acima do solo (m/s), e_s é a pressão de vapor saturado (kPa), e e_a é a pressão de vapor atual (kPa).

Em termos de qualidade da água, o SWAT incorpora equações que simulam o transporte de sedimentos e nutriente, como o nitrogênio e o fósforo, a partir de diferentes fontes, como a fertilização agrícola. A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE, Equação 5) é frequentemente utilizada para estimar a erosão do solo, considerando fatores como chuva, erosividade do solo e cobertura vegetal. Enquanto que a equação de "Aquifer Response Unit" (ARU, Equação 6) é utilizada para simular o escoamento subsuperficial, essa equação considera a taxa de escoamento da água através das camadas do solo e do aquífero.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Equação 5})$$

Onde A representa a perda média de solo (toneladas/ha/ano), R é o fator de erosividade da chuva, K é o fator de erodibilidade do solo, LS é o fator topográfico, C é o fator de cobertura e manejo, e P é o fator de práticas de conservação.

$$Q = \frac{S_u \cdot K_u}{d_u} \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_u}{L}}\right) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde Q é o escoamento subsuperficial (mm/dia), S_u é o armazenamento não saturado (mm), K_u é a condutividade hidráulica não saturada (mm/dia), d_u é a profundidade da camada não saturada (mm), e L é o comprimento característico do aquífero (mm).

Em suma, o modelo SWAT é uma ferramenta altamente sofisticada que incorpora uma série de equações e conceitos hidrológicos para modelar uma ampla gama de processos em bacias hidrográficas (Louzada e Ribeiro, 2019). Sua capacidade de considerar fatores complexos como uso da terra, vegetação, clima e topografia, juntamente com a aplicação de equações específicas em diferentes etapas da modelagem, permite uma avaliação precisa dos impactos das mudanças climáticas e do uso da terra nos recursos hídricos, como explicado por Jodar-Abellan, Ruiz e Melgarejo (2018). Seu enfoque holístico e detalhado o torna uma escolha valiosa para pesquisadores e profissionais que buscam compreender as complexas interações hidrológicas em diferentes contextos.

2.6. O Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER)

Tem-se observado no estado de Pernambuco, no Nordeste brasileiro, uma suscetibilidade acentuada dos recursos hídricos, diante dos efeitos causados pelas mudanças climáticas, e o modelo SWAT tem sido amplamente utilizado para compreender essas mudanças de comportamento nas bacias hidrográficas pernambucanas (Andrade *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018). Para aumentar ainda mais a usabilidade da modelagem SWAT, o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER) foi desenvolvido.

Esse sistema, acoplado ao HAWQS (*Hydrology and Water Quality System*, <https://super.hawqs.tamu.edu/#/>), possui informações de entrada para o processo de modelagem e apresenta resultados através da simulação de bacias hidrográficas do estado. De acordo com Farias *et al.*, (2020), o SUPER amplia significativamente a capacidade do SWAT para simular as interferências de uso do solo, cenários de mudanças climáticas na hidrologia, bem como a disponibilidade e qualidade de água em bacias hidrográficas de Pernambuco.

Segundo Farias *et al.*, (2023), o SUPER recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a sua criação envolveu uma parceria significativa, principalmente entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Universidade Federal de

Campina Grande (UFCG), Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP) e *Texas A&M University*.

Uma das principais vantagens que envolve a aplicabilidade e usabilidade do SUPer, é a disponibilização de um número cada vez maior de bacias hidrográficas pernambucanas já calibradas e validadas no âmbito da modelagem SWAT, como apresentado no estudo desenvolvido por Farias *et al.*, (2023), que realizou a calibração de oito das treze maiores bacias hidrográficas do Estado, entre elas a Bacia do Rio Capibaribe (objeto de análise desta pesquisa).

Através da modelagem SUPer é possível obter resultados optando por realizar simulações a nível de bacia, sub-bacia ou HRU, e gerando estatísticas de valores diários, mensais ou anuais, que podem compreender parâmetros como precipitação média total, evapotranspiração potencial e real, teor de água no solo, escoamento superficial, além de variáveis que englobam análises de qualidade de água, como Nitrogênio, Fósforo e Nitrato.

Outra funcionalidade destacada na interface do SUPer é a Análise de Sensibilidade/Variabilidade Climática, ferramenta utilizada nesta pesquisa e que viabiliza a simulação de cenários hidrológicos através de alterações de temperatura, ajustada em termos de aumento ou diminuição de unidades em Graus Celsius, e/ou precipitação, ajustada percentualmente.

Esta ferramenta utiliza uma série histórica de dados previamente carregada no sistema, proveniente da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), cobrindo o período de 01/01/1961 a 31/12/2016. Além disso, incorpora uma série denominada "Default", abrangendo o intervalo de 01/01/1961 a 31/03/2022, que compreende dados tanto da APAC quanto de outras entidades de monitoramento hidrológico.

Através dessa funcionalidade, torna-se possível analisar potenciais impactos decorrentes de circunstâncias que agravem as condições climáticas da região, como estudos desenvolvidos por Tibúrcio *et al.*, (2023), no qual analisaram o balanço hídrico e os efeitos de potenciais alterações climáticas na Bacia Hidrográfica do Riacho Amolar, que está situada no semiárido pernambucano, entre os municípios de Cedro e Serrita.

Nesse contexto, a temperatura no SUPer é estimada de acordo com a seguinte equação:

$$T_{hr} = T_{av} + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \cdot \cos(0.2618 \cdot (hr - 15)) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde T_{hr} representa a temperatura do ar durante a hora hr do dia ($^{\circ}\text{C}$), T_{av} é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$), T_{mx} indica a temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$), e T_{mn} denota a temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$).

Já a variável de precipitação é estimada por meio da equação 8:

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\text{SND}_{day} - \frac{g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que R_{day} (mm) é a quantidade de chuva em um determinado dia, μ_{mon} representa a média de precipitação diária para o mês (mm), σ_{mon} significa o desvio padrão de precipitação diária para o mês (mm). SND_{day} denota desvio padrão normal calculado para o dia e g_{mon} indica o coeficiente assimétrico para a precipitação diária no mês.

Um outro parâmetro estimado pelo SUPER é o escoamento de base, obtido através da equação abaixo:

$$Q_{gw} = h_{wt} \cdot \left(\frac{8000 \cdot K_{gw}}{L_{gw}^2} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde Q_{gw} é o fluxo de base, h_{wt} é a altura do lençol freático (m), K_{gw} representa a condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia), e L_{gw} refere-se à distância desde a subdivisão das sub-bacias até o canal principal por meio do sistema de águas subterrâneas (m).

Uma outra resposta extremamente importante em qualquer análise hidrológica é o balanço hídrico, que se refere à avaliação e comparação das entradas e saídas de água em uma determinada área geográfica, geralmente expressa em termos de volume ou quantidade. Esse conceito é fundamental na gestão dos recursos hídricos e na compreensão do ciclo hidrológico em uma determinada região. O balanço hídrico envolve o monitoramento das precipitações, evaporação, escoamento superficial, infiltração, armazenamento e outros processos relacionados à distribuição e movimentação da água em uma bacia hidrográfica, solo ou sistema específico. Essa análise é crucial para entender a disponibilidade e a utilização sustentável da água em diferentes contextos, como agricultura, abastecimento urbano e preservação ambiental, e no SUPER é estimado pela seguinte equação:

$$V = V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}} - V_{\text{flowout}} + V_{\text{pcp}} - V_{\text{evap}} - V_{\text{seep}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde V representa o volume de água no reservatório ao final do dia (m^3), V_{stored} é o volume de água armazenado no corpo d'água no início do dia (m^3), V_{flowin} é o volume de água que entra no corpo hídrico durante o dia e V_{flowout} é o volume de água que deixa o corpo hídrico ao longo do dia, ambos em m^3 , V_{pcp} é o volume de precipitação que incide sobre o corpo hídrico durante o dia (m^3), V_{evap} é o volume de água removida do corpo hídrico por evaporação ao longo do dia (m^3), e V_{seep} é o volume de água perdido do corpo hídrico por percolação (m^3).

Em conclusão, o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer) emerge como uma ferramenta robusta e abrangente para a gestão e análise dos recursos hídricos no estado. Os esforços contínuos de pesquisadores para aprimorarem cada vez mais a interface desse sistema, melhorarem a calibração e validação das bacias hidrográficas e ainda os produtos gerados como respostas às modelagens, alinhado à utilização de ferramentas importantes, como a análise de sensibilidade e variabilidade climática, posiciona o SUPer como uma valiosa contribuição para entidades envolvidas na gestão sustentável dos recursos hídricos em Pernambuco, podendo inclusive servir de exemplo para o desenvolvimento de sistemas similares a este, para aplicação em outros estados brasileiros. A interface interativa, a disponibilidade de dados pré-carregados e os resultados visuais fornecidos tornam o SUPer uma ferramenta acessível e eficaz, promovendo avanços significativos na compreensão e planejamento dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia da região.

2.7. O papel da disponibilidade hídrica na sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas

A disponibilidade hídrica desempenha um papel crucial na manutenção da sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas, desdobrando-se em uma interação complexa entre as necessidades humanas, ecossistemas e a qualidade de vida das comunidades. Pires e Cunha (2014) explicam bacias hidrográficas são sistemas naturais fundamentais que fornecem água doce, um recurso vital que sustenta não apenas as atividades humanas, mas também a saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres.

A gestão adequada da disponibilidade hídrica é essencial para garantir a satisfação das necessidades básicas da população, como abastecimento de água potável, produção de

alimentos, geração de energia e atividades industriais. No entanto, essa gestão deve ser realizada de maneira equitativa e sustentável, considerando as demandas de múltiplos setores e garantindo o acesso à água para as gerações presentes e futuras. A distribuição desigual da água, a poluição e as mudanças climáticas podem ameaçar essa disponibilidade, exacerbando os desafios sociais e ambientais (Bhatta *et al.*, 2019).

Além de seu papel no desenvolvimento humano, a disponibilidade hídrica é fundamental para a saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres que dependem dos fluxos de água para sobreviver e prosperar. Rios, lagos, pântanos e zonas úmidas desempenham funções críticas na manutenção da biodiversidade, na purificação da água e na regulação climática. A escassez de água e a degradação dos ecossistemas aquáticos podem causar impactos em cascata, afetando a fauna, flora e a qualidade de vida das comunidades que dependem desses recursos, como apontado por Millington (2018).

A abordagem de sustentabilidade socioambiental requer a consideração integrada de fatores sociais, econômicos e ambientais. A gestão da disponibilidade hídrica deve ser embasada em políticas inclusivas, planejamento de uso da terra, práticas de conservação e uma compreensão profunda das interconexões entre as atividades humanas e os sistemas naturais. A participação das comunidades locais, governos, organizações não governamentais e setor privado é essencial para desenvolver estratégias que equilibrem o crescimento econômico com a preservação ambiental.

Em síntese, o papel da disponibilidade hídrica na sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas é inegável. De acordo com Morais *et al.* (2022), O manejo responsável desse recurso valioso é crucial para garantir um futuro resiliente, onde as necessidades humanas coexistam harmoniosamente com a saúde dos ecossistemas. Reconhecer a interdependência entre os aspectos sociais e ambientais da gestão da água é fundamental para assegurar que as bacias hidrográficas permaneçam fontes vitais de vida, prosperidade e bem-estar para as presentes e futuras gerações.

Nesse contexto, a disponibilidade hídrica também está intrinsecamente ligada aos desafios emergentes das mudanças climáticas. Segundo Green *et al.* (2006), à medida que os padrões climáticos se alteram, os regimes de chuva e os fluxos de água nas bacias hidrográficas sofrem transformações significativas. Eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, podem impactar diretamente a quantidade e qualidade da água disponível. A crescente variabilidade climática amplia a complexidade das decisões de gestão hídrica, exigindo uma abordagem adaptativa e flexível.

A sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas também está ligada à conservação da qualidade da água. A poluição proveniente de fontes agrícolas, industriais e urbanas pode comprometer tanto os recursos hídricos superficiais quanto os aquíferos subterrâneos. A contaminação da água não apenas afeta a saúde humana, mas também impacta a saúde dos ecossistemas aquáticos e dos seres vivos que deles dependem. Portanto, medidas eficazes de tratamento, monitoramento e regulamentação são fundamentais para preservar a integridade dos recursos hídricos.

A busca pela sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas requer uma abordagem holística que transcenda fronteiras geográficas e setoriais. Estratégias de manejo adaptativas e baseadas em ciência são essenciais para lidar com os desafios iminentes. Isso envolve a implementação de práticas de conservação do solo, reabilitação de áreas degradadas, incentivo ao uso racional da água, promoção de tecnologias de tratamento de água eficientes e a promoção da educação ambiental (Machado, 2015).

No cerne dessa abordagem está o reconhecimento do valor intrínseco da água como um recurso finito e essencial para todas as formas de vida. A sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas exige uma mudança de paradigma em direção a um gerenciamento integrado que promova a coexistência harmoniosa entre o desenvolvimento humano e a preservação dos ecossistemas. Somente através desse compromisso compartilhado, embasado na ciência, participação pública e responsabilidade, será possível assegurar que a disponibilidade hídrica continue a sustentar a vida e a prosperidade, respeitando os limites da natureza.

Nesse contexto, o fortalecimento das políticas de governança e a colaboração entre diferentes níveis de governo, setores da sociedade e atores envolvidos são cruciais para alcançar a sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas. Abrucio e Oliveira (2017) defendem que a implementação de planos de gestão integrada da água, baseados em dados científicos sólidos, permite a alocação equitativa dos recursos hídricos, considerando as necessidades de abastecimento humano, produção agrícola, ecossistemas naturais e atividades industriais.

Além disso, a conscientização pública desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade. Comunidades informadas e engajadas são mais propensas a adotar práticas de uso responsável da água e a apoiar iniciativas de conservação e restauração dos recursos hídricos. A educação ambiental é um instrumento poderoso para construir uma compreensão compartilhada dos desafios hídricos e inspirar ações individuais e coletivas para a proteção desse recurso vital.

No entanto, vale ressaltar que alcançar a sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas é uma jornada contínua e desafiadora. Requer um equilíbrio delicado entre as aspirações econômicas, sociais e ambientais, adaptando-se constantemente às mudanças em um mundo em transformação. A pesquisa científica contínua, o monitoramento rigoroso e a inovação tecnológica são componentes essenciais para orientar as tomadas de decisão informadas, especialmente em face dos cenários climáticos incertos.

Em última análise, a sustentabilidade socioambiental das bacias hidrográficas é um compromisso comum que transcende fronteiras geográficas e gerações. É uma busca pela harmonia entre as necessidades humanas e a saúde dos ecossistemas, visando uma coexistência duradoura. Ao considerar a disponibilidade hídrica como um bem compartilhado e valioso, podemos traçar um caminho rumo a um futuro em que as águas das bacias hidrográficas fluam como um elo vital que conecta todas as formas de vida em uma teia interdependente de sustentabilidade.

CAPÍTULO III



3. ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, objeto de estudo deste trabalho, está localizada no Estado de Pernambuco, no Nordeste do Brasil, como mostra a Figura 3. Em decorrência de sua localização geográfica, uma considerada parte (fração oeste), encontra-se inserida no contexto geoambiental do semiárido brasileiro, apresentando grande variabilidade de distribuição pluvial e altas temperaturas ao longo do ano.

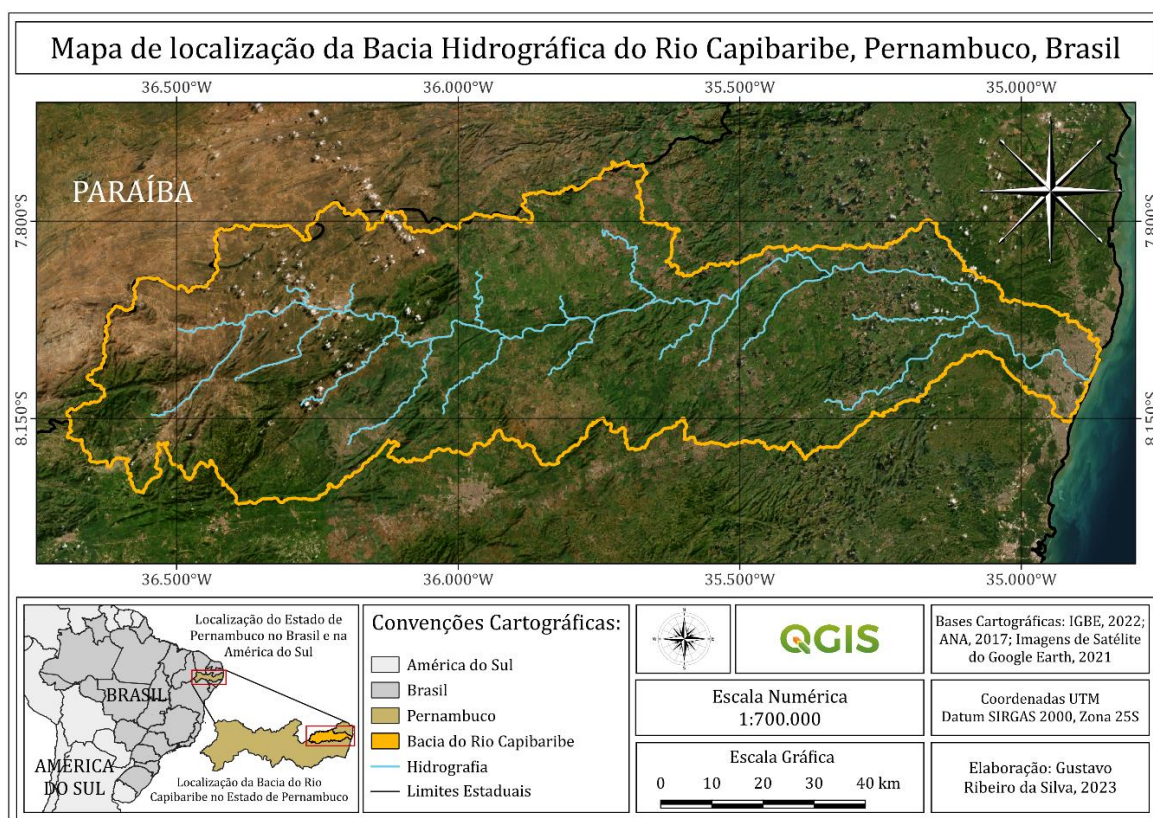


Figura 3 - Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe

A Bacia do Rio Capibaribe está localizada na parcela norte-oriental do Estado, entre as coordenadas 07°41'20" e 08°19'30" de latitude sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude oeste. Possui uma extensão geográfica de 7.454,88 km², o que corresponde a 7,58% do território estadual, e engloba um total de 46 municípios pernambucanos, onde desses, 15 estão completamente inseridos, 11 possuem sede na bacia, e 20 estão apenas parcialmente inseridos (Figura 4).

Segundo a APAC (2022), o Rio Capibaribe nasce no limite das cidades de Jataúba e Poção, atravessando vários centros urbanos e sendo receptor de descartes irregulares de resíduos industriais e domésticos. Apresenta direção inicial sudeste-nordeste, até as

proximidades de Santa Cruz do Capibaribe, quando seu curso toma a direção oeste-leste, percorrendo uma extensão total de cerca de 280 km até sua foz, na cidade do Recife. O Rio Capibaribe apresenta regime fluvial intermitente nos seus alto e médio cursos, tornando-se perene somente a partir do município de Limoeiro, no seu baixo curso.



Figura 4 - Identificação dos municípios localizados total ou parcialmente na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe

3.1. Clima

A Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, situada nas mesorregiões do Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife (RMR), encontra-se inserida em uma área de transição entre o semiárido e o litoral, o que confere a ela características climáticas únicas. De acordo com Zanella (2014), o semiárido, presente em parte das mesorregiões do Agreste e do Sertão, é marcado por altas temperaturas e baixa disponibilidade de água. Nessa região, as chuvas ocorrem principalmente durante o período de inverno, com um regime de precipitação bastante irregular. Essa sazonalidade é determinante para o equilíbrio hidrológico, uma vez que as bacias hidrográficas são altamente dependentes das chuvas para a recarga de seus cursos d'água e reservatórios.

Já na Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife, o clima apresenta uma transição para o tropical úmido, com temperaturas mais amenas e maior umidade relativa do ar. Segundo Cirilo (2008), as chuvas nessa região são mais bem distribuídas ao longo do ano, caracterizando um regime pluviométrico mais regular. Essa disponibilidade hídrica é essencial para a sustentação das atividades agrícolas e para o abastecimento das populações locais. A proximidade com o Oceano Atlântico também exerce uma influência significativa sobre o clima das bacias hidrográficas. A presença do mar contribui para amenizar as temperaturas e favorecer a formação de chuvas provenientes de sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os sistemas frontais (Lyra *et al.*, 2019).

As diferenças climáticas entre essas regiões tornam a Bacia do Rio Capibaribe um ecossistema complexo e delicado, que exige uma gestão cuidadosa e sustentável dos recursos hídricos. A compreensão dessas características climáticas é fundamental para a implementação de estratégias de adaptação e mitigação dos impactos climáticos, garantindo a resiliência e a preservação desses importantes sistemas naturais e sua relevância para o desenvolvimento socioambiental da região (Fedorova, Levit e Cruz, 2016).

A Figura 5 mostra a distribuição espacial das precipitações médias anuais na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. A imagem foi gerada, apenas para efeito de caracterização pluvial da área, através de uma série histórica de 20 anos de índices pluviométricos provenientes do banco de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), entre 01 de janeiro de 2001 e 31 de dezembro de 2020, ou seja, é importante destacar que os referidos dados de chuva não foram utilizados em nenhuma etapa da modelagem desta pesquisa, apenas para gerar graficamente o comportamento de chuvas na presente bacia hidrográfica. Para a interpolação foi utilizada a metodologia *Inverse Distance Weighting* (IDW, Equação 11), que consiste em estimar valores em locais não amostrados a partir de dados amostrados em pontos conhecidos.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde Z_p é o valor estimado no ponto de interesse, Z_i é o valor amostrado no ponto i , d_i é a distância entre o ponto de interesse e o ponto i , n é o número de pontos amostrados

considerados na interpolação, p é o parâmetro de potência, que controla a influência da distância na estimativa. Se $p = 1$, o método é chamado de IDW linear, se $p = 2$, é chamado de IDW quadrático; e assim por diante. De acordo com Gardiman Junior *et al.* (2012), o princípio básico do IDW é atribuir um peso inversamente proporcional à distância entre o ponto de interesse (onde se deseja estimar o valor) e os pontos amostrados conhecidos. Quanto mais próximo um ponto amostrado estiver do ponto de interesse, maior será seu peso na estimativa.

O cálculo dos pesos é realizado através de uma fórmula matemática que leva em consideração a distância entre os pontos e um parâmetro chamado de potência ou expoente. É importante mencionar que o valor de p influencia na suavização da superfície interpolada. Valores de p menores resultam em superfícies mais suavizadas, enquanto valores maiores resultam em superfícies mais detalhadas e ajustadas aos pontos amostrados.

De acordo com a Figura 5 é possível analisar que a Bacia do Rio Capibaribe se situa em uma área caracterizada pela grande variabilidade espacial e temporal do regime pluviométrico, variando entre aproximadamente 500-600 mm (Agreste) até valores superiores a 2000 mm (RMR).

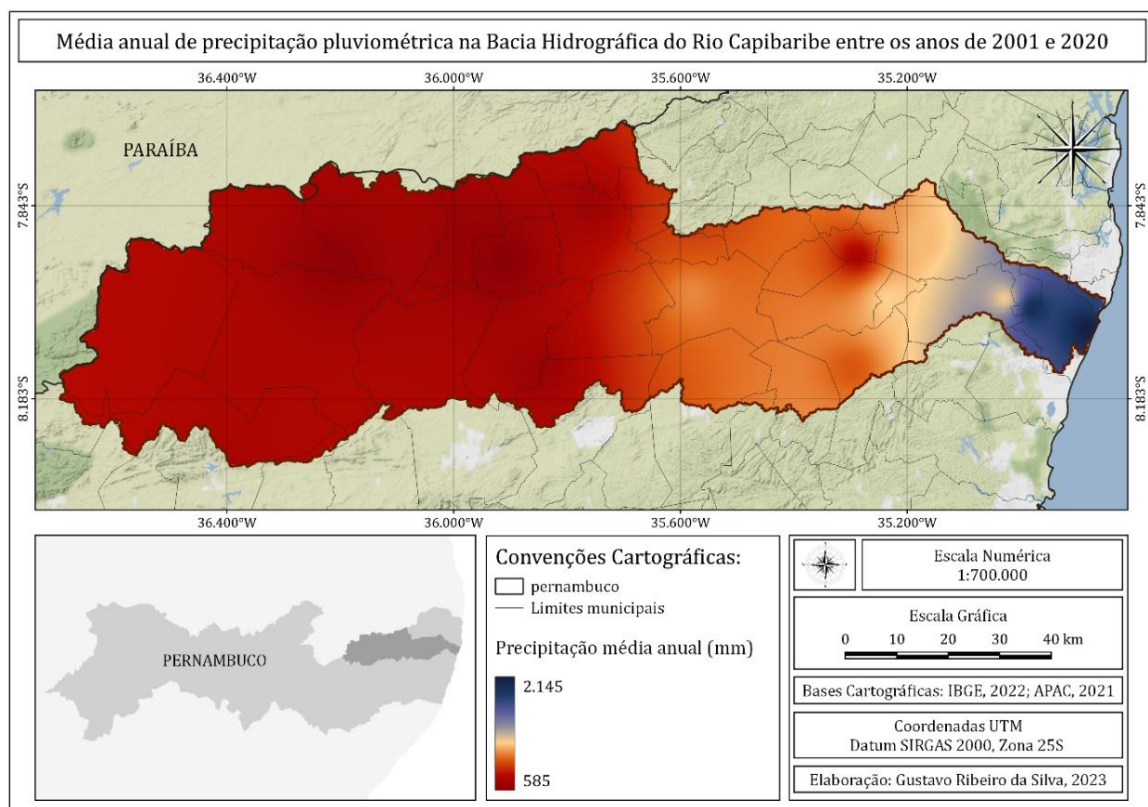


Figura 5 - Regime pluviométrico médio anual na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe

Na porção situada no Agreste, há um período chuvoso de aproximadamente quatro meses, com junho sendo o mês com maiores índices de pluviosidade, representando uma transição entre a semiaridez e o clima tropical subúmido. Já na parte da bacia localizada na Região Metropolitana do Recife, o clima é tropical úmido, com elevados volumes de chuva. Nessa região, o período chuvoso se estende por aproximadamente seis meses, geralmente de março a agosto (Pernambuco, 1994). Com relação às temperaturas médias ao longo do ano na Bacia do Rio Capibaribe, são índices que podem variar dependendo da localização específica dentro da sua delimitação territorial, bem como da altitude e outras características geográficas.

Geralmente essa região possui um clima tropical, de acordo com a classificação climática *Köppen-Geiger*, com temperaturas médias anuais variando entre 25 °C e 28 °C. Nos meses mais quentes, que são geralmente entre novembro e fevereiro, as temperaturas podem atingir valores médios diurnos em torno de 30 °C a 32 °C ou até mais altas. Já nos meses mais frios, de junho a agosto, as temperaturas médias diurnas podem variar entre 24 °C e 28 °C (SECTMA, 2003).

3.2. Relevo

A obtenção de dados geoespaciais desempenha um papel crucial na caracterização de qualquer bacia hidrográfica e na análise dos fatores que influenciam a dinâmica hidrológica. Para examinar os elementos relacionados ao relevo da Bacia do Rio Capibaribe, empregou-se um Modelo Digital de Terreno (MDT). Este modelo, que ilustra as variações altimétricas da região de estudo, foi obtido por meio do projeto Topodata, conduzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), conforme apresentado na Figura 6.

É possível verificar que o terreno da bacia revela variações altimétricas que alcançam altitudes de aproximadamente 920 m a 1150 m na região do Alto Capibaribe, e que diminuem para cerca de 230 m na Zona da Mata, culminando finalmente ao nível do mar na costa litorânea, nota-se ainda que a maior parcela da Bacia do Rio Capibaribe, isto é, quase 70% de sua extensão, possui uma elevação que varia de 300 m a 500 m. Essa faixa de altitude, considerando que a maior parte da bacia está nesse intervalo, sugere uma variação altimétrica moderada.

Comparando isso com a informação de altitudes inferiores a 100 m em alguns pontos, em contrapartida a picos que giram em torno de 1100 m nos pontos mais altos,

sugere-se que a bacia poder ser caracterizada por elevações suaves e áreas menos íngremes, o que é geralmente associado a topografias relativamente mais planas. É importante destacar que a consideração do que poder ser compreendido como “topografias relativamente mais planas” pode variar dependendo do contexto geográfico.

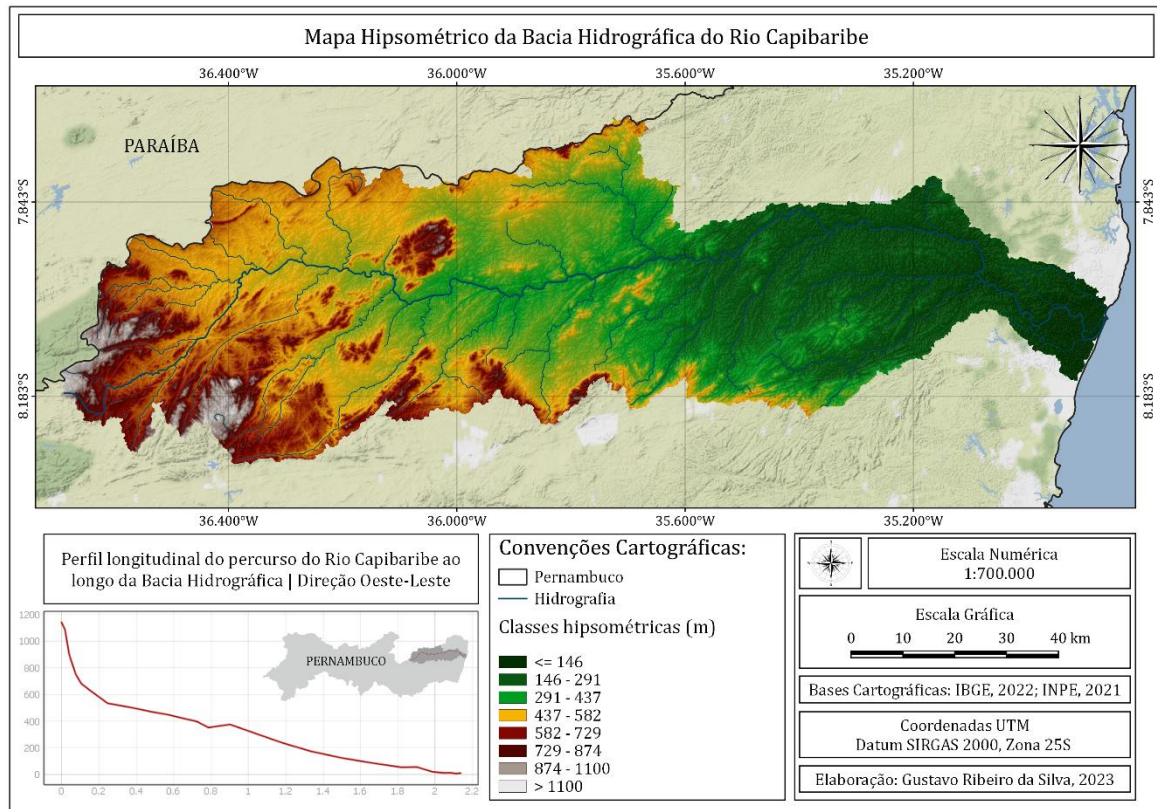


Figura 6 - Perfil de elevação e visualização hipsométrica da Bacia do Rio Capibaribe

Sendo assim, em relação à amplitude altimétrica mencionada, a bacia pode ser percebida como predominantemente plana, com algumas áreas de elevação mais significativa. Vale destacar que a distribuição altimétrica na bacia pode influenciar vários aspectos, como padrões climáticos, tipos de vegetação, disponibilidade de recursos hídricos e características geomorfológicas.

Áreas mais elevadas podem influenciar a formação de nascentes e o escoamento de água para os rios, enquanto áreas mais baixas podem ser propensas a inundações, principalmente quando são localidades com déficit de drenagem, e potencializadas por um alto índice de urbanização e crescimento populacional desordenado, como por exemplo o município de Recife, localizado a 10 m de altitude em relação ao nível do mar, e que possui inúmeros registros de inundações.

3.3. Tipos de solo

Ao explorar as características físicas da Bacia do Rio Capibaribe, observam-se aspectos evidenciados por meio da composição de partes distintas das regiões de desenvolvimento do Agreste Central, Agreste Setentrional, Mata Sul, Mata Norte e Litoral de Pernambuco. Essa bacia revela uma formação diversificada de solos, influenciada por uma combinação complexa entre o clima, geologia, relevo e outros condicionantes naturais, como mostra a Figura 7, que evidencia a formação de Latossolos, Argilossolos, Luvisolos, Planossolos e Neossolos, conforme observações da CPRM (2011).

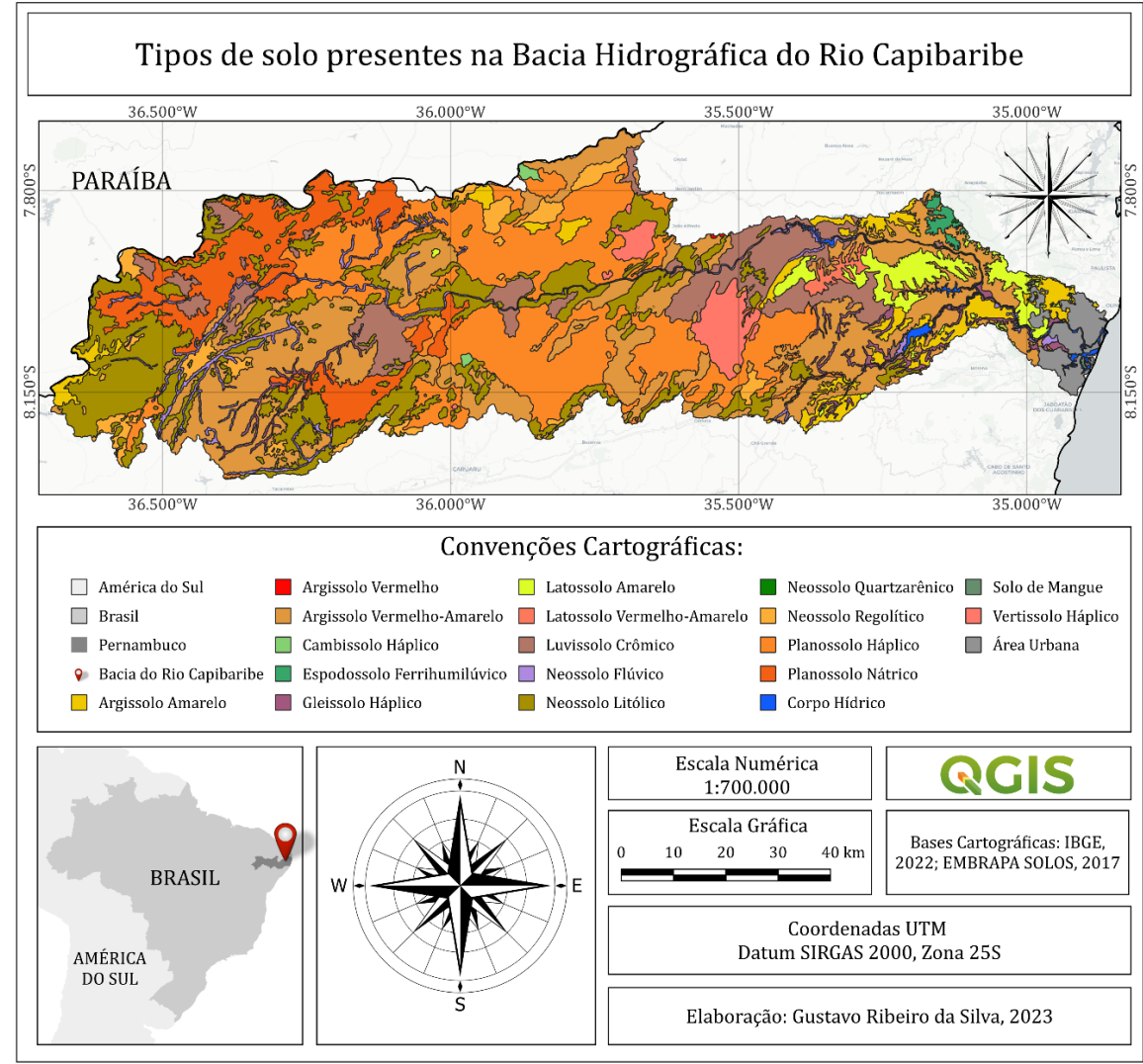


Figura 7 - Mapa de tipos de solos que compõem a Bacia do Rio Capibaribe

Dentre as classes predominantes estão Planossolo Háplico e Argissolo Vermelho-Amarelo, que são tipos distintos de solos com características que desempenham papéis

cruciais nas relações com os recursos hídricos. Os Planossolos Háplicos são caracterizados por horizontes argílicos subsuperficiais, indicando uma capacidade de drenagem relativamente baixa. Em ambientes planos, essa limitada drenagem pode resultar na formação de lençóis freáticos próximos à superfície, impactando o comportamento dos recursos hídricos na região (EMBRAPA, 2021).

O Argissolo Vermelho-Amarelo é um solo brasileiro com coloração avermelhada a amarelada devido à presença de óxidos de ferro. Sua mineralogia varia de arenosa a argilosa, sendo naturalmente fértil em muitos casos. Esses solos são amplamente distribuídos nas regiões tropicais do Brasil e são comumente utilizados na agricultura, exigindo práticas de manejo adequadas para preservar sua fertilidade (EMBRAPA, 2021).

A influência do Argissolo Vermelho-Amarelo nos recursos hídricos está ligada à sua capacidade de retenção e drenagem de água, sendo a textura do solo determinante para a infiltração e recarga dos lençóis freáticos. Em ambientes agrícolas, é essencial administrar a irrigação e evitar compactação do solo para preservar sua permeabilidade. A presença de minerais intemperizados no solo pode impactar a qualidade da água, liberando nutrientes e sedimentos. Assim, compreender as características desse solo é crucial para um manejo sustentável, preservando a qualidade da água e adotando práticas agrícolas amigáveis ao meio ambiente.

3.4. Uso e ocupação do solo

De acordo com as observações de Lira, Pimentel e Santos (2013), o solo na bacia se caracteriza por conter vestígios de ecossistemas diversos, incluindo áreas remanescentes de Caatinga, Mata Atlântica e ecossistemas de Manguezais. Ademais, uma parcela do solo é destinada predominantemente ao cultivo de cana-de-açúcar, práticas de policultura, bem como à expansão de áreas urbanas e industriais, especialmente na Zona da Mata Pernambucana e na Região Metropolitana do Recife, como ilustra a Figura 8.

Observa-se que Pastagem e Vegetação Natural são as duas principais classes de uso e ocupação do solo presentes na Bacia do Rio Capibaribe, abrangendo mais de 50% de sua extensão territorial. É relevante destacar que as áreas destinadas à pastagem estão estreitamente relacionadas à construção de reservatórios, estando sujeitas a uma significativa captação de água e/ou desvio de cursos hídricos, influenciando diretamente no escoamento superficial e na vazão de rios, ou seja, causando impactos na dinâmica hidrológica da bacia.

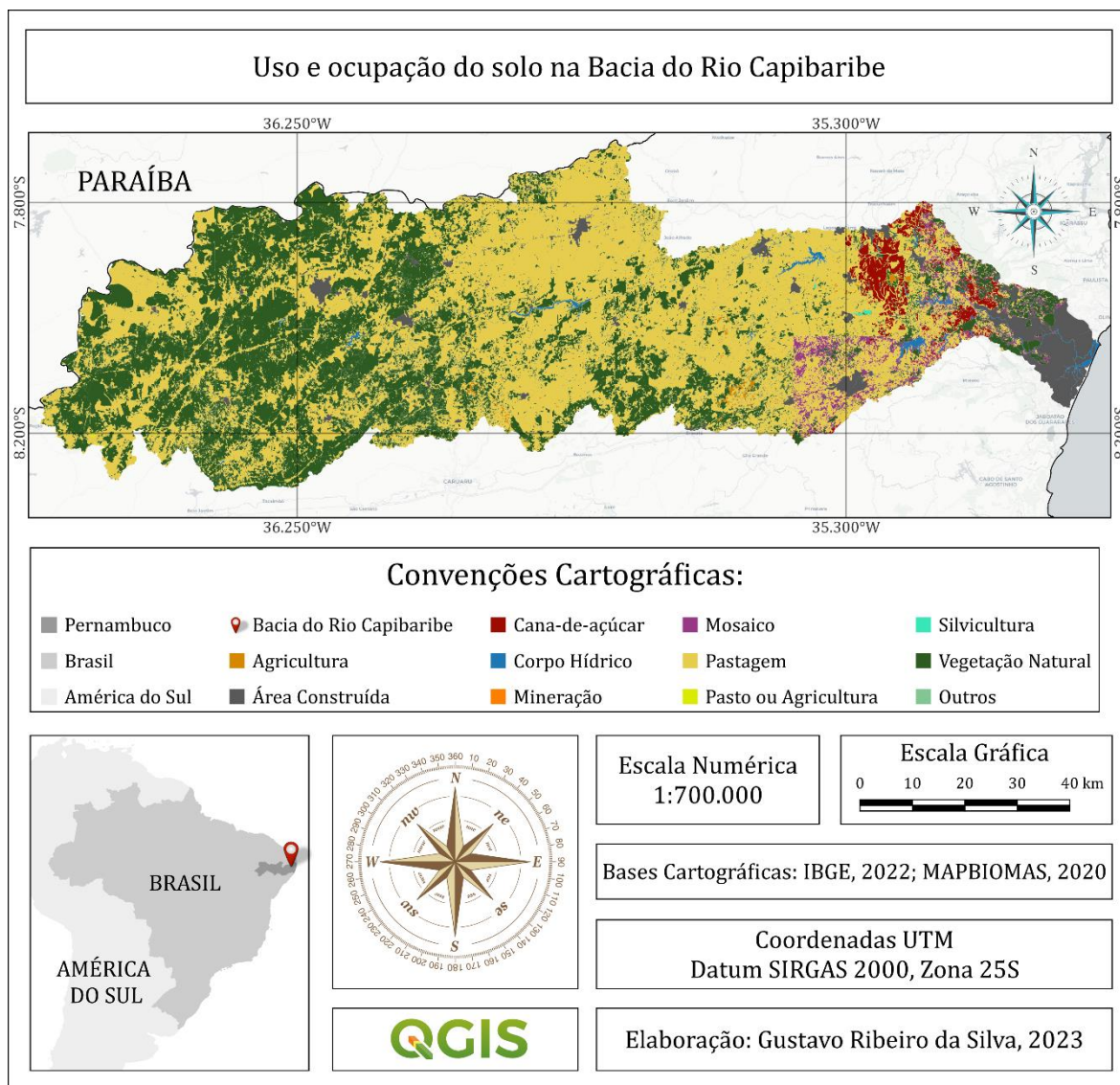


Figura 8 - Mapa das classes de uso e ocupação do solo presentes na Bacia do Rio Capibaribe

CAPÍTULO IV



4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve em detalhes a metodologia adotada no presente estudo, para avaliar os efeitos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe - PE. A abordagem utilizada envolve a aplicação do sistema SUPer, que utiliza o SWAT como modelagem base, para realização das simulações. O foco central da pesquisa reside na compreensão das alterações nas características hidrológicas, resultantes das mudanças climáticas, permitindo uma avaliação precisa dos potenciais impactos na região.

Nesta seção, é delineada cada etapa da metodologia empregada, desde a interface e o funcionamento do SUPer, até a aquisição e análise dos dados de projeções climáticas do CORDEX, evidenciando ainda a maneira que estas se integraram à modelagem. A estrutura detalhada visa não apenas proporcionar clareza sobre o processo seguido, mas também permitir que outros pesquisadores possam reproduzir e ampliar os resultados aqui presentes, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de estudos hidrológicos e mudanças climáticas.

Em suma, a presente seção de Materiais e Métodos busca apresentar a metodologia que norteou esta pesquisa, assegurando a precisão e confiabilidade das conclusões alcançadas. A aplicação do sistema SUPer e sua adaptação às condições específicas da bacia hidrográfica em estudo, representa uma ferramenta inestimável para explorar os efeitos das mudanças climáticas em uma região onde a disponibilidade de recursos hídricos é de extrema relevância econômica, ambiental e social.

4.1. Utilização do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer)

Como já descrito ao longo deste trabalho, o SUPer busca facilitar e ampliar a utilização do modelo SWAT para as bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco. Por meio de uma interface ainda mais dinâmica e intuitiva, como mostra as Figuras 9 e 10, esse sistema possibilita a realização de inúmeras tarefas, fornecendo respostas valiosas para avaliações hidrológicas.

Para usufruir dos recursos disponibilizados pelo SUPer, deve-se inicialmente acessar o endereço eletrônico oficial (<https://super.hawqs.tamu.edu/#/>). Subsequentemente, proceder-se-á ao registro, fornecendo informações pessoais pertinentes. Através desse cadastro, o usuário formalizará sua requisição de acesso à plataforma, e após a devida

aprovação por parte dos desenvolvedores, a permissão para utilização do sistema será concedida. É imperativo que a solicitação englobe informações concernentes à instituição ou organização à qual o usuário está afiliado, bem como apresente justificativas explícitas sobre os motivos e/ou interesses subjacentes ao acesso ao SUPeR.

Após a obtenção da autorização de acesso ao sistema, o usuário pode efetuar o login e iniciar o processo de criação de um novo projeto. Nessa interface, é possível selecionar a bacia hidrográfica de interesse e atribuir um nome ao projeto. Após a conclusão dessas etapas iniciais, é permitido criar um cenário, que representa a configuração de um ambiente com parâmetros pré-definidos antes da execução da modelagem e da obtenção dos produtos finais.

Ao abrir a janela de criação do cenário, há a opção de nomeá-lo e escolher o banco de dados climáticos a ser utilizado. Pode-se optar pelo banco da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), com um horizonte temporal de 01/01/1961 a 31/12/2016, ou escolher um segundo banco de dados denominado "Padrão". Este último consiste em uma série que abrange o período de 01/01/1961 a 31/03/2021, sendo uma compilação de dados climáticos monitorados tanto pela APAC quanto por outros órgãos.

No processo de criação do cenário, além das opções mencionadas, é possível determinar a quantidade de anos, dentro da série histórica selecionada, a serem utilizados para a preparação e aquecimento do modelo. Também é possível definir a visualização das saídas da modelagem, podendo ser diários, mensais ou anuais. Adicionalmente, o usuário tem a opção de selecionar a versão específica do SWAT que será empregada na realização das simulações.

Após salvar as referidas configurações, pode-se selecionar a opção de personalização das entradas do SWAT e utilizar a ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática, inserida dentro da seção de “Dados Meteorológicos” e utilizada nesta pesquisa. Essa ferramenta possibilita realizar uma combinação de diferentes variações de temperatura, ajustada em graus Celsius, e precipitação, ajustada percentualmente, a fim de se obter diferentes conjunturas, possibilitando assim a análise dos efeitos do agravamento das mudanças climáticas na bacia hidrográfica selecionada.

SUPER Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco
Uma ferramenta de avaliação hidrológica e de qualidade de água

Projects All projects Create a new project

1 **Iniciar a criação de um novo projeto**

2 **Selecionar a Bacia Hidrográfica de interesse**

3 **Nomear e criar projeto**

Capibaribe

Projeto criado em 26-08-2021
Credit: Universidade Federal Pernambuco

Downstream subbasin: 42

The selected watershed contains 53 subbasins and 253 HRUs. [View routing table](#)

Give your project a name: Capibaribe_CORDEX

Create Project

SUPER Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco
Uma ferramenta de avaliação hidrológica e de qualidade de água

PROJECTS / CAPIBARIBE_CORDEX

SUMMARY

Name	Capibaribe_CORDEX
Subbasins	53
HRUs	253
Total area	7,536.65 km ²
Land-only area	0.00 km ²
Watershed	Capibaribe, 42

SET-UP

Set HRUs

Create cenário

DATA

Metadata

4

Create a new scenario

Scenario name: Bacia_Rio_Capibaribe

Weather data: Default

Simulation start date: 01/01/1961
01/01/1961 or later

Simulation end date: 31/03/2021
03/31/2021 or earlier

Set-up/warm-up years: 2

SWAT output print setting: Daily

SWAT model version to run: SWAT 2012 rev. 664

5 **Salvar alterações**

5

Banco de dados

Horizonte temporal

Anos de preparação e de aquecimento

Exibição de saídas (outputs)

Versão do SWAT

Figura 9 - Interface do SUPER. Fonte: SUPER (2024)

SUPER Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco
Uma ferramenta de avaliação hidrológica e de qualidade de água

PROJECTS / CAPIBARIBE_CORDEX / SCENARIOS / BACIA_RIO_CAPIBARIBE

Bacia_Rio_Capibaribe Scenario

Overview Customize SWAT Inputs

Weather dataset Default

Starting simulation date 1/1/1961

Ending simulation date 3/31/2021

Set-up/warm-up years 2

SWAT output print setting Daily

SWAT model version SWAT 2012 rev. 664

Last modified on Thu, Jan 18, 2024 7:58 PM

Run Scenario Edit/ Copy Settings Back

Project Capibaribe_CORDEX

Subbasins 53

HRUs 253

Total area 7,536.65 km²

Land-only area 0.00 km²

Watershed Capibaribe, 42

Bacia_Rio_Capibaribe Scenario

Overview Customize SWAT Inputs

General watershed inputs and databases

- Calibration data
- Basin input data
- Fertilizers
- Nutrient efficiency
- Urban input data
- Land use update

Weather data

- Climate sensitivity/variability analysis
- Weather generator

Climate sensitivity/variability analysis

Adjust monthly rainfall and temperature for each subbasin in your project. Read the SWAT2012 IO documentation chapter on subbasin inputs, see page 6 for climate sensitivity variables.

Increase or decrease rainfall by up to 100%:

0 % Aumento ou redução de Precipitação

Increase or decrease temperature by up to 20°C:

0 °C Aumento ou redução de Temperatura

Apply to all subbasins and months

Aplicar a todas as sub-bacias e meses ou a sub-bacias e meses selecionados

Figura 10 - Ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática do SUPER.
Fonte: SUPER (2024)

Após a delimitação das alterações climáticas, pode-se realizar a simulação do ambiente criado e conseguinte a obtenção de diferentes tipos de dados de saída, que permitem uma análise detalhada da hidrologia da bacia, frente aos efeitos das mudanças climáticas. Dentre essas saídas, pode-se obter o balanço hídrico da bacia hidrográfica, mapas e gráficos de diferentes variáveis, como precipitação, evapotranspiração real e potencial, fluxo de base, água contida no solo, além de vários parâmetros relacionados à

análise de qualidade hídrica da bacia hidrográfica, como mostra o esquema presente na Figura 11.

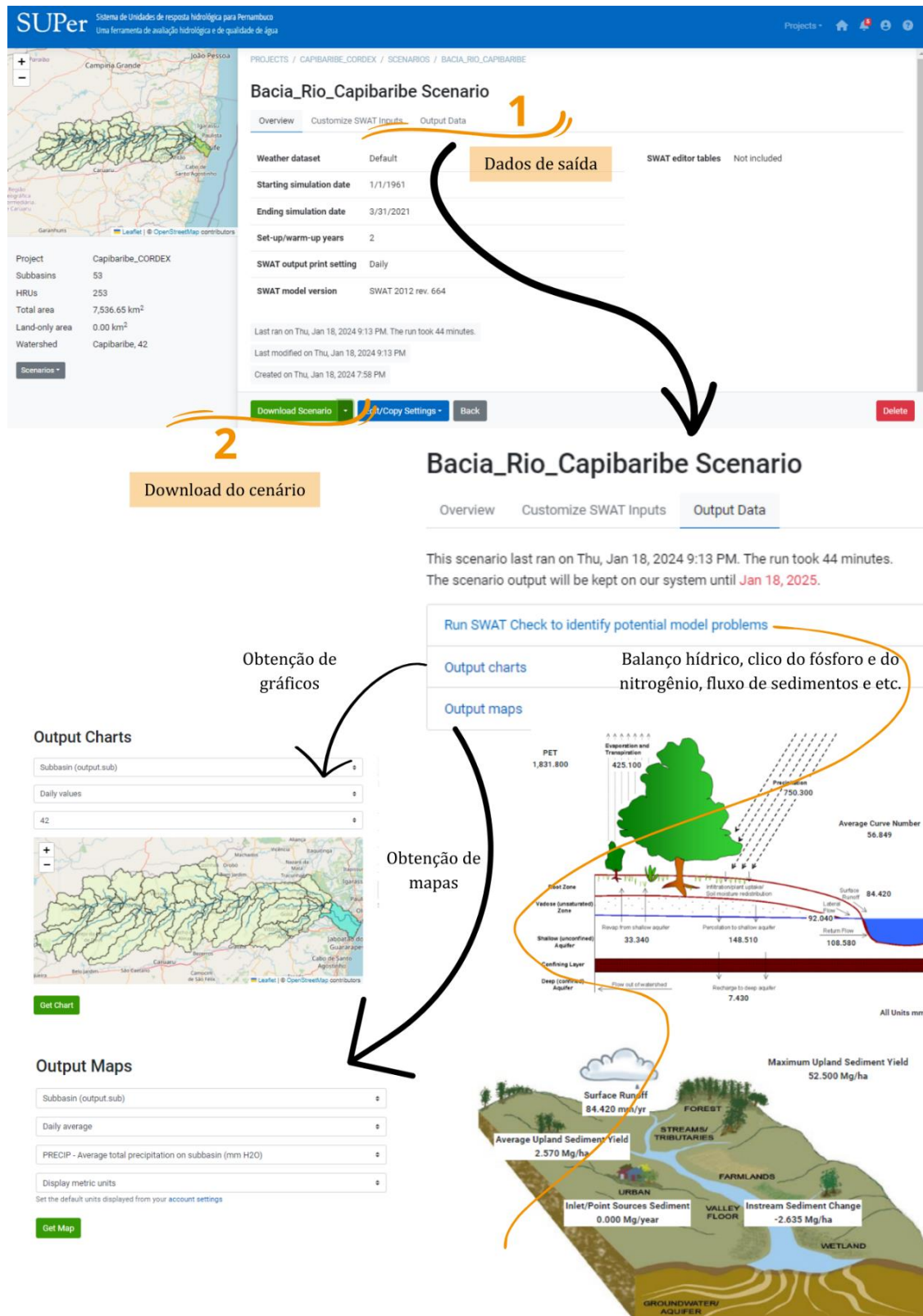


Figura 11 - Obtenção de diferentes saídas e interface do SUPer após a execução do projeto.
Fonte: SUPer (2024)

No contexto do SUPER, a Bacia do Rio Capibaribe, objeto de estudo desta pesquisa, é caracterizada por ser dividida em 53 sub-bacias e 253 Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Dessa forma, para análise, foi selecionada a sub-bacia 42, como encontra-se destacada em verde na Figura 12, por ser a mais à jusante da bacia hidrográfica e representar bem o comportamento da bacia como um todo. Em relação à série histórica, optou-se por utilizar o banco de dados "Padrão" devido à sua maior extensão quanto ao horizonte temporal, representando a escolha mais abrangente disponível. Foram dedicados dois anos da série para a preparação e aquecimento do modelo. As saídas das simulações foram configuradas para serem exibidas no formato diário, visando capturar detalhadamente as variações ao longo do tempo. Quanto à escolha do modelo, a versão 2012 rev. 664 do SWAT foi selecionada para conduzir a modelagem.

A escolha dessa versão do SWAT para realizar a simulação no SUPER foi baseada em uma série de fatores. Primeiramente, esta versão representa uma das iterações mais recentes e refinadas do modelo SWAT, incorporando aprimoramentos significativos em relação às versões anteriores. Essas melhorias incluem atualizações nos algoritmos de processamento hidrológico, aperfeiçoamentos na representação de práticas agrícolas e uma interface mais amigável para os usuários. Além disso, a revisão 664 específica traz consigo correções de problemas e ajustes finos que contribuem para uma maior precisão e confiabilidade nos resultados da simulação.

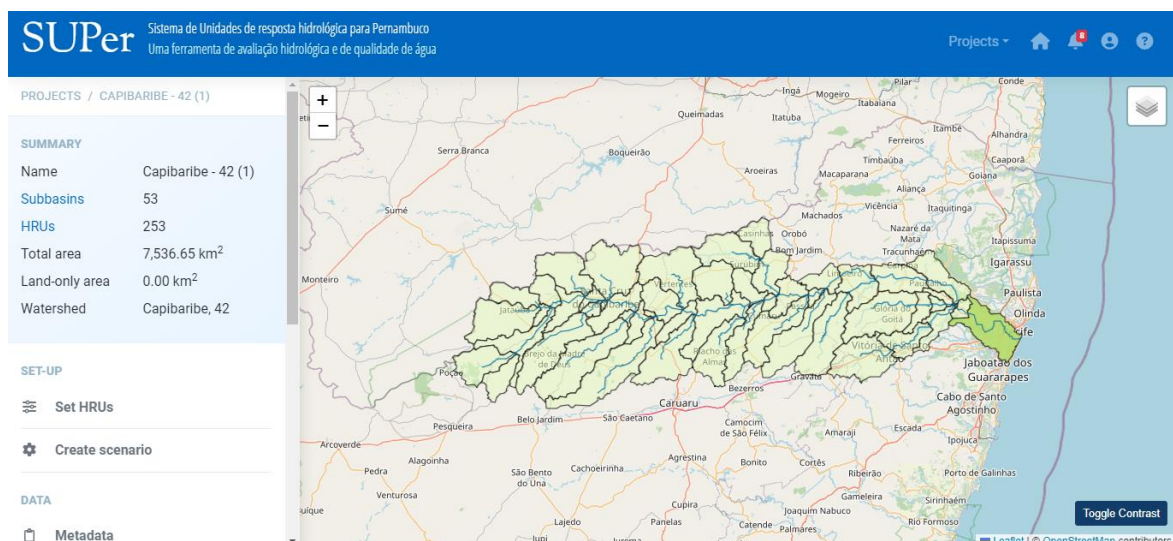


Figura 12 - Identificação da sub-bacia 42 na Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: SUPER (2024)

Consequente a definição dessas configurações iniciais, foi criado um conjunto de possibilidades, agrupando a série em intervalos de 10 anos e aplicando variações de chuva

e temperatura, com base nas projeções do CORDEX, e que posteriormente foi introduzido na ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática.

4.2. Obtenção e incorporação das projeções climáticas do CORDEX ao SUPER

No âmbito deste estudo, para a utilização da ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática do SUPER, foram adotadas projeções climáticas regionalizadas adquiridas do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), uma iniciativa internacional que visa fornecer informações climáticas de alta resolução. Através do CORDEX, é possível acessar dados climáticos projetados em escalas regionais, o que se mostra fundamental para entender as implicações das mudanças climáticas em escalas locais e regionais.

O CORDEX é um programa internacional que opera sob a alçada da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e tem como objetivo principal melhorar a compreensão das mudanças climáticas regionais, como apontado por Sørland *et al.* (2021). Para alcançar esse objetivo, o CORDEX promove a produção de simulações climáticas de alta resolução por meio de modelos climáticos regionais (RCMs - *Regional Climate Models*) que abrangem diferentes partes do mundo. Esses modelos são capazes de fornecer projeções climáticas mais detalhadas e precisas em comparação com modelos globais, tornando-se uma ferramenta valiosa para estudos de impacto e adaptação às mudanças climáticas.

Para esta pesquisa, as projeções climáticas fornecidas pelo CORDEX foram geradas pelo modelo regional RegCM4-SAM-22, que é acoplado ao modelo de circulação global MPI-ESM-MR. A sigla “RegCM4” refere-se a “*Regional Climate Model version 4*”, e “SAM-22” representa o domínio espacial a que o modelo regional está projetado para simular, isto é, “*South America*” (América do Sul), desta maneira, trata-se de um modelo climático regional especificamente desenvolvido para simular condições climáticas na América do Sul, com um foco mais detalhado em padrões climáticos locais .

Já com relação ao modelo global, “MPI-ESM” refere-se ao “*Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model*”, um modelo de circulação global abrangente desenvolvido pelo Instituto Max Planck de Meteorologia na Alemanha, e a sigla “MR” significa “*Middle Resolution*”, indicando que este é um modelo global de resolução média.

A combinação desses modelos permite uma análise mais abrangente e detalhada das projeções climáticas para a região em questão. Enquanto o modelo global fornece uma visão mais ampla dos fenômenos climáticos em escala global, o modelo regional refinado

"RegCM4-SAM-22" permite uma representação mais precisa das características climáticas locais na América do Sul, resultando em projeções climáticas regionalmente específicas e detalhadas.

A aquisição do referido banco de dados de projeções climáticas foi possível graças a uma parceria direta com a Professora Doutora Rosmeri Porfírio da Rocha, professora do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), e ainda o principal contato referente ao CORDEX na América do Sul.

O primeiro passo para obtenção dessas projeções envolveu a definição de pontos dispostos ao longo da malha territorial da área de interesse, e conseguinte a coleta de informações referentes às suas coordenadas geográficas, como mostra a Figura 13.

Para definir esses pontos, optou-se por se basear na localização de postos de monitoramento presentes na bacia hidrográfica em estudo. Esses postos de monitoramento incluíram estações pluviométricas, estações meteorológicas e outros pontos de coleta de dados relevantes. As coordenadas geográficas desses pontos foram essenciais para definir as áreas de interesse nas quais as projeções climáticas viriam a ser extraídas, e consequentemente que englobariam toda a extensão territorial da Bacia do Rio Capibaribe.

Depois de definida, essa rede espacial serviu como ponto de partida para a coleta de dados climáticos médios no entorno de cada “estação”. Essa abordagem permitiu a obtenção de informações climáticas regionais mais específicas e alinhadas com a localização dos postos de monitoramento.

Ainda de acordo com a Figura 13 é possível verificar que os 10 primeiros pontos estão localizados na parcela da Mesorregião do Agreste, e os pontos 11 a 16, encontram-se inseridos na outra fração da bacia hidrográfica, isto é, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife. No que diz respeito à aquisição dos dados, foram obtidas projeções de 5 variáveis distintas: precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, mas apenas as projeções de temperatura e precipitação foram consideradas na ferramenta de variabilidade climática do SUPeR.

As referidas projeções foram obtidas para uma série temporal de 70 anos (01/01/2030-31/12/2099), e considerando o cenário RCP8.5, no qual pode ser compreendido como o cenário mais crítico de emissão de gases de efeito estufa. Isto permitiu avaliar diferentes contextos climático temporais, e assim, analisar uma ampla gama de possíveis impactos futuros aos recursos hídricos.

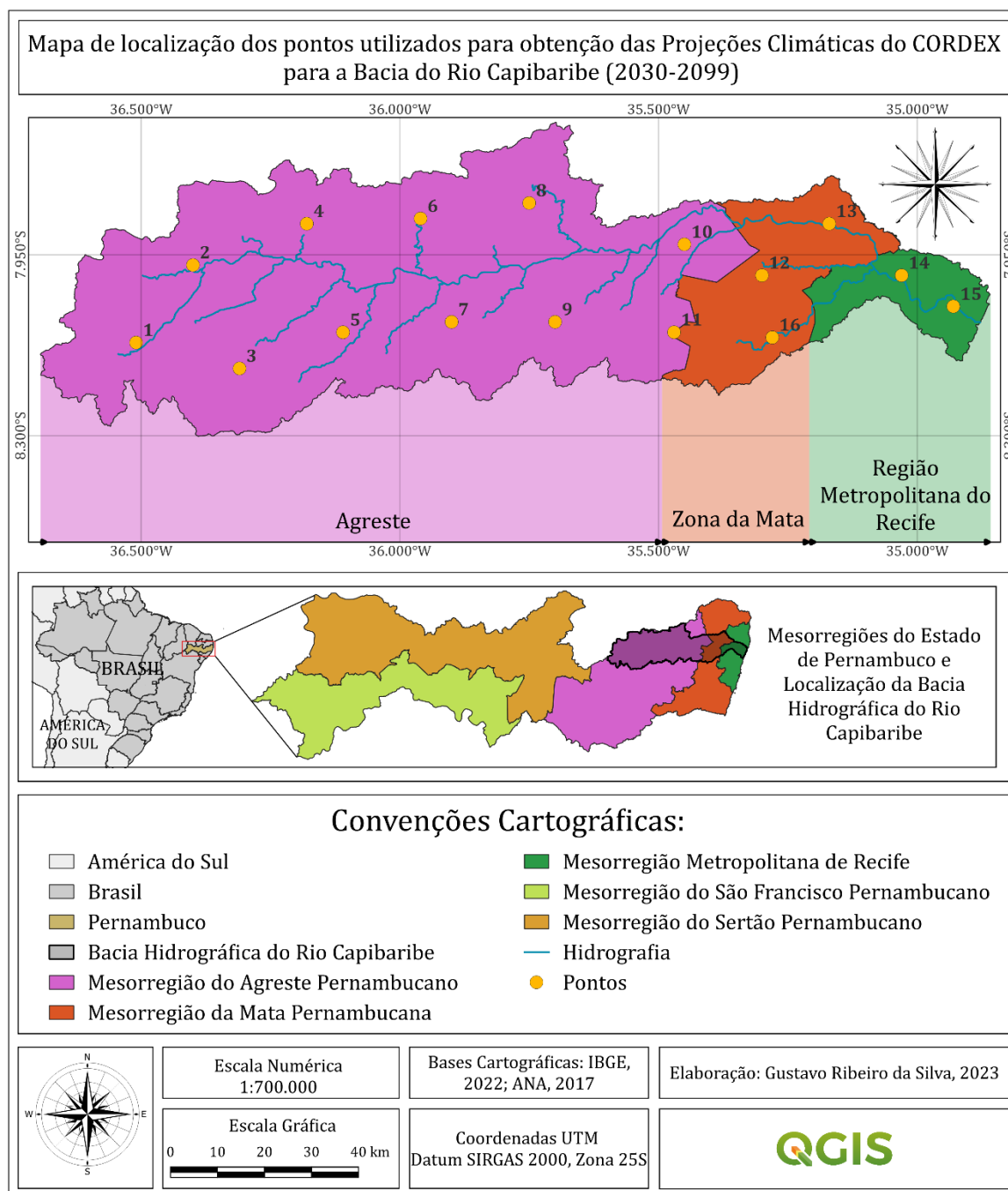


Figura 13 - Localização dos pontos utilizados para a obtenção das projeções climáticas do CORDEX ao longo da Bacia do Rio Capibaribe

Em resumo, a aquisição de dados de projeções climáticas regionalizadas do CORDEX representou um componente crucial deste estudo, fornecendo informações detalhadas sobre o clima futuro na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. A integração desses dados climáticos ao Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco permitiu avaliar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da área de

estudo, norteando para uma melhoria no planejamento e na tomada de decisões relacionadas à água.

4.3. Panoramas de mudanças climáticas

De acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos do Governo do Estado de Pernambuco (2010), a Bacia do Rio Capibaribe exibe uma notável variabilidade na precipitação, com valores anuais que variam de 600 a 2400 mm. Essa diversidade espacial de chuvas evidencia a influência dos dois principais sistemas atmosféricos na região: a Zona de Convergência Intertropical e as Ondas de Leste. Considerando a bacia de maneira unificada, observa-se um aumento significativo na pluviosidade à medida em que aumenta a proximidade com o litoral. Esse incremento está diretamente associado à redução da altitude em que os postos de monitoramento estão localizados.

A Bacia do Rio Capibaribe é oficialmente dividida por Unidades de Afluência, como mostra a Figura 14. Essa divisão é crucial para uma gestão eficaz dos recursos hídricos. Essa prática se justifica pela heterogeneidade natural das bacias, que apresentam variações significativas em termos de topografia, uso da terra, características do solo e padrões climáticos.

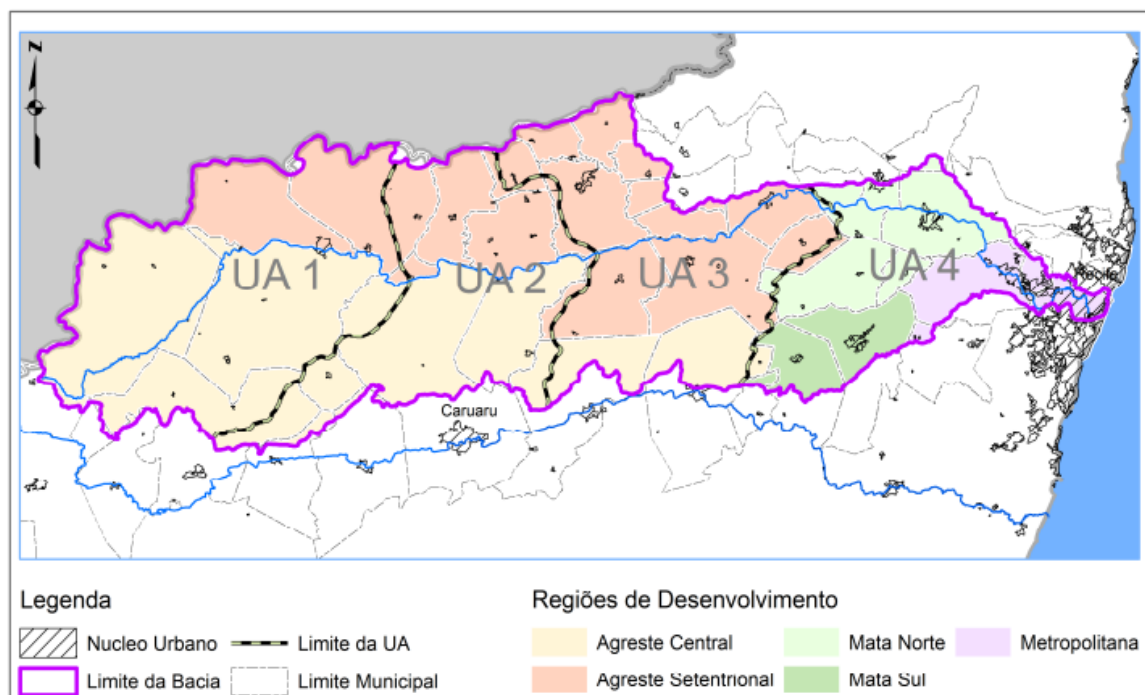


Figura 14 - Divisão da Bacia do Rio Capibaribe em Unidades de Afluência. Fonte: Pernambuco (2010)

Essa abordagem mais detalhada não apenas facilita a implementação de estratégias de manejo específicas para cada sub-região, mas também contribui para o monitoramento e controle mais eficazes dos recursos hídricos em tempo real. Além disso, a divisão da bacia em UA's é fundamental para uma análise mais refinada e adaptada, essencial para a tomada de decisões informadas, especialmente em situações de escassez ou eventos climáticos extremos.

Na área que abrange a Unidade de Afluência (UA) 1 e a UA2, englobando estações como Arcoverde, São Bento do Una, Garanhuns e Caruaru, a média anual de precipitação gira em torno de 702,95 mm. Por outro lado, os postos de coleta Surubim e Vitória de Santo Antão, localizados na UA3, apresentam uma média anual de 861,40 mm. Sendo assim, pode-se assumir que a média de precipitações anuais no Agreste apresenta um volume que oscila em torno de 780 mm, considerando os índices anuais registrados nas Unidades de Afluência 1, 2 e 3 (Figura 15), que integram a referida Mesorregião.

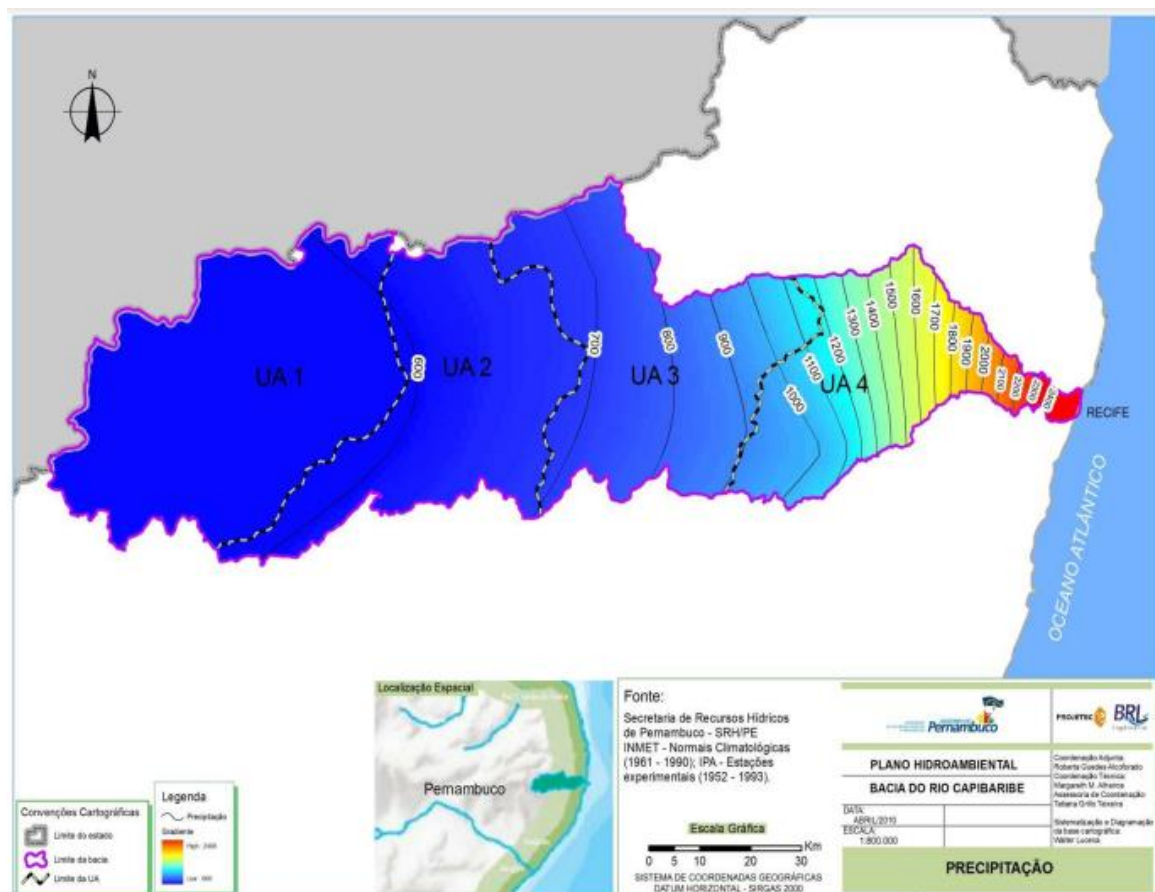


Figura 15 - Isoietas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: Pernambuco (2010)

Nas regiões litorâneas, como evidenciado pelas estações do Recife e Ipojuca, a média anual de precipitação atingiu 2267,05 mm. Todavia, vale ressaltar que esse último índice representa apenas a média de pluviosidade da fração litorânea, isto é, extremo leste da bacia. A UA4, que engloba tanto a Região Metropolitana do Recife quanto a Mata Pernambucana possui uma média calculada que gira em torno de 1700 mm, tomando como referência o mapa de isoietas anuais médias do Plano Hidroambiental da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (2010), como mostra a Figura 15. Essas informações destacam a complexidade e a diversidade do regime de chuvas na Bacia do Rio Capibaribe, refletindo a influência de fatores geográficos e atmosféricos.

Com relação à análise da temperatura da bacia, as médias anuais das isotermas para a variável climática da temperatura média indicam valores mais baixos na região da UA2, devido à influência da altitude na localidade. Esses valores aumentam em direção ao oeste na UA1 e em direção ao litoral, como pode ser confirmando observando a Figura 16 (Pernambuco, 2010).

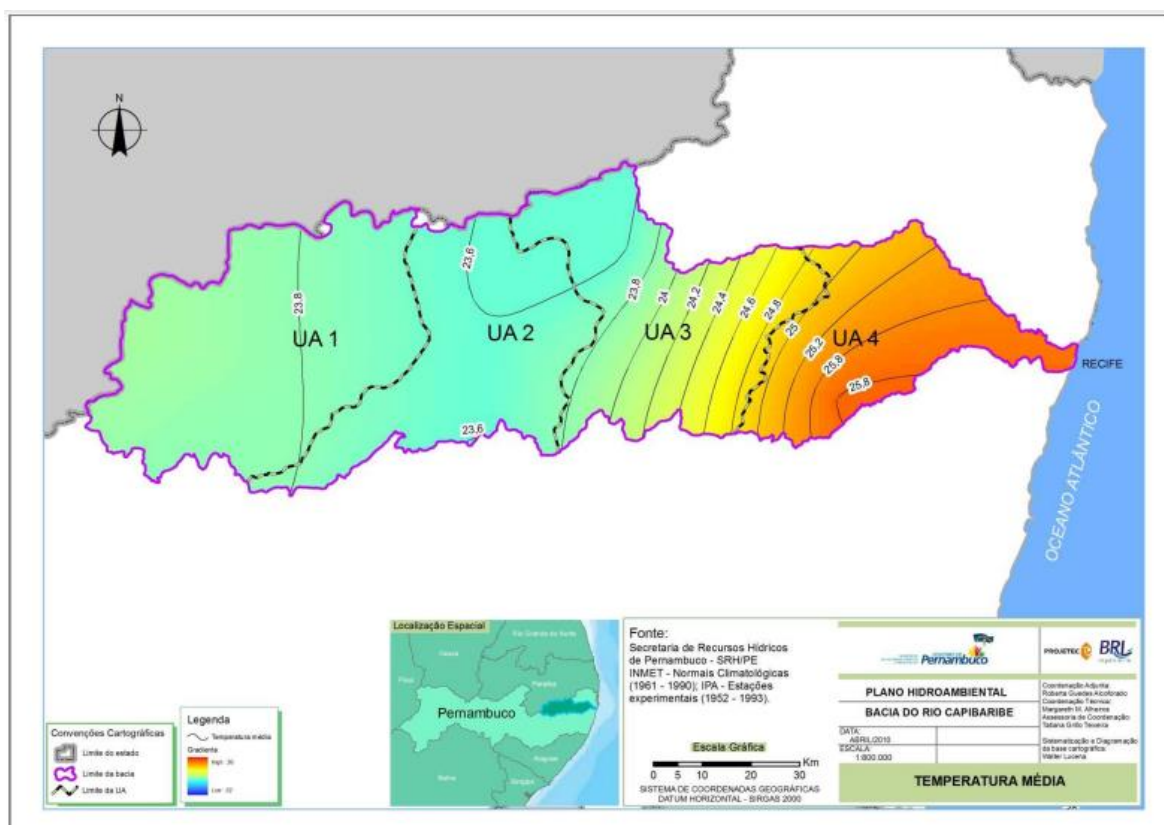


Figura 16 - Isotermas anuais médias da Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: Pernambuco (2010)

Através do mapa de isotermas anuais médias, é possível determinar as temperaturas médias ao longo do ano nas Unidades de Análise (UA) 1, 2 e 3, localizadas na Mesorregião do Agreste, mantendo-se em torno de 24,15 °C. Por outro lado, na UA4, que compreende a Zona da Mata e Região Metropolitana, a temperatura média anual varia em torno de 25,05 °C. De acordo com o Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Capibaribe elaborado pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (2010), a temperatura média em toda a extensão da bacia é registrada em 24,04 °C.

Essas informações estão em concordância com dados fornecidos pela Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH, 2019) e por Ursulino *et al.* (2023), os quais afirmam que a temperatura média anual na bacia varia de 20,46 °C a 26,14 °C, com aumento no sentido montante para jusante do rio. Essa variação também é evidenciada nas temperaturas médias mínimas, variando de 16,9 °C a 23,27 °C, e nas temperaturas máximas, variando de 25,05 °C a 29,92 °C, sendo os meses de abril e setembro mais frios, e os meses de outubro a março mais quentes.

Para a investigação dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe, utilizando a modelagem no SUPER, foram considerados 7 quadros distintos. Esses conjuntos foram distribuídos ao longo de intervalos decenais dentro do horizonte temporal das projeções climáticas. Na abordagem dessas mudanças, optou-se por incorporar oscilações de temperatura e precipitação, a partir das médias atuais consideradas para toda a área da bacia.

Analisando o balanço hídrico da Bacia do Rio Capibaribe, gerado pelo SUPER, se observou uma média de precipitação anual de 750,30 mm de chuva, conforme pode ser verificado na Figura 27, presente no próximo capítulo. Este valor é considerado baixo, sendo característico de áreas de Caatinga, porém, ao se aproximar do litoral, a precipitação aumenta gradativamente, como apontado por Pinheiro (2023).

Dessa forma, para utilização da ferramenta de oscilações climáticas do SUPER, adotaram-se como valores de referência, 750,30 mm de precipitação média anual e 24,04 °C de temperatura média anual, índices estes apresentados e discutidos ao longo desta seção. As variações climáticas foram aplicadas com base nas análises das projeções do CORDEX, como evidenciado na Tabela 4, e que se encontram analisadas e representadas graficamente ao longo do próximo capítulo (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

Tabela 4 - Conjuntos de temperatura e precipitação para realização das simulações

Ambiente temporal	Temperatura média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Período	Variação de Temperatura (°C)	Variação na Precipitação (%)
1	24,04	750,30	2030-2039	0,77	13,09
2			2040-2049	1,29	16,09
3			2050-2059	1,75	15,61
4			2060-2069	2,12	19,41
5			2070-2079	2,71	16,62
6			2080-2089	3,23	8,30
7			2090-2099	3,85	9,45

CAPÍTULO V



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos. A abordagem teve início com a compreensão das projeções climáticas do CORDEX para a Bacia do Rio Capibaribe, seguida pela análise do balanço hídrico da bacia, e por fim, os balanços hídricos resultantes da modelagem hidrológica do SUPer foram apresentados, utilizando a ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática, com a aplicação de sete conjuntos distintos de condições, conforme abordado no capítulo anterior.

5.1. Projeções climáticas do CORDEX

Com o intuito de facilitar a compreensão e análise dos dados das projeções climáticas do CORDEX, realizou-se a representação gráfica das variáveis que foram selecionadas para serem regionalizadas e utilizadas na modelagem hidroclimatológica da bacia hidrográfica. Analisar esses parâmetros são fundamentais para entender as perspectivas climatológicas futuras para a região e visualizar o comportamento dos dados, para que estes possam indicar as oscilações de temperatura e precipitação e assim alimentar a ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática, para posteriormente se obter os resultados provenientes da modelagem hidrológica.

Como descrito ao longo do capítulo anterior, foram selecionados 16 pontos dispostos ao longo da Bacia do Rio Capibaribe, e que englobaram todas as 3 Mesorregiões que integram a bacia (Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife). A Figura 17 ilustra as médias anuais de temperatura dos 16 pontos para toda a janela temporal utilizada (2030-2099). É evidente um comportamento de aumentos recorrentes de temperatura ao longo do tempo, confirmando o cenário de agravamento das mudanças climáticas, esperado para o RCP8.5, onde se considera um cenário crítico de emissão de gases de efeito estufa.

Observa-se que a média anual das temperaturas nos pontos 11 a 16, localizados na Zona da Mata e na Região Metropolitana do Recife (RMR), revela índices significativamente superiores em comparação com as temperaturas registradas nos pontos do Agreste. Esse padrão indica uma maior vulnerabilidade dessa região aos efeitos das mudanças climáticas.

Ao examinar, por exemplo, o ponto 14, percebe-se que ao longo do tempo, a média de temperatura pode se aproximar dos 30 °C, resultando em temperaturas máximas extremas. Tal cenário representa um potencial risco para a população, os recursos hídricos e o meio ambiente como um todo.

Este fenômeno está associado às mudanças climáticas globais, influenciando diretamente os padrões climáticos locais. A elevação das temperaturas contribui para a ocorrência mais frequente e intensa de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, tempestades intensas e inundações.

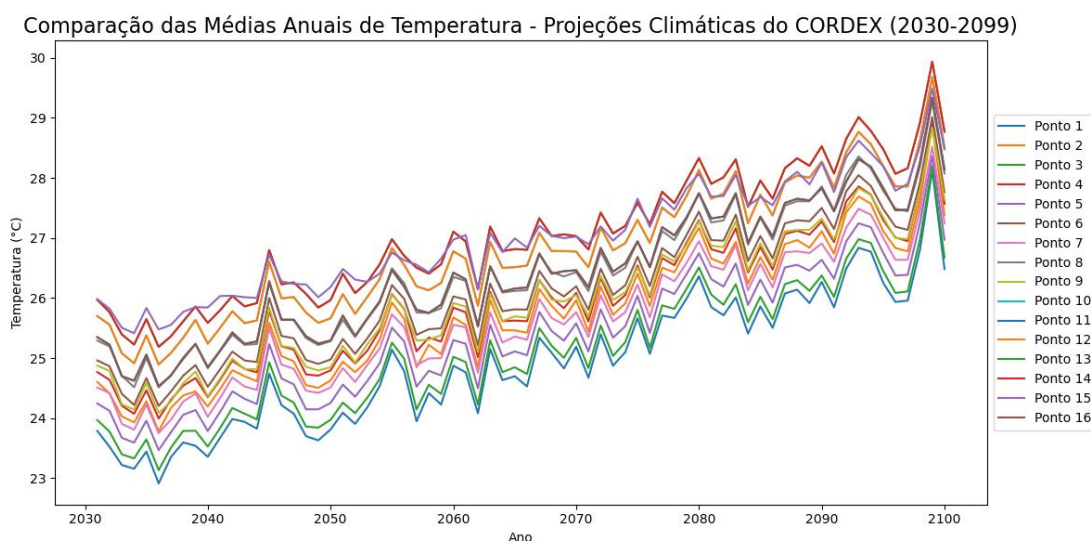


Figura 17 - Comparação das médias anuais de temperatura projetadas e obtidas do CORDEX (2030-2099)

A Figura 18 apresenta a temperatura média ao longo dos próximos 70 anos para toda a extensão da bacia. Ao considerar o comportamento atual da região, com uma variação de temperatura entre 20,46 °C e 26,14 °C, conforme relatado pela CPRH (2019), observa-se nas projeções do CORDEX que, a partir de 2045, o intervalo máximo dessa variação será ultrapassado.

Apesar das flutuações interanuais, com registros de anos apresentando temperaturas médias mais baixas, a análise do padrão do gráfico revela uma tendência consistente de aumento das temperaturas ao longo do tempo. Essa observação suscita a preocupação de uma elevada probabilidade de ocorrência de anos excepcionalmente quentes, como indicado de maneira expressiva em 2098, onde a temperatura média anual pode se aproximar significativamente dos 30 °C.

Esse cenário de aquecimento gradual ao longo das décadas aponta para implicações substanciais no clima regional, reforçando a necessidade premente de adotar medidas proativas de adaptação às mudanças climáticas.

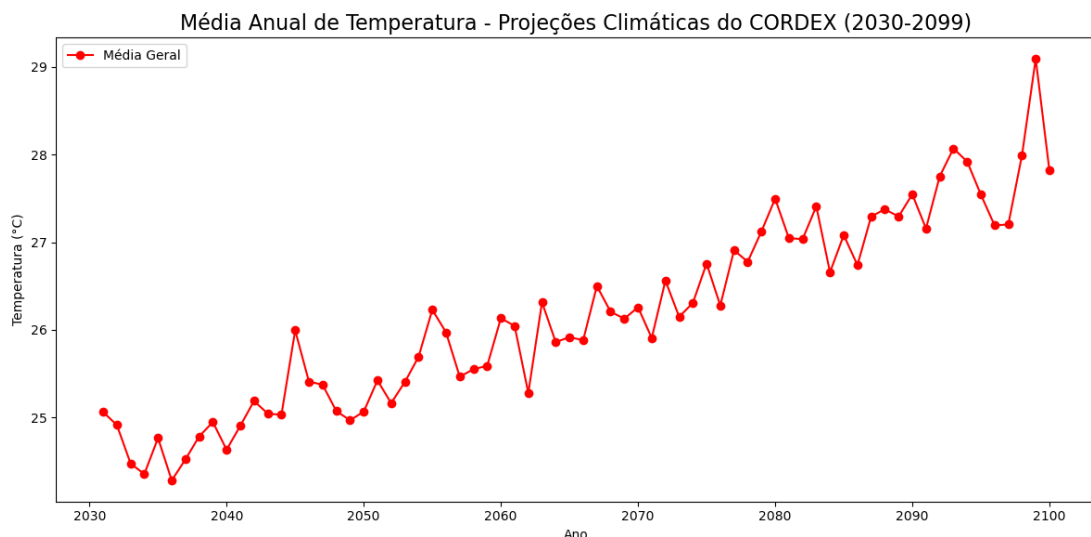


Figura 18 - Média anual de temperatura para a Bacia do Rio Capibaribe obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

Através da análise da Figura 19, é possível visualizar a distribuição média dos acumulados anuais de precipitação na área de estudo em questão. Ao considerar um horizonte temporal de 70 anos, nota-se que o índice médio de pluviosidade atinge 800 mm, representando uma redução de aproximadamente 30% em relação à média de 1133,59 mm, conforme apontado pela Secretaria de Recursos Hídricos do Governo do Estado de Pernambuco (2010).

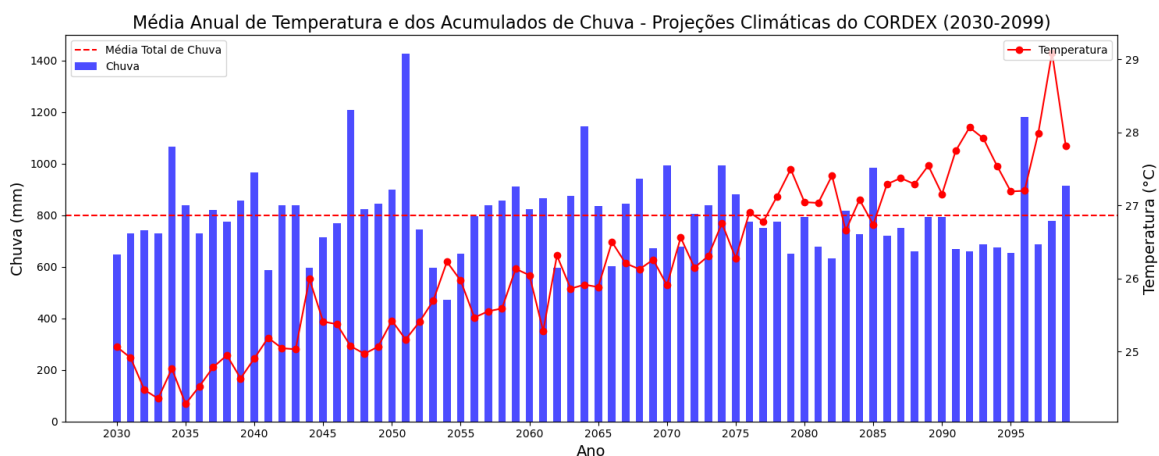


Figura 19 - Média anual de temperatura e acumulados de chuva na Bacia do Rio Capibaribe por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

Ainda de acordo com a Figura 19 é possível analisar que nos anos em que o registro de temperatura média é mais baixo, observa-se um aumento significativo no índice de chuva, indicando uma correlação inversa entre temperatura e precipitação. De maneira complementar, quando a temperatura média é mais elevada, nota-se uma tendência oposta, com um índice de chuva geralmente mais baixo. Essa relação sugere uma influência marcante das variações térmicas na dinâmica pluviométrica da região estudada.

Essa interconexão entre temperatura e precipitação pode ser atribuída a diversos fatores. A temperatura é um elemento fundamental na regulação dos processos atmosféricos, influenciando a capacidade do ar de conter vapor d'água. Em temperaturas mais altas, a atmosfera tende a ter uma capacidade maior de reter umidade, reduzindo a propensão à formação de chuvas. Por outro lado, em temperaturas mais baixas, a atmosfera tem uma capacidade de retenção de umidade menor, o que pode propiciar a ocorrência de chuvas mais frequentes.

Uma outra análise realizada com base nas projeções do CORDEX, encontra-se evidenciada na Figura 20, que mostra a distribuição dos acumulados mensais das precipitações pluviométricas nos 16 pontos dispostos ao longo da Bacia Hidrográfica.

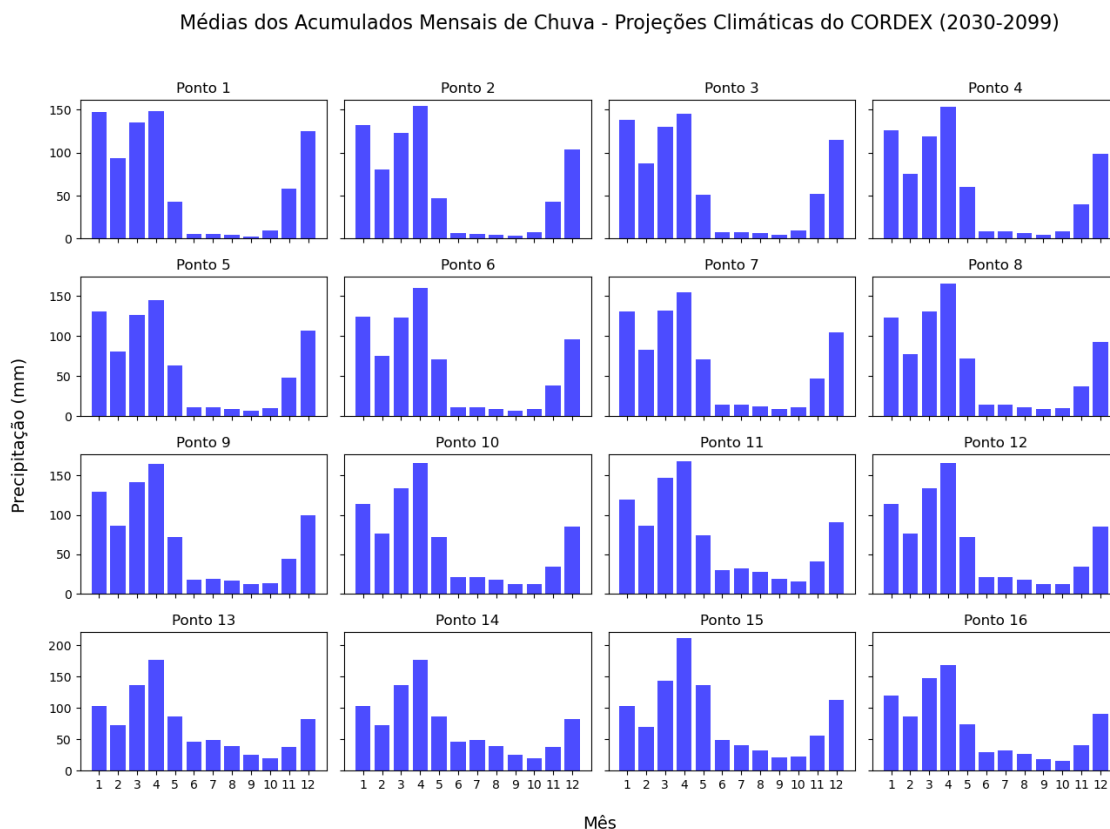


Figura 20 - Médias dos acumulados mensais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe obtidos por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

A análise da sazonalidade na Bacia do Rio Capibaribe revela padrões distintos de distribuição pluviométrica ao longo do ano. Nos primeiros meses, de janeiro a abril, observa-se um aumento significativo nos índices de chuva, seguido por uma redução no mês de maio. O período de junho a outubro é caracterizado por uma baixa pluviosidade, alcançando sua mínima expressão nesses meses. No entanto, a partir de novembro, a região experimenta um aumento gradual na pluviosidade, voltando a atingir níveis mais elevados em dezembro. Esse comportamento sazonal indica uma alteração substancial na distribuição das chuvas, marcando uma mudança significativa nos padrões climáticos da bacia.

É importante destacar que, atualmente, na porção situada no Agreste, o período chuvoso abrange aproximadamente quatro meses, sendo junho o mês com os maiores índices de pluviosidade. Por outro lado, na parte da bacia localizada na Região Metropolitana do Recife, onde o clima é classificado como tropical úmido, o período chuvoso se estende por cerca de seis meses, geralmente de março a agosto, conforme apontado por registros históricos (Pernambuco, 1994). Essa mudança na distribuição sazonal das chuvas destaca um comportamento inversamente proporcional, evidenciando a complexidade hidrológica na Bacia do Rio Capibaribe diante dos efeitos das mudanças climáticas.

5.1.1.1. Projeções CORDEX de temperatura e precipitação na Bacia do Rio Capibaribe – Fração Agreste

Conforme discutido ao longo deste estudo, a subdivisão da bacia em dois grupos foi essencial para uma análise mais aprofundada da dinâmica entre os elementos água e clima. A Figura 21 apresenta as médias anuais de temperaturas máximas, médias e mínimas na porção Agreste da Bacia do Rio Capibaribe, enquanto a Figura 22 destaca os acumulados anuais de precipitação. As médias de temperatura revelam uma oscilação entre 23 °C e 28 °C nessa área específica da bacia. Quanto às projeções de chuva, observa-se que as médias anuais de acumulados variam entre 700 mm e 820 mm, aproximadamente, representando um aumento percentual moderado em comparação com as médias atuais da região. Vale ressaltar a identificação de eventos extremos de chuva nessa região, com registros que podem superar os 1750 mm em alguns pontos, notadamente entre 2045 e 2050, e novamente entre 2090 e 2095.

Médias Anuais de Temperatura na Bacia do Rio Capibaribe - Agreste - Projeções Climáticas do CORDEX (2030-2099)

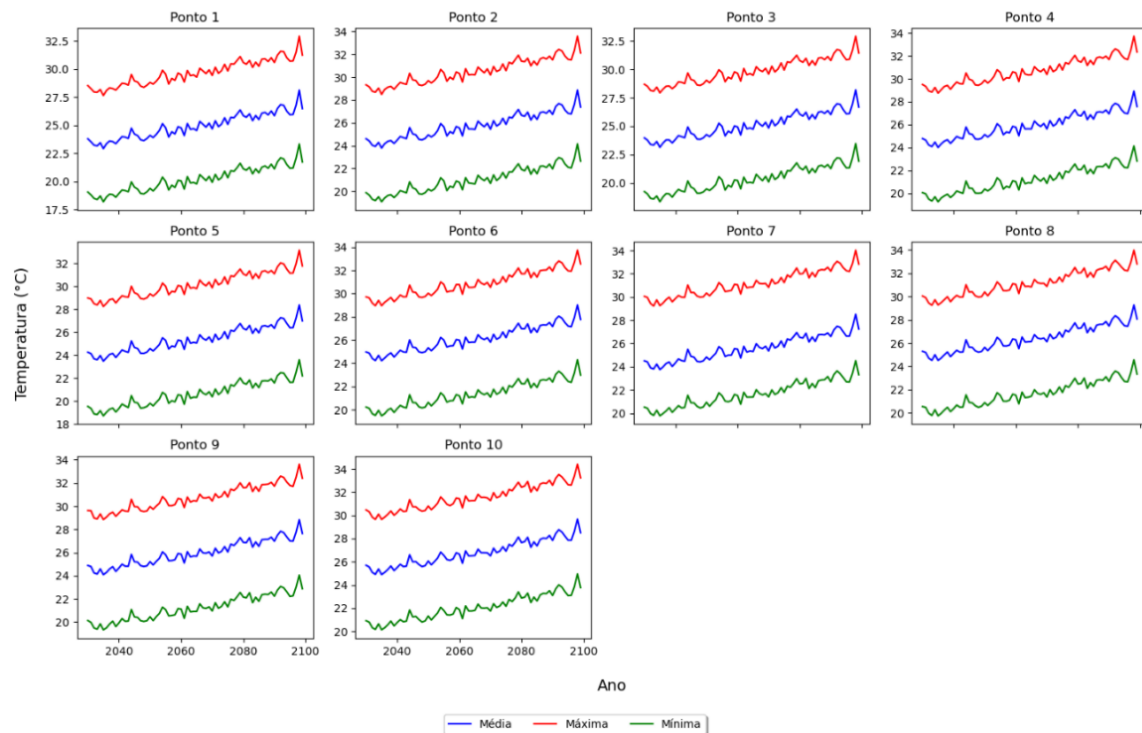


Figura 21 - Médias anuais de temperatura na fração Agreste da Bacia do Rio Capibaribe obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

Acumulados Anuais de Chuva na Bacia do Rio Capibaribe - Agreste - Projeções Climáticas do CORDEX (2030-2099)

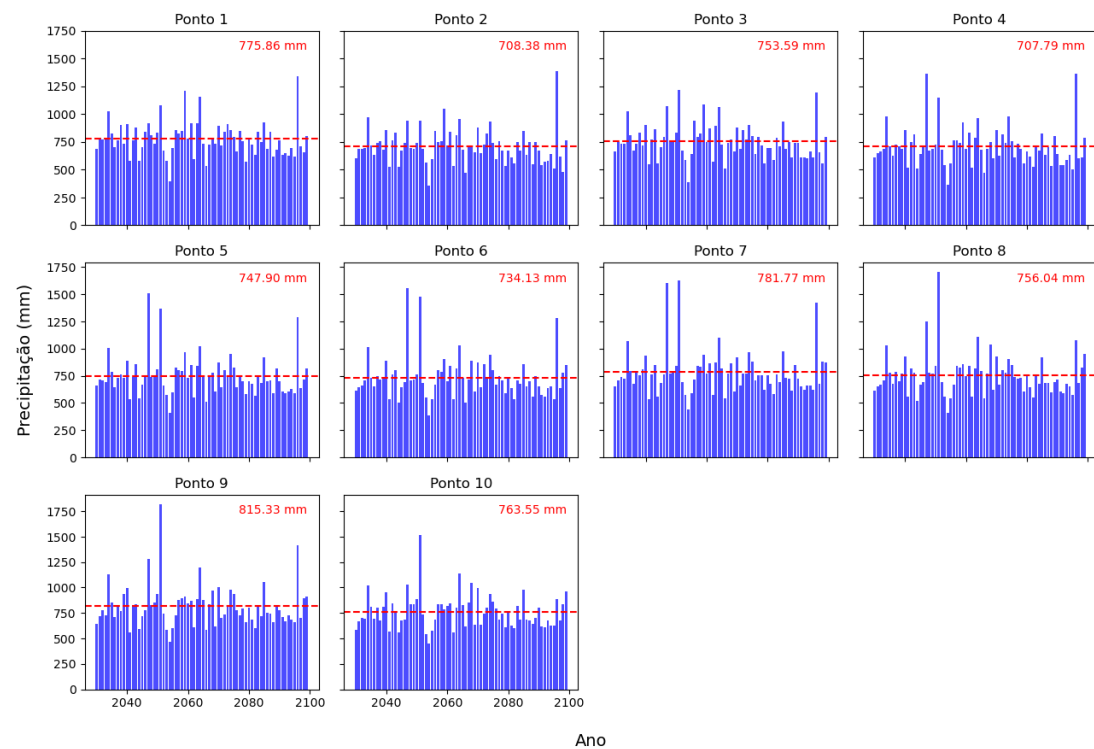


Figura 22 - Acumulados anuais de precipitação na fração Agreste da Bacia do Rio Capibaribe obtidos por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

5.1.2. Projeções CORDEX de temperatura e precipitação na Bacia do Rio Capibaribe - Fração Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife

Da mesma maneira que abordado na subseção anterior, apresentam-se agora as médias anuais de temperaturas máximas, médias e mínimas na porção correspondente à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife, integrantes da Bacia do Rio Capibaribe (Figura 23). Até o ano de 2099, os índices médios de temperatura revelam uma variação situada entre 25,5 °C e 29 °C, aproximadamente.

Dessa forma, ao se comparar com a média atual de temperatura para a região, que é de 25,05 °C, percebe-se um aumento de quase 4 °C ao longo do século. Esse fenômeno tem implicações diretas na dinâmica hidroambiental da bacia, destacando a relevância de compreender e adaptar-se às mudanças climáticas em curso.

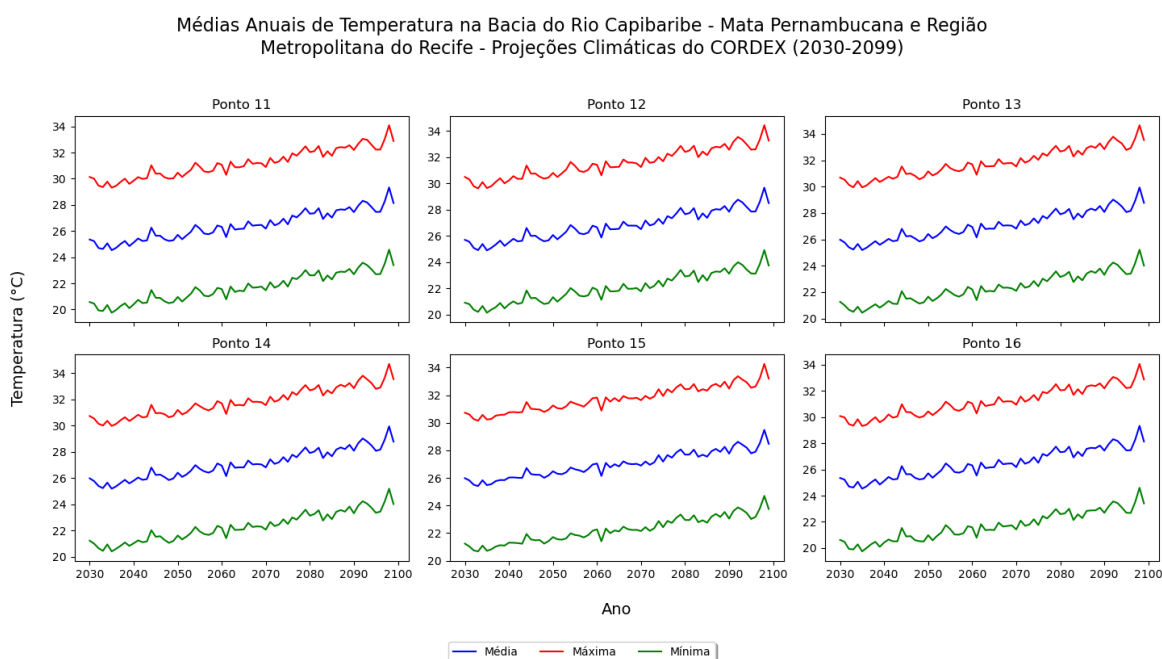


Figura 23 - Médias anuais de temperatura na fração correspondente à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife, que integram a Bacia do Rio Capibaribe, e obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

Quanto aos volumes médios anuais acumulados de chuva (Figura 24), notam-se valores situados entre 760 mm e 1000 mm, indicando uma drástica redução em comparação ao padrão médio anual de chuvas atualmente registrado nessa parte específica da bacia hidrográfica. Conforme evidenciado ao longo deste estudo, os índices históricos

de pluviosidade no extremo leste da bacia, ou seja, na região litorânea, giram em torno de 2400 mm.

Dessa forma, é possível inferir que essa área enfrentará uma redução de mais da metade dos volumes precipitados atualmente. Ademais, observa-se uma menor incidência de eventos extremos nessa região em comparação com a parcela que compreende a Mesorregião do Agreste, com projeções de chuvas atípicas detectadas apenas para o ano de 2050.

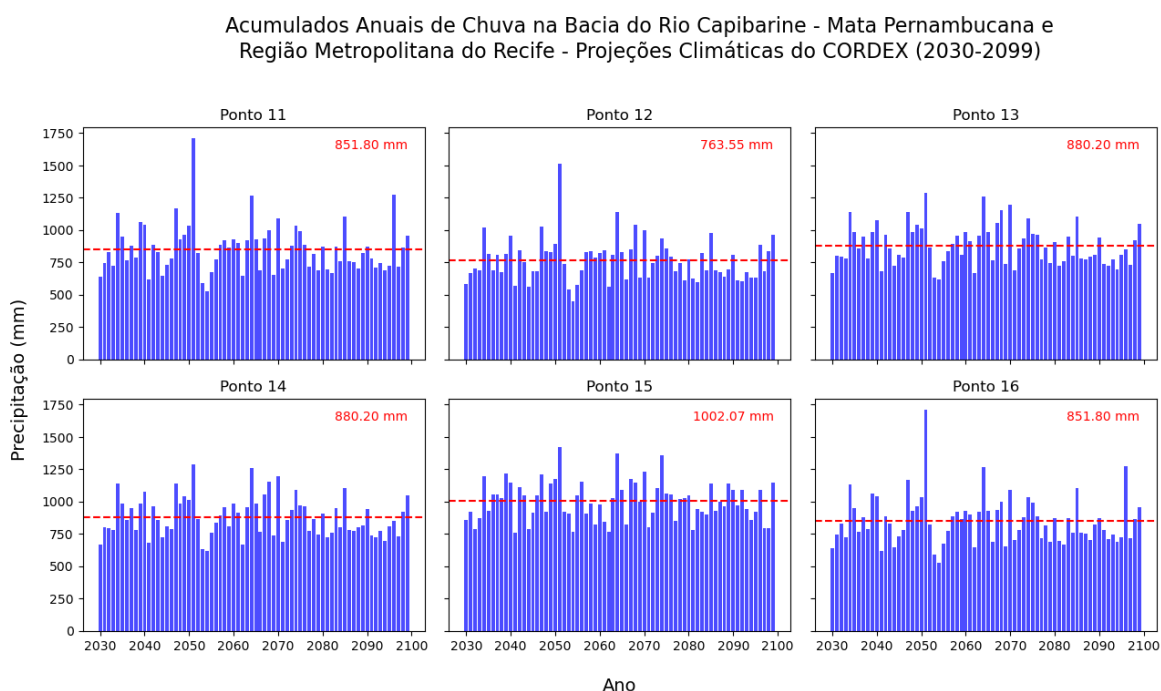


Figura 24 - Acumulados anuais de precipitação na fração correspondente à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife, que integram a Bacia do Rio Capibaribe, e obtidas por meio de projeções do CORDEX (2030-2099)

Para a criação dos ambientes utilizados na ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática do SUPeR, foram calculadas as médias dos acumulados anuais de chuva e das temperaturas médias entre os 16 distribuídos ao longo de toda a extensão territorial da bacia. Posteriormente aplicou-se intervalos de 10 anos, dividindo a série temporal em 7 períodos, como mostra as Figuras 25 e 26.

Ao examinar as médias de temperatura, torna-se evidente um padrão ascendente, iniciando em 24,81 °C no intervalo de 2030 a 2039 e alcançando 27,89 °C no período de 2090 a 2099. Destaca-se que anos específicos apresentam temperaturas particularmente elevadas para o contexto ambiental da região, como exemplo, o ano de 2098 projeta-se a

registrar aproximadamente 29 °C, indicando uma tendência de aumento térmico ao longo das décadas analisadas.

Médias Anuais de Temperatura na Bacia do Rio Capibaribe - Intervalos decenais - Projeções do CORDEX (2030-2099)

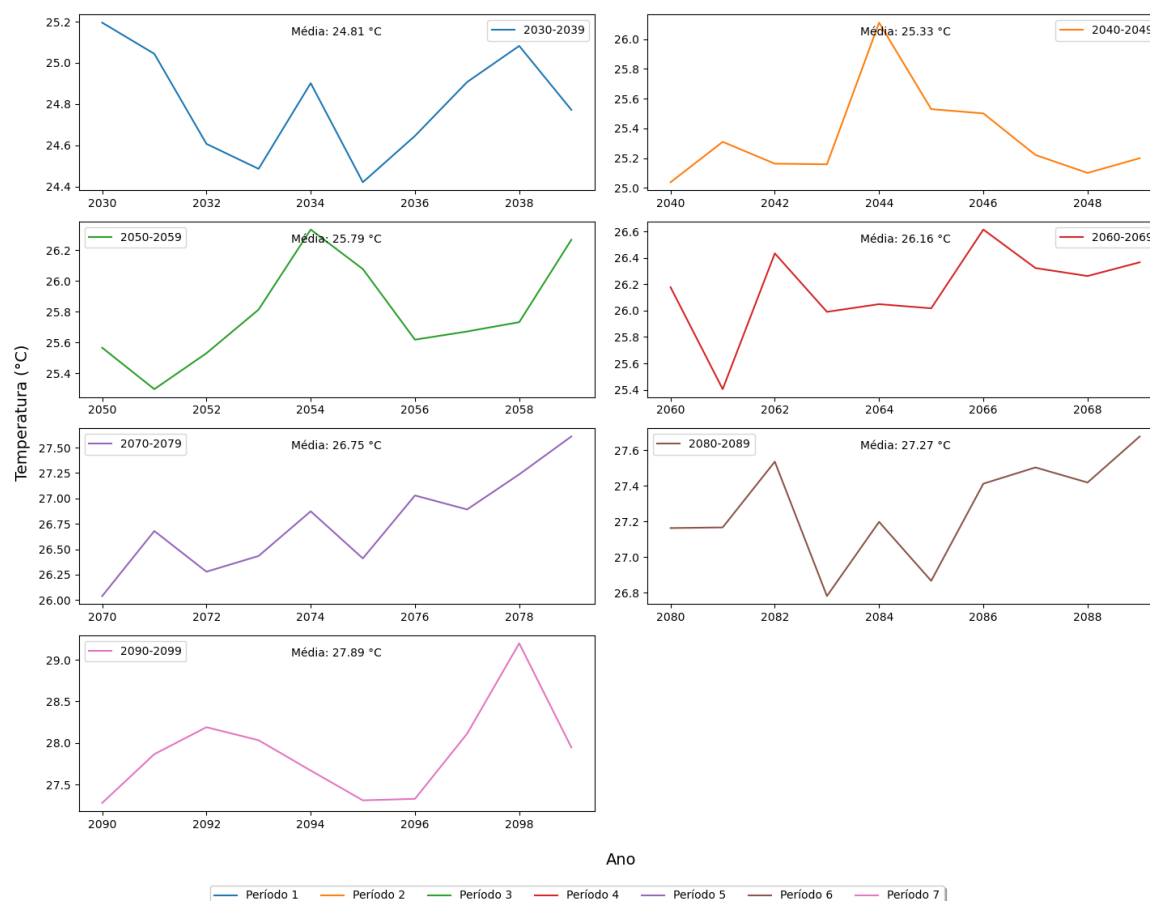


Figura 25 - Médias anuais de temperatura na Bacia do Rio Capibaribe, obtidas por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais

Ao examinar os diferentes intervalos temporais dos acumulados anuais de precipitação na Bacia do Rio Capibaribe (Figura 26), nota-se que os volumes médios não seguem uma tendência de crescimento ou redução contínua ao longo da série histórica, mas, sim, revelam uma variação alternada. A menor média de chuvas, registrando 812,55 mm, pode ocorrer entre 2080 e 2089, enquanto o maior registro médio para essa região (895,91 mm) pode ser observado entre 2060 e 2069.

Ao analisar os índices pluviométricos individualmente, identifica-se que 2054 será o ano mais seco dos próximos 70 anos, com um registro anual de cerca de 510 mm, sinaliza um período de escassez hídrica. Essa análise detalhada dos padrões de precipitação oferece visões cruciais para compreender a variabilidade climática e suas implicações na

gestão hídrica da área, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e planejamento sustentável.

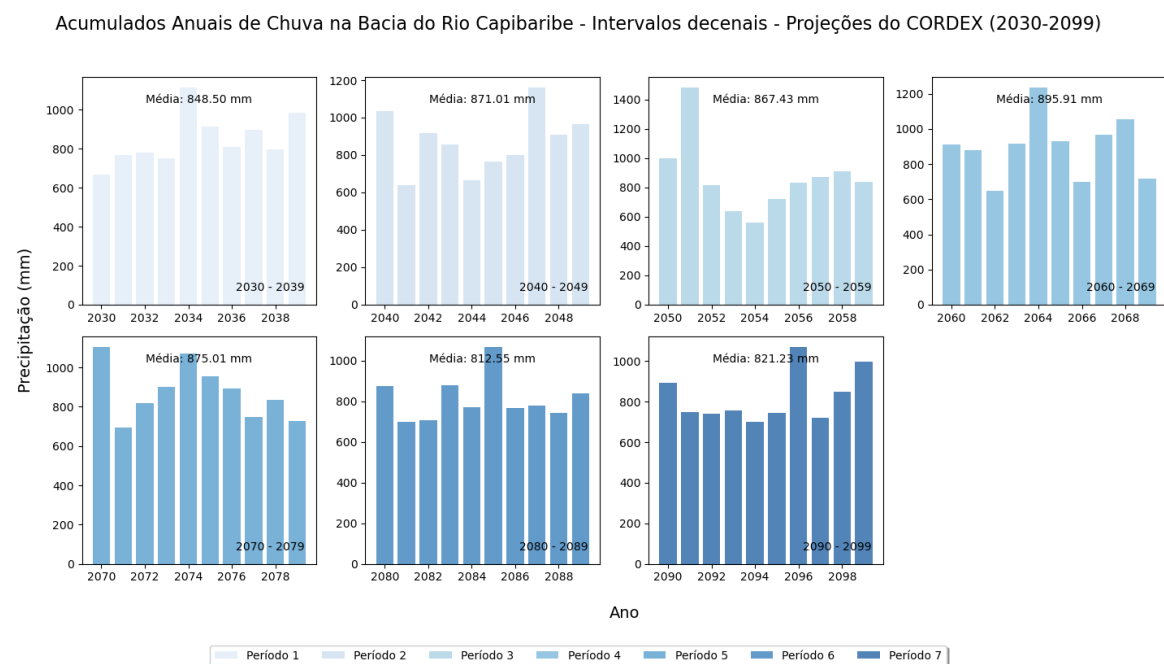


Figura 26 - Acumulados anuais de chuva na Bacia do Rio Capibaribe, obtidos por meio de projeções do CORDEX e divididas em intervalos decenais

5.2. Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe

A Figura 27 evidencia o balanço hídrico da Bacia do Rio Capibaribe, mostrando um índice de precipitação pluviométrica média anual em torno de 750,30 mm, uma taxa de evapotranspiração potencial de 1.831,80 mm e de evapotranspiração real de 425,10 mm. Nota-se que cerca de 56% da chuva é perdida por evapotranspiração, o que representa um índice elevado, podendo ser explicado em decorrência das altas temperaturas observadas na região. Vale salientar, que em resposta a esse percentual, apenas 44% da água de chuva é absorvida ou escorre, contribuindo assim para a alimentação de reservatórios.

Segundo Pinheiro (2023), esse fator pode causar também uma grande variabilidade ao longo do percurso da bacia, influenciado pelo comportamento observado na região do baixo Capibaribe, que se caracteriza por apresentar maiores índices pluviométricos e menores índices de evapotranspiração, e pelo observado no alto e médio Capibaribe, que apresenta uma inversão nos índices, contrastando com a Zona da Mata Atlântica e litoral, o que ocasiona uma redução nas médias consideradas.

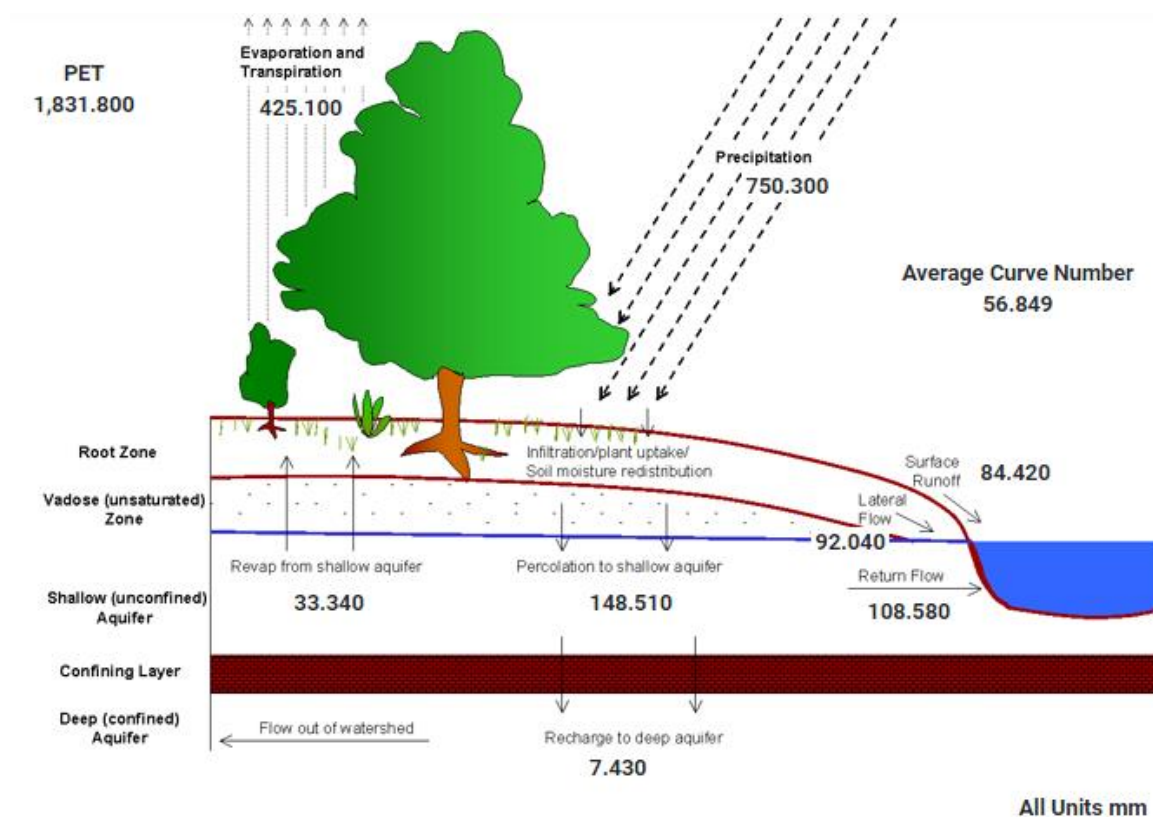


Figura 27 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: SUPer (2024)

Ainda de acordo com o balanço hídrico, é possível verificar que aproximadamente 19,8% da precipitação, percola, e desse total, cerca de 22,45% fica retido pelas raízes. Já com relação ao escoamento superficial, atesta-se que esse índice corresponde a 84,42 mm, enquanto que o escoamento lateral ou subsuperficial é de 92,04 mm. No que concerne à análise do escoamento de base, observa-se que este corresponde a 108,58 mm, representando 14,48% do volume precipitado.

Conforme Nóbrega e Santiago (2016), a América do Sul abriga três extensas áreas semiáridas: a região de Guajira, na Venezuela e Colômbia, a diagonal seca que percorre o Cone Sul, abrangendo Argentina, Chile e Equador, e a região do Nordeste do Brasil, marcada por elevadas temperaturas médias anuais e significativa variabilidade espaço-temporal na precipitação, com predominância fitogeográfica da caatinga. Ao examinar as médias diárias mensais de precipitação na Bacia do Rio Capibaribe, presentes na Figura 28, nota-se uma considerável variabilidade na distribuição interanual, uma característica típica da região em que a bacia está inserida.

Evidencia-se que, durante a última década da série histórica, houve uma redução nos índices de distribuição de chuvas diárias, exceto no ano de 2011, que se destacou por apresentar dias mais chuvosos. Logo em seguida, a bacia experimentou uma diminuição

significativa nos índices pluviométricos, oscilando majoritariamente entre 5 e 7 mm. Esse padrão de variação na precipitação ocorreu em um contexto mais amplo de influências climáticas na região semiárida, conforme apontado por Marengo, Cunha e Alves (2016), que destacou a ocorrência de uma seca severa nesse período.

Esse fenômeno foi atribuído à atividade intensificada da alta pressão subtropical próxima ao continente, impactando o regime de chuvas no Nordeste. Essa informação adiciona uma perspectiva climática mais abrangente para entender as variações observadas na Bacia do Rio Capibaribe.

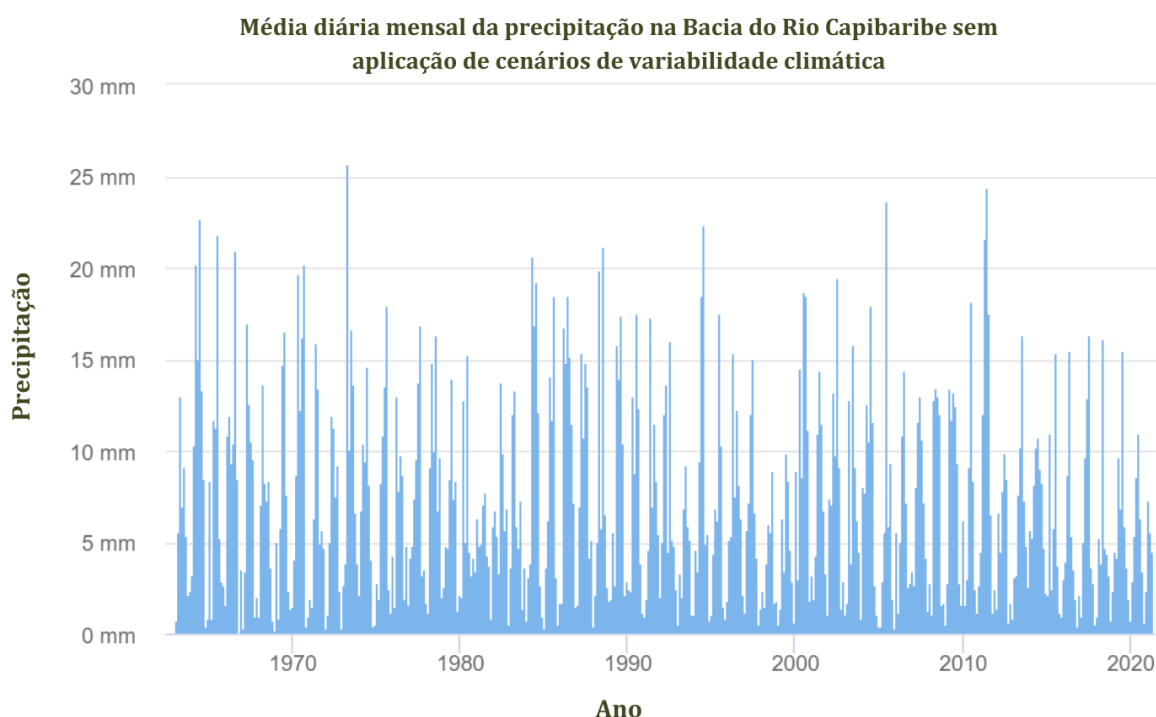


Figura 28 - Média diária mensal da precipitação na Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: SUPeR (2024)

As Figuras 29 e 30 evidenciam as médias diárias mensais de evapotranspiração potencial e real, respectivamente. De acordo com Tucci e Beltrame (2001), a evapotranspiração potencial refere-se à quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração em uma unidade de tempo. Essa transferência ocorre em uma superfície extensa totalmente coberta por vegetação de porte baixo e adequadamente abastecida de água. Marcussi, Arantes e Wendland (2006) defendem que no contexto da hidrologia, a evapotranspiração é empregada na análise do balanço hídrico para identificar períodos de excesso ou escassez de água.

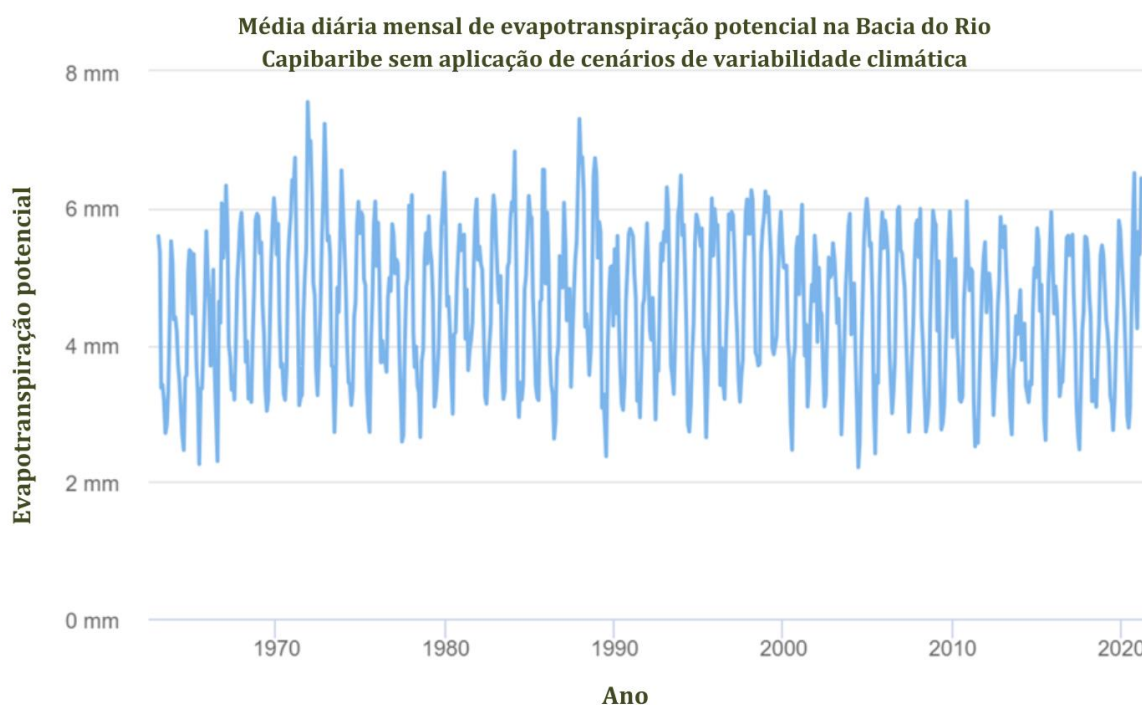


Figura 29 - Média diária mensal de evapotranspiração potencial na Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: SUPer (2024)

Em relação à evapotranspiração potencial, os valores registrados variam entre 3 mm e 6 mm na média diária mensal, apresentando uma redução moderada nos últimos anos da série histórica. No que diz respeito à evapotranspiração real, observam-se oscilações diárias com valores abaixo de 1 mm, podendo atingir patamares superiores a 3 mm.

Nota-se que também há uma tendência de diminuição nos dados de evapotranspiração real, especialmente a partir de 2010, possivelmente em consonância com a diminuição da pluviosidade. Esses parâmetros estão interligados, indicando que em períodos de baixa precipitação, há uma menor retenção de água na vegetação e no solo, resultando em uma evapotranspiração proporcionalmente menor.

A partir de 2010, mesmo com uma tendência geral de diminuição na evapotranspiração real, foram registrados picos esporádicos ao longo dessa última década. Esses eventos pontuais de maior evapotranspiração podem ser considerados exceções em um cenário global de redução. Tal variação pode ser atribuída a fatores sazonais ou eventos climáticos específicos que influenciam temporariamente os processos de evaporação e transpiração. É interessante observar que esse padrão de comportamento também se repetiu nas chuvas, indicando uma relação direta entre os baixos volumes pluviométricos e a menor retenção de água na vegetação e no solo.

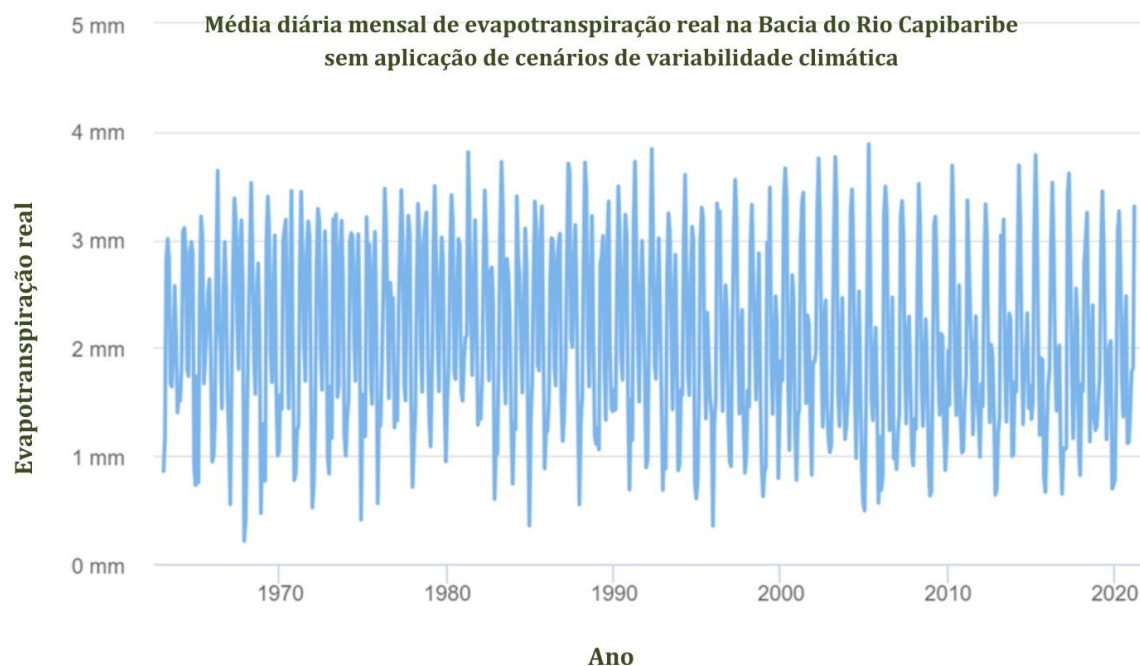


Figura 30 - Média diária mensal de evapotranspiração real na Bacia do Rio Capibaribe.
Fonte: SUPER (2024)

As águas subterrâneas armazenadas, conhecidas como fluxo de base, representam um componente crucial dos recursos hídricos, caracterizando-se pelo escoamento lento em relação às precipitações e ao escoamento superficial. Compreender o fluxo de base é de suma importância não apenas para a avaliação da qualidade da água, mas também para a gestão eficiente dos recursos hídricos, incluindo seu uso para abastecimento (Eckhardt, 2008).

A Figura 31 destaca o padrão médio diário mensal do fluxo de base na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. Durante vários momentos ao longo da série histórica, observa-se que o fluxo de base médio diário atinge 0 mm, mas exibe uma oscilação geralmente situada entre 2 mm e 4 mm. Ao contextualizar essa dinâmica no balanço hídrico da bacia, constata-se que apenas aproximadamente 14,48% dos volumes de precipitação são retidos como fluxo de base.

Essa parcela relativamente pequena de água retida como fluxo de base ressalta a vulnerabilidade da bacia em reter e armazenar as águas precipitadas. Em face dessa limitada retenção, uma porção substancial da chuva pode ser suscetível à evapotranspiração, escoamento superficial e outros processos, impactando diretamente na disponibilidade hídrica e nos recursos aquáticos da região.

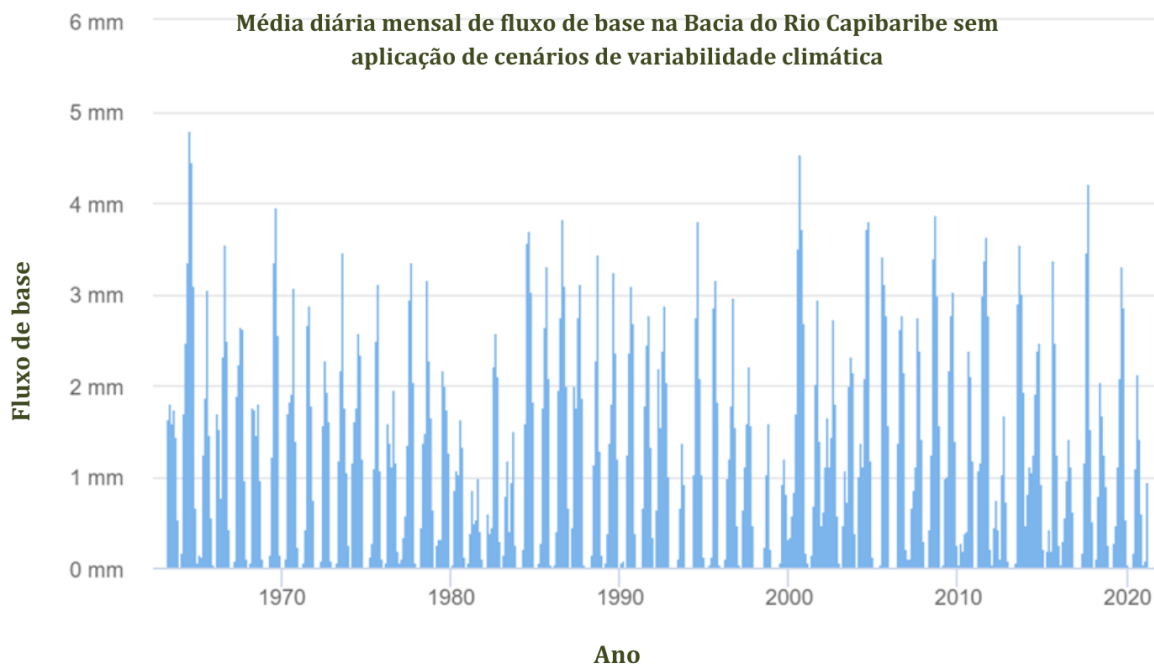


Figura 31 - Média diária mensal de fluxo de base na Bacia do Rio Capibaribe. Fonte: SUPer (2024)

5.3. Balanços hídricos médios anuais da Bacia do Rio Capibaribe após a utilização da ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática

Conforme destacado por Brito *et al.* (2020), a quantificação e avaliação do balanço hídrico representam uma metodologia de grande relevância para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas, seja em escalas de bacias hidrográficas ou em regiões de diferentes dimensões. O balanço hídrico proporciona informações sobre os volumes de entrada e saída de água na bacia, permitindo a identificação de cenários potenciais de excesso ou escassez hídrica.

Nas Figuras 32 a 38 são apresentados os balanços hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe após a aplicação dos diferentes conjuntos de oscilações climáticas, por meio da ferramenta *Climate sensitivity/variability analysis* do SUPer.

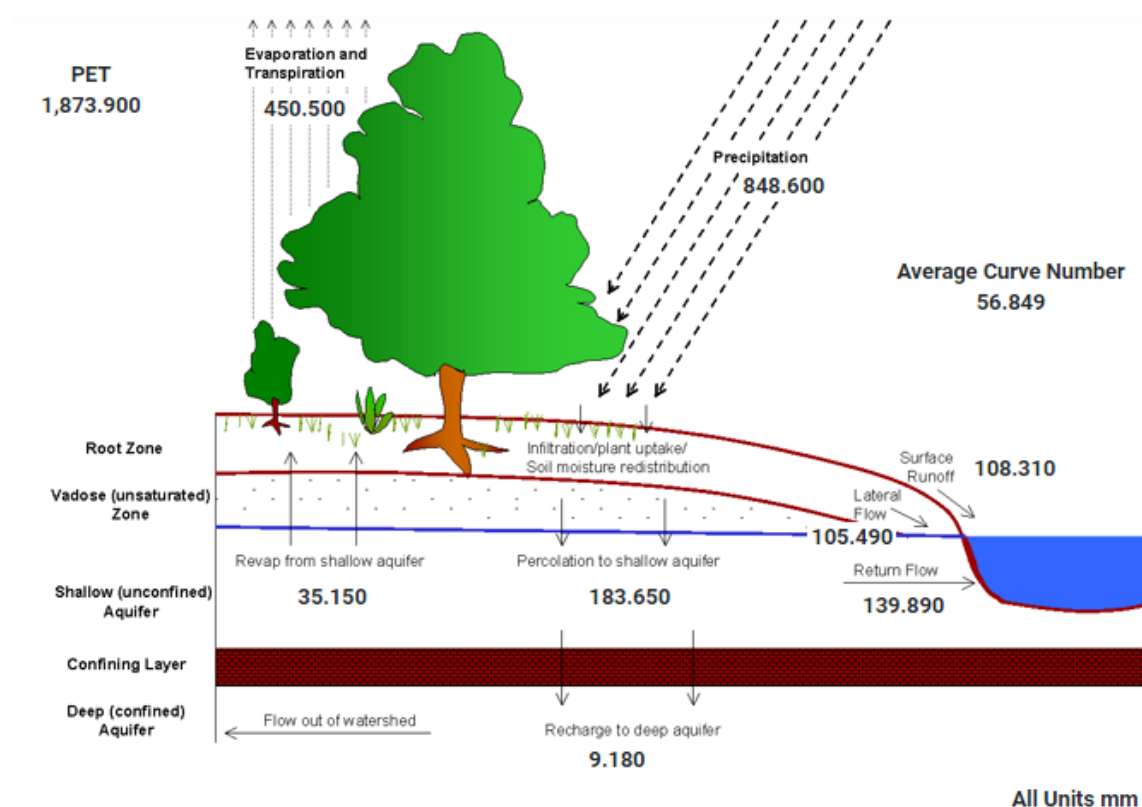


Figura 32 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 1 de variabilidade climática (2030-2039). Fonte: SUPer (2024)

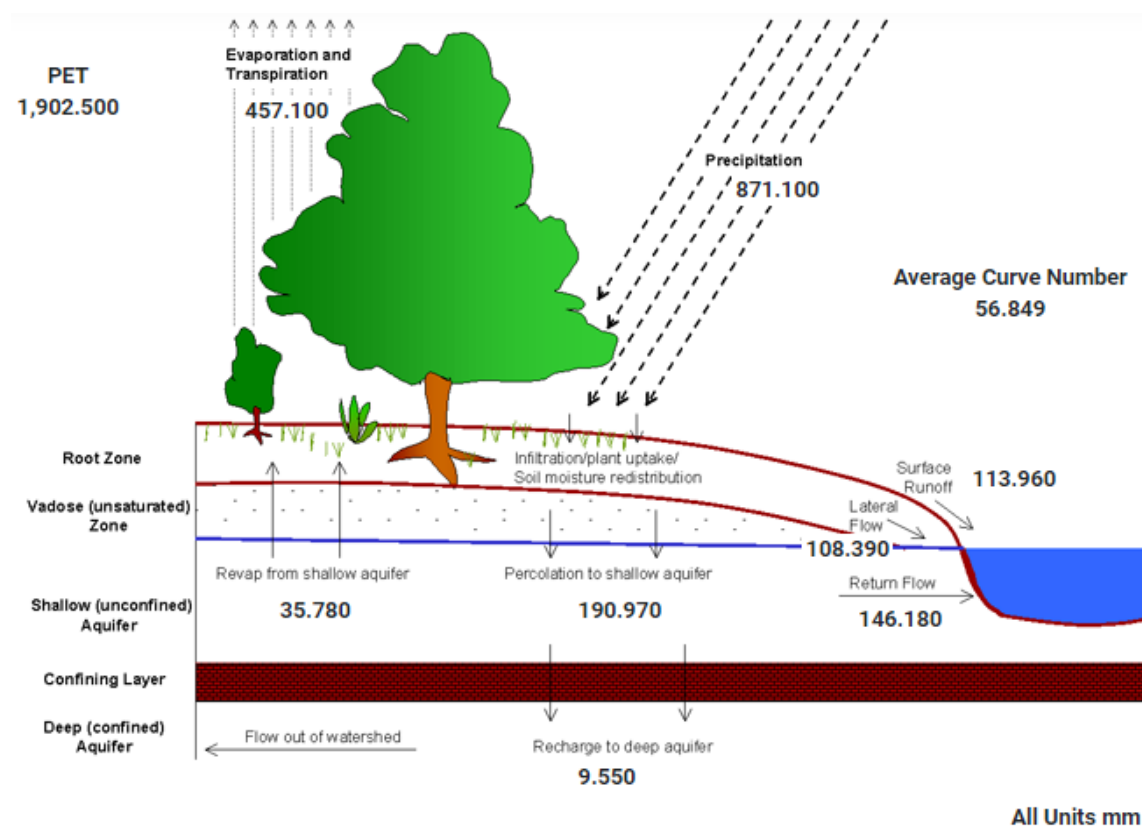


Figura 33 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 2 de variabilidade climática (2040-2049). Fonte: SUPer (2024)

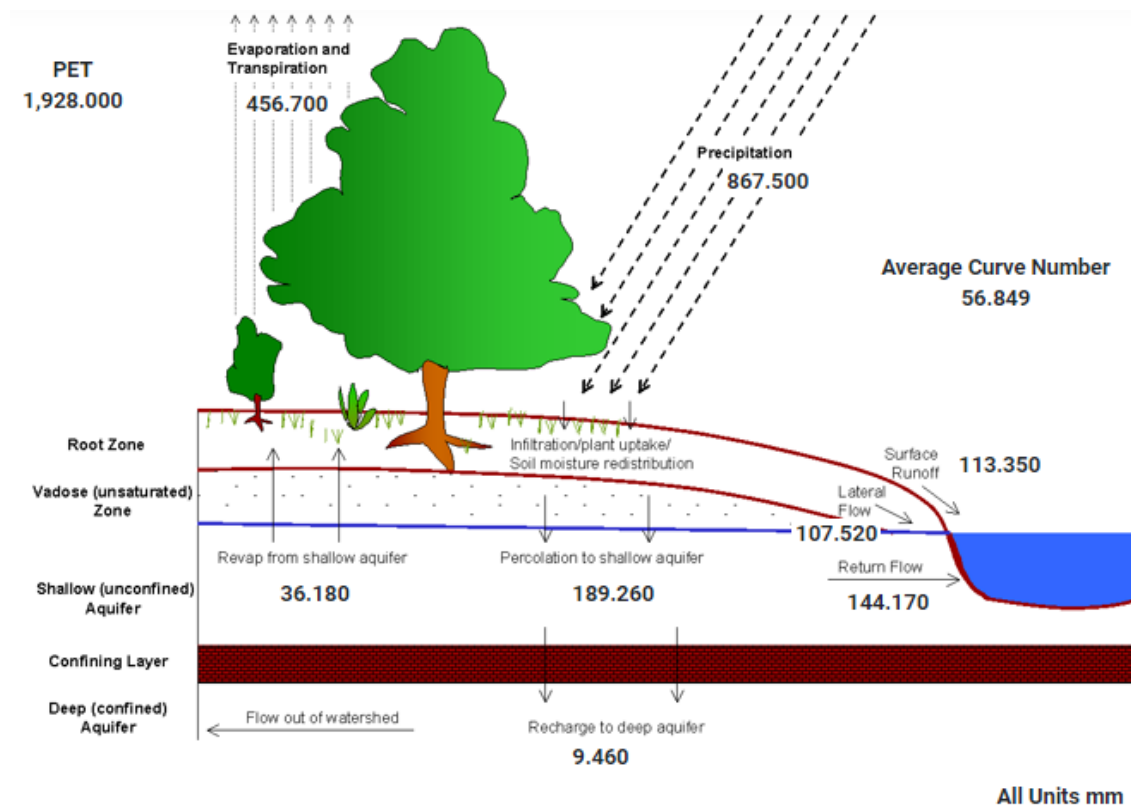


Figura 34 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 3 de variabilidade climática (2050-2059). Fonte: SUPeR (2024)

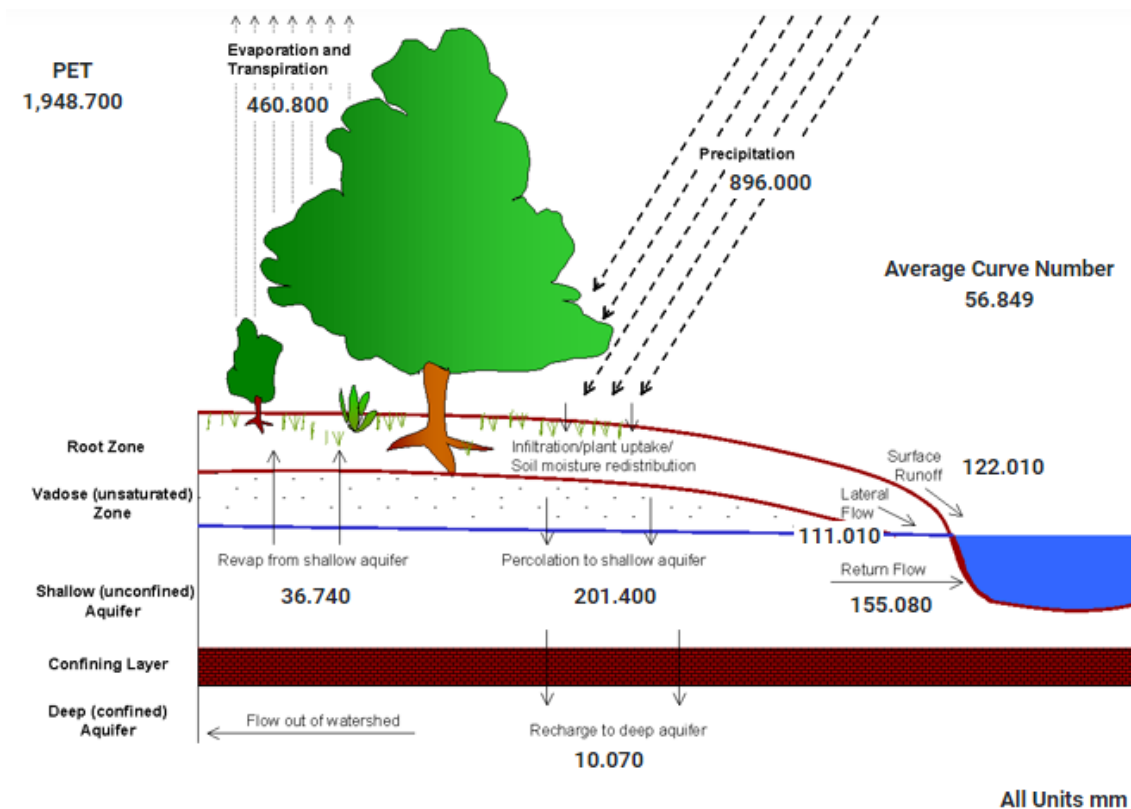


Figura 35 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 4 de variabilidade climática (2060-2069). Fonte: SUPeR (2024)

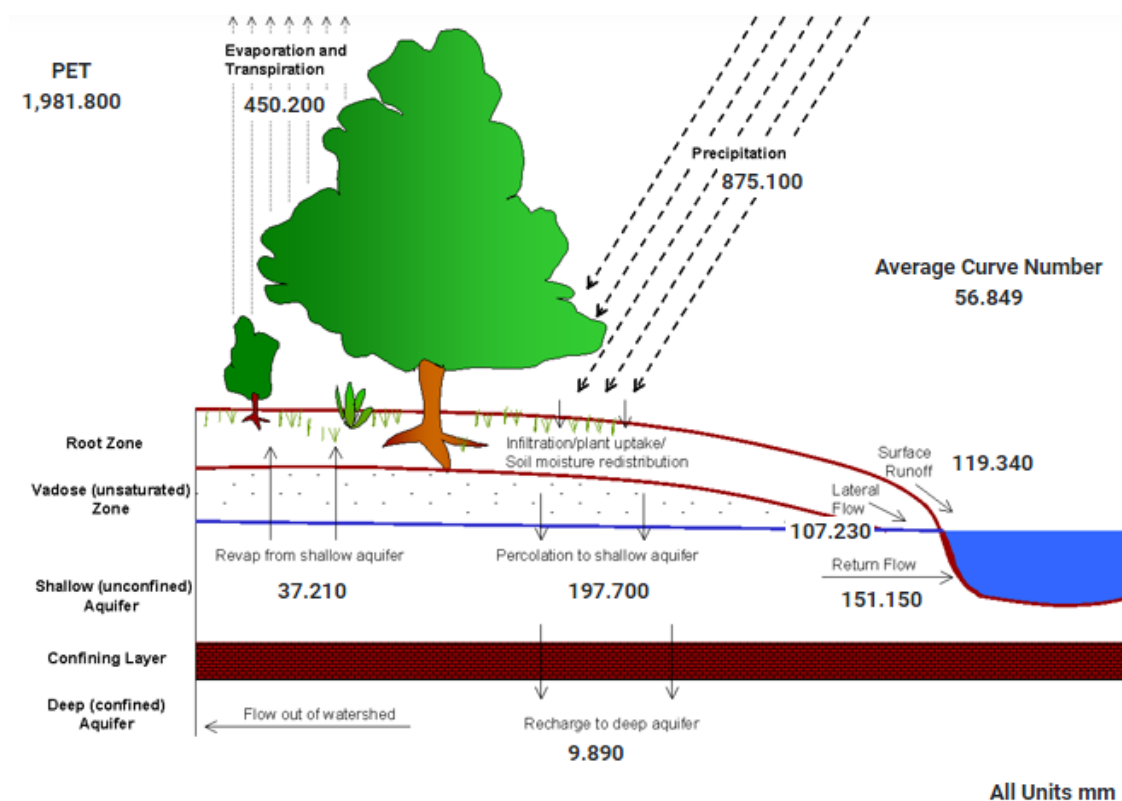


Figura 36 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 5 de variabilidade climática (2070-2079). Fonte: SUPeR (2024)

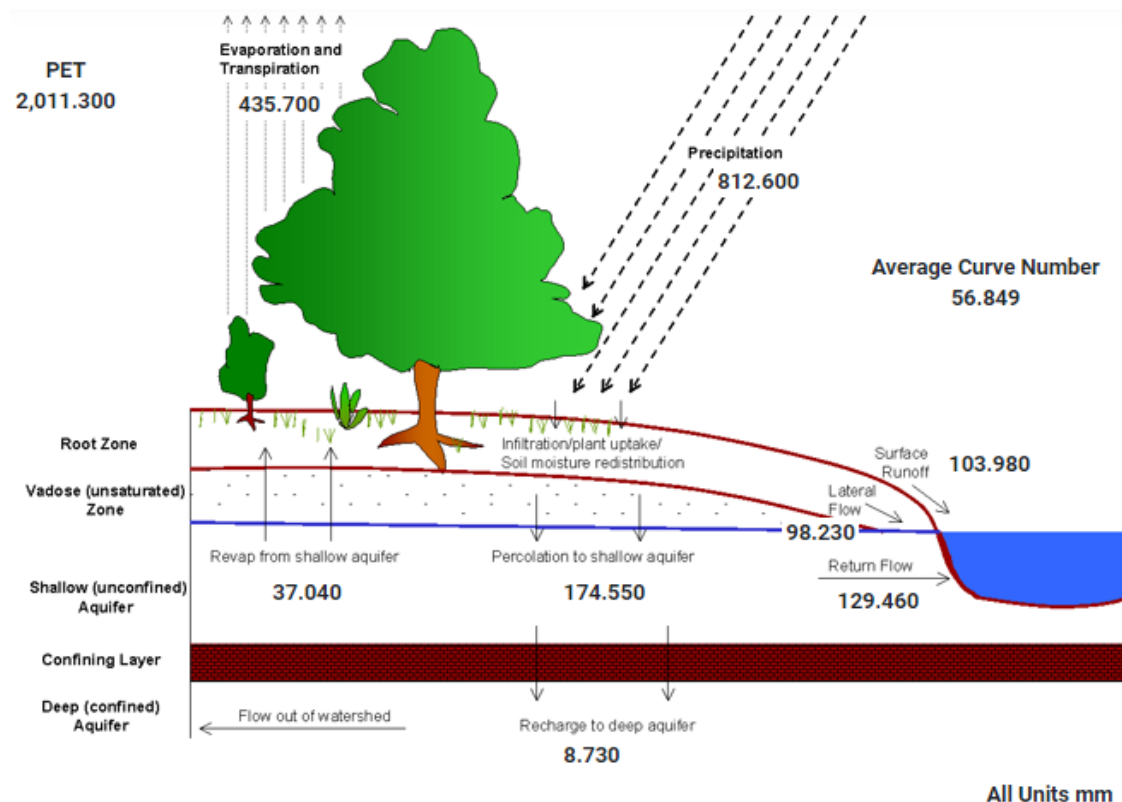


Figura 37 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 6 de variabilidade climática (2080-2089). Fonte: SUPeR (2024)

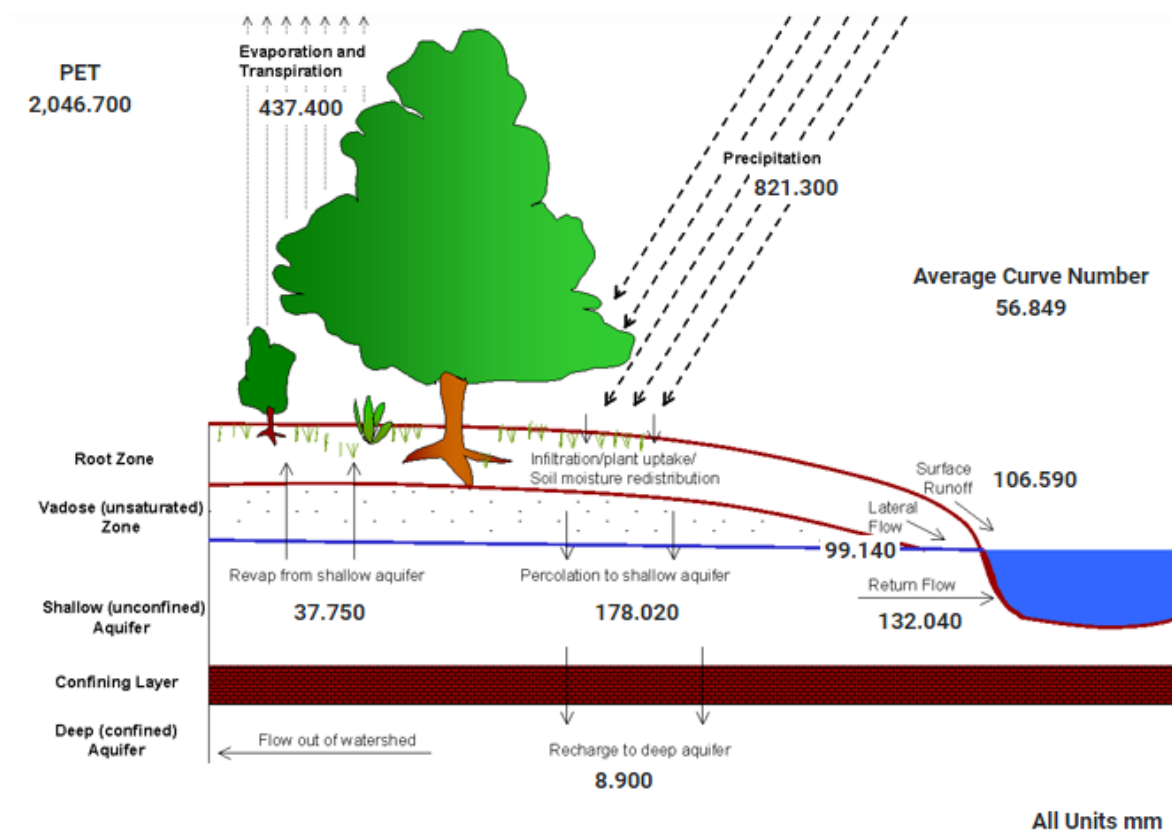


Figura 38 - Balanço hídrico médio anual da Bacia do Rio Capibaribe com aplicação do conjunto 7 de variabilidade climática (2090-2099). Fonte: SUPeR (2024)

Ao examinar os parâmetros provenientes das simulações hidrológicas nos distintos conjuntos de variabilidade climática, é possível constatar um notável aumento nas taxas de evapotranspiração potencial e real em comparação com as taxas observadas no balanço hídrico de referência (Figura 27), como pode ser conferido na Tabela 5. O conjunto 4, que engloba a década 2060-2069, possui a maior taxa de crescimento percentual de evapotranspiração real, apresentando o equivalente a 8,40%. Enquanto que no contexto 6 (2080-2089) há o registro de menor crescimento, correspondendo a apenas 2,49% em relação ao índice observado no balanço hídrico de referência.

Na pesquisa conduzida, observou-se um aumento significativo de aproximadamente 4 °C na temperatura para o ambiente 7. Neste contexto, destaca-se que, paradoxalmente, esse cenário de aumento térmico substancial também registrou um dos menores incrementos na precipitação, totalizando apenas cerca de 9,45% em comparação com o cenário de referência. Essa constatação indica uma resposta não linear da precipitação diante do aumento de temperatura, sublinhando as complexas interações climáticas em questão.

Na mesma conjuntura de elevação térmica de quase 4 °C, foram identificados padrões notáveis nas evapotranspirações. A despeito das condições de temperatura mais elevada e precipitação reduzida, a evapotranspiração real apresentou um crescimento modesto de aproximadamente 2,89%. Contrariamente, a evapotranspiração potencial demonstrou um aumento mais expressivo. Esse incremento na evapotranspiração potencial, mesmo em situações de escassez de água, enfatiza a influência direta da temperatura no processo de evaporação.

Tabela 5 - Alteração das evapotranspirações potenciais e reais entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico de referência

Cenário	Evapotranspiração Potencial	Evapotranspiração Real
1	+2,30%	+5,97%
2	+3,86%	+7,53%
3	+5,25%	+7,43%
4	+6,38%	+8,40%
5	+8,19%	+5,90%
6	+9,80%	+2,49%
7	+11,73%	+2,89%

A relação entre aumento da chuva, mesmo que moderado, e evapotranspiração real, pode ser influenciada pela temperatura, entre outros fatores. Tradicionalmente, segundo Collischonn e Tucci (2014), espera-se que um aumento na chuva leve a uma diminuição na evapotranspiração real, pois a presença de mais água disponível na superfície do solo reduz a necessidade de retirada água através da evaporação e transpiração das plantas. No entanto, a temperatura desempenha um papel crucial nesse processo e pode gerar variações significativas.

A temperatura afeta a evaporação diretamente, sendo um fator-chave na taxa com que a água se transforma de líquido para vapor. Em contextos onde há aumento da temperatura, a evaporação tende a aumentar, mesmo em ambientes mais úmidos. Além disso, a temperatura influencia a transpiração das plantas, pois afeta os processos metabólicos e a demanda atmosférica por água.

Em um cenário em que há aumento de chuvas e, ao mesmo tempo, aumento de temperatura, o efeito combinado desses fatores pode resultar em um aumento líquido na evapotranspiração real. O aumento da chuva pode fornecer mais água à superfície do solo,

mas a elevação da temperatura pode acelerar a evaporação dessa água e aumentar a demanda hídrica das plantas, levando a um balanço positivo na evapotranspiração real.

Em relação às taxas de perda percentual da precipitação por evapotranspiração, observa-se que em comparação ao cenário atual, houveram baixas variações nos cenários projetados (Tabela 6). A redução nas perdas de precipitação por evapotranspiração, apesar do aumento percentual nas evapotranspirações nos cenários projetados, pode ser explicada por uma série de interações entre os parâmetros climáticos.

Em cenários de aumento de temperatura, a evaporação direta da água da superfície do solo pode aumentar substancialmente. A elevação da temperatura impulsiona a taxa de evaporação, resultando em uma maior fração da precipitação sendo perdida para a atmosfera. No entanto, a relação entre evapotranspiração e perda de precipitação também depende da disponibilidade de água no solo e da resposta das plantas às condições climáticas.

Tabela 6 - Perda percentual da precipitação por evapotranspiração real em cada cenário

Cenário	Perda da precipitação por evapotranspiração real
Referência	56,7%
1	53,1%
2	52,5%
3	52,7%
4	51,4%
5	51,5%
6	53,6%
7	53,3%

Nos 7 contextos analisados, mesmo havendo um aumento nas evapotranspirações, pode haver, em paralelo, uma melhoria na eficiência do uso da água. Isso pode ocorrer se as plantas conseguirem extrair mais água do solo para sustentar o aumento nas demandas hídricas, reduzindo assim as perdas por escoamento superficial ou evaporação não aproveitada.

Além disso, se nas simulações, o aumento da chuva tende a ser mais eficaz em recarregar o solo e manter a umidade disponível para as plantas, mesmo com um aumento na evapotranspiração, as perdas de precipitação por escoamento superficial podem diminuir.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 7, observa-se um aumento consistente nos índices de percolação, escoamento lateral, fluxo de base e escoamento superficial nos cenários de aplicação de oscilações climáticas em comparação com o cenário de referência do balanço hídrico atual. Essas alterações nos fluxos hidrológicos têm implicações significativas para a bacia hidrográfica, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica e a hidrologia regional.

A percolação, que pode ser compreendida como a movimentação descendente da água no solo em direção aos lençóis freáticos, apresentou aumentos percentuais em todos os cenários simulados, variando de 17,53% a 35,61%. Este aumento pode indicar uma maior infiltração de água no solo, contribuindo para a recarga dos aquíferos subterrâneos. Em consonância a isso, o escoamento lateral, que representa a água que flui horizontalmente na superfície do solo em direção aos cursos d'água, também registrou aumentos consistentes, variando de 6,72% a 20,61%. Isso sugere uma maior contribuição para os fluxos superficiais na bacia, o que pode afetar a quantidade de água disponível para uso.

O aumento do fluxo de base, que assume a contribuição constante de água para os rios a partir dos aquíferos subterrâneos, foi significativo, variando de 19,23% a 42,83%. Esse aumento pode indicar uma resposta direta ao incremento na percolação, contribuindo para a manutenção dos caudais dos rios em períodos secos. Ainda nesse contexto, o escoamento superficial, configurando-se como o volume de água que flui diretamente na superfície do solo em direção aos corpos d'água, também experimentou aumentos consideráveis, variando de 23,17% a 44,53%. Esse aumento pode ter implicações na erosão do solo e na qualidade da água nos cursos d'água.

É essencial ressaltar que a presença de aquíferos não se limita apenas à Mata Pernambucana e à Região Metropolitana do Recife; o Agreste de Pernambuco também é caracterizado pela ocorrência dessas formações geológicas subterrâneas com a capacidade de armazenar e transmitir água. De acordo com Borba *et al.* (2017), a Mesorregião do Agreste de Pernambuco é predominantemente caracterizada por aquíferos fissurais ou fraturados originados de rochas cristalinas (ígneas e metamórficas), com a presença em menor proporção de aquíferos aluvionares provenientes de depósitos sedimentares nas várzeas de rios e lagos, além de surgências, descargas naturais de água capazes de fluir em pequenos cursos.

É relevante salientar, no entanto, que a maioria desses componentes subterrâneos no Agreste consiste em aquíferos sazonais, ou seja, sua recarga ocorre principalmente

durante períodos de chuva, enfrentando uma significativa diminuição nos níveis de água durante estiagens. Dessa forma, as estimativas de fluxo de base nos balanços hídricos, apesar de também receberem influência dos aquíferos existentes nessa Mesorregião, são atribuídas principalmente aos presentes na Mata Pernambucana e Região Metropolitana do Recife.

Tabela 7 - Aumentos percentuais de percolação, escoamento lateral, fluxo de base e escoamento superficial entre cenários com aplicação de oscilações climáticas e o balanço hídrico atual

Cenário	Aumento da Percolação	Aumento do Escoamento Lateral	Aumento do Fluxo de Base	Aumento do Escoamento Superficial
1	23,66%	14,61%	28,84%	28,30%
2	28,59%	17,76%	34,63%	34,99%
3	27,44%	16,82%	32,78%	34,27%
4	35,61%	20,61%	42,83%	44,53%
5	33,12%	16,50%	39,21%	41,36%
6	17,53%	6,72%	19,23%	23,17%
7	19,87%	7,71%	21,61%	26,26%

Essas alterações nos padrões hidrológicos podem ter impactos na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica, afetando a quantidade e a distribuição temporal da água disponível. É essencial considerar esses resultados ao planejar a gestão sustentável dos recursos hídricos na região, considerando os desafios potenciais associados às mudanças climáticas e seus efeitos na hidrologia local.

CAPÍTULO VI



6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise aprofundada do balanço hídrico na Bacia do Rio Capibaribe ofereceu uma visão detalhada dos padrões hidrológicos presentes na região e das potenciais implicações das mudanças climáticas. Ao explorar minuciosamente os dados coletados, torna-se evidente que nos cenários atuais a bacia já enfrenta desafios significativos, com uma parcela notável da chuva perdida por evapotranspiração, apontando para uma vulnerabilidade na retenção e armazenamento da água precipitada.

A influência das oscilações climáticas nos cenários futuros destaca a complexidade das interações entre temperatura, precipitação e seus efeitos no balanço hídrico. Os resultados das simulações revelam aumentos nas taxas de evapotranspiração potencial e real, sinalizando mudanças significativas nos ciclos hidrológicos. Surpreendentemente, o aumento da temperatura demonstrou um crescimento modesto na evapotranspiração real, enquanto a evapotranspiração potencial apresentou um incremento mais expressivo.

A análise das perdas percentuais de precipitação por evapotranspiração revela um fenômeno intrigante: mesmo com o aumento das evapotranspirações, as perdas de precipitação diminuíram nos cenários projetados. Essa descoberta complexa destaca a necessidade de uma compreensão abrangente das interações entre temperatura, chuva, eficiência do uso da água pelas plantas e disponibilidade de água no solo para interpretar adequadamente as mudanças nos padrões hidrológicos futuros.

No contexto dos sete cenários analisados, é possível identificar que o cenário 4 (década 2060-2069) se destaca como o mais crítico. Este cenário apresenta o maior crescimento percentual na evapotranspiração real, atingindo 8,40%, indicando uma tendência preocupante para o aumento da demanda atmosférica por água. Esse aumento significativo é um alerta para a necessidade de estratégias específicas de adaptação nos próximos anos.

Alterações no comportamento hidrológico, isto é, a interação entre diferentes parâmetros, como chuva, evapotranspiração, temperatura, entre outros, é um dos principais efeitos esperados quando se considera a ocorrência de agravamento das mudanças climáticas, tanto a nível global quanto a nível regional. Sendo assim, assume-se a necessidade de direcionamento de políticas publicadas voltadas para a gestão integrada de recursos hídricos na Bacia do Rio Capibaribe, a fim de minimizar esses impactos e assegurar o acesso à água, mesmo em condições climaticamente desafiadoras.

6.1. Recomendações para estudos futuros

Neste estudo, a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Capibaribe foi conduzida sem a possibilidade de incorporar diretamente o banco de dados das projeções do CORDEX na interface do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer), que atualmente conta apenas com dois bancos de dados pré-carregados. Essa limitação originou-se da dependência exclusiva da equipe de desenvolvedores para a inserção de dados no referido sistema.

Destaca-se que foram estabelecidos contatos com dois dos pesquisadores que desenvolveram o SUPer, o que resultou ainda no preparo e formatação do banco de dados para o horizonte temporal 2030-2099, contendo projeções futuras de precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, seguindo as diretrizes estabelecidas e suportadas pelo sistema.

Apesar do envio deste banco de dados aos desenvolvedores mencionados, sua introdução no SUPer não se concretizou, sendo este impasse atribuído às limitações relacionadas ao prazo de conclusão desta dissertação, que demandou uma finalização dentro de um cronograma específico. Além disso, a disponibilidade de agenda dos referidos pesquisadores apresentou-se como um desafio adicional, dado o caráter demandante de suas agendas profissionais. Frente a esse desafio, optou-se por uma abordagem indireta, utilizando as estatísticas das projeções climáticas por meio da ferramenta de análises de sensibilidade e variabilidade climática, conforme foi detalhado ao longo deste trabalho.

Diante da mencionada dependência operacional do SUPer, sugere-se a realização de novos estudos que possam, desta vez, superar essa limitação, introduzindo diretamente as projeções climáticas no acervo de dados, permitindo uma compreensão mais holística dos processos hidrológicos, visando uma análise mais precisa e contextualizada dos cenários futuros.

Recomenda-se que esses estudos futuros realizem uma comparação direta com os resultados obtidos nesta pesquisa. A inclusão de dados mais abrangentes na interface do SUPer pode influenciar significativamente as projeções sobre os efeitos das mudanças climáticas na Bacia do Rio Capibaribe. Portanto, uma análise comparativa permitirá avaliar a consistência e a robustez dos resultados, proporcionando resultados valiosos para pesquisas subsequentes.

Além da inclusão de novos parâmetros, enfatiza-se a importância de conduzir análises de sensibilidade mais detalhadas. Compreender como diferentes variáveis climáticas impactam a resposta hidrológica na bacia pode aprimorar a precisão das projeções e fornecer informações cruciais para a adaptação de estratégias de gestão hídrica diante das mudanças climáticas.

Dada a limitação operacional identificada no SUPeR, sugere-se ainda a exploração de ferramentas alternativas ou complementares que possam oferecer flexibilidade na introdução de dados climáticos. Isso pode envolver o uso de sistemas mais dinâmicos e ainda mais acessíveis, permitindo uma participação mais ativa dos pesquisadores no processo de alimentação de dados e, conseqüentemente, uma abordagem mais adaptável às demandas específicas de cada estudo.

Essas recomendações visam não apenas superar desafios operacionais identificados, mas também aprimorar a robustez, a acurácia e a aplicabilidade das análises conduzidas no contexto das mudanças climáticas na Bacia do Rio Capibaribe. Ao seguir essas sugestões, pesquisadores interessados estarão melhor posicionados para contribuir significativamente para o entendimento desses processos complexos e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão hídrica na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERS, R. N.; KECK, M. E. **Autoridade prática: ação criativa e mudança institucional na política das águas do Brasil.** In: *Autoridade prática: ação criativa e mudança institucional na política das águas do Brasil*, p.334-351, 2017.

ABRUCIO, F. L.; OLIVEIRA, V. E. **Governança do Sistema Nacional de Recursos Hídricos: a visão dos atores. Campo de Pública em ação coletânea em teoria e gestão de políticas públicas.** 1ed. Rio Grande do Sul: UFRGS Editora, v.1, p.158-171, 2017.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – CPRH. **Relatório de monitoramento de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco.** Recife: CPRH, 200p, 2019.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC. **Bacias Hidrográficas s.** Disponível em: <<http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas>>. Acesso em setembro de 2022.

ALPINO, T. M. A.; MAZOTO, M. L.; BARROS, D. C. de; FREITAS, C. M. de. **Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: Uma revisão da literatura.** *Ciência & Saúde Coletiva*, v.27, n.1, p.273-286, 2022.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. R. S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. **Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT.** *Ecohydrology & Hydrobiology*, v.19, n.2, p.238-251, 2019.

ARAÚJO, R. F. de; MATRICARDI, E. A. T.; NAPPO, M. E. **Zoneamento ecológico de pequena escala para espécies florestais tradicionais no Distrito Federal.** *Floresta*, v.42, n.2, p.421-430, 2012.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A. VAN; VANLIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. **Swat: model use, calibration, and validation.** *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v.55, p.1491–1508, 2012.

ARTAXO, P. **As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas.** *Estudos Avançados*, v.34, n.100, p.53-66, 2020.

BÁRDOSSY, A.; KILSBY, C.; BIRKINSHAW, S.; WANG, N.; ANWAR, F. **Is precipitation responsible for the most hydrological model uncertainty?** *Frontiers in Water*, v.4, p.1-17, 2022.

BATES, B. C.; KUNDZEWICZ, Z. W.; WU, S.; PALUTIKOF, J. P. **Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** IPCC Secretariat, Geneva, 210pp, 2008.

BHATTA, B.; SHRESTHA, S.; SHRESTHA, P. K.; TALCHABHADEL, R. **Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin.** *Catena*, v.181, p-1-13, 2019.

BIANCAMARIA, S.; FRAPPART, F.; LELEU, A.-S.; MARIEU, V.; BLUMSTEIN, D.; DESJONQUÈRES, J.-D.; BOY, F.; SOTTOLICHIO, A.; VALLE-LEVINSON, A. **Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200m wide river: evaluation over the Garonne River.** *Advances in Space Research*, v.59, p.128–146, 2017.

BORBA, A. L. S.; COSTA, M. R. da; LIMA, E. de A. M.; TORRES, F. S. de M. **Diagnóstico das Condições Explotáveis de uma Porção do Agreste de Pernambuco a partir do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.** In: XXII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis – SC, p.1-8, 2017.

BORMANN, H.; BREUER, L.; GRÄFF, T.; HUISMAN, J. A. **Analyzing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis.** *Ecological Modelling*, v.209, p.29-40, 2007.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W.; SIQUEIRA, V. A.; BRAVO, J. M. **Efeito das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos da América Do Sul.** In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu – PR, p.1-2, 2019.

BRESSIANI, D. de A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. **Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil.** *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.8, n.3, p.1-16, 2015.

BRITO, A. D.; LOPES, J. C.; NETA, M. M. S. dos A. **Tripé da Governança: Poder Público, Setor Privado e a Sociedade Civil em Busca de uma Gestão Integrada dos**

Recursos Hídricos. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.8, n.4, p.506-522, 2019.

BRITO, T. R. C.; LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, C. L.; SOUZA, R. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; MEDEIROS, E. V.; SOUZA, E. S.; ALVES, E. M. **Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.13, p.870-886, 2020.

CARLOS, S. M.; CUNHA, D. A. da; PIRES, M. V. **Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro.** Revista de Economia e Sociologia Rural, v.57, n.3, p.455-471, 2019.

CHEN, X.; WANG, L.; NIU, Z.; ZHANG, M.; LI, C.; LI, J. **The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China.** Agricultural and Forest Meteorology, p.1-14, 2020.

CHEUNG, W. H.; SENAY, G. B.; SINGH, A. **Trends and spatial distribution of annual and seasonal rainfall in Ethiopia.** International Journal of Climatology, v.28, n.13, p.1723-1734, 2008.

CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido.** Estudos Avançados, v.22, n.63, p.61-82, 2008.

CLARK, M. P.; WILBY, R. L.; GUTMANN, E. D.; VANO, J. A.; GANGOPADHYAY, S.; WOOD, A. W.; FOWLER, H. J.; PRUDHOMME, C.; ARNOLD, J. R.; BREKKE, L. D. **Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change.** Current Climate Change Reports, v.5, p.18–36, 2016.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. E. M. **Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, n.3, p.205-214, 2014.

CORTINAS, J. **Las condiciones sociales de las políticas medioambientales: la gestión de la crisis hídrica en el sur de California.** Región y sociedad, v.31, p.21-33, 2019.

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. **Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture.** Environment and Development Economics, v.20, n.1, p.57-79, 2015.

DAGGUPATI, P.; PAI, N.; ALE, S.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; ZECKOSKI, R. W.; JEONG, J.; PARAJULI, P. B.; SARASWAT, D.; YOUSSEF, M. A. **A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and water quality models.** Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, v.58, p.1705–1719, 2015.

DI BALDASSARRE, G.; ELSHAMY, M.; VAN GRIENSVEN, A.; SOLIMAN, E.; KIGOBE, M.; NDOMBA, P.; MUTEI, J.; MUTUA, F.; MOGES, S.; XUAN, Y.; SOLOMATINE, D.; UHLENBROOK, S. **Future hydrology and climate in the river Nile basin: a review.** Hydrological Sciences Journal, v.56, p.199–211, 2011.

DIAS, E. M. S. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: Percepções sobre Riscos Climáticos e Capacidade Adaptativa na Região Semiárida do Rio Grande do Norte, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 137p, 2020.

DUPASA, R.; DELMASC, M.; DORIOZD, J. M.; GARNIERE, J.; MOATARF, F.; GASCUEL-ODOUXA, C. **Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk.** Ecological Indicators, v.48, p.396-407, 2015.

ECKHARDT, R. R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado/RS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 117p, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Solos Tropicais.** Brasília, 2021.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. **Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa.** Journal of Hydrology, v.480, p.85-101, 2013.

FARIAS, C. W. L. de A.; MIRANDA, R. de Q.; VIANA, J. F. de S.; LINS, F. A. C.; GALVÍNCIO, J. D. **Calibrações Parciais do Modelo SWAT como Suporte ao Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco.** Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ed.10, 2020.

FARIAS, C. W. L. de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LINS, F. C. A.; MONTENEGRO, A. A. de A. **Correção de tendência das projeções climáticas futuras simuladas pelo modelo regional Eta-Hadgem2-Es para a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v.5, n.3, p.288-301, 2020.

FARIAS, C.; MIRANDA, R.; VIANA, J.; LINS, F.; PEREIRA, J. A.; URSULINO, B.; MONTENEGRO, S.; GALVÍNCIO, J.; MONTENEGRO, A.; SRINIVASAN, R. **Calibration of SWAT model in the Pernambuco state watersheds to support the SUPer system.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.6, p.3572-3592, 2023.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CRUZ, C. D. **On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil.** Pure and Applied Geophysics, v.173, p.1403–1421. 2016.

FERNANDES, T.; HACON, S. de S.; NOVAIS, J. W. Z. **Mudanças Climáticas, Poluição do Ar e Repercussões na Saúde Humana: Revisão Sistemática.** Revista Brasileira de Climatologia, v.28, p.138–164, 2021.

FLEURY, L. C.; MIGUEL, J. C. H.; TADDEI, R. **Mudanças climáticas, ciência e sociedade.** Sociologias, v.21, n.51, p.18-42, 2019.

GALVÍNCIO, J. D. **Impacto do aumento de CO₂ nas Precipitações do estado de Pernambuco.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.14, p.1828-1839, 2021.

GARCIA, L. G.; FRANZOZI, A. A. **Modelagem hidrológica e sua relação com o SIG.** Laboratório de Hidrologia Florestal, Universidade de São Paulo, p.1-40, 2017.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A. de; CECÍLIO, R. A. **Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES).** Ambiência, v.8, n.1, p.61-71, 2012.

GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. **Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa.** Transactions of the ASABE, v.49, p.413-422, 2006.

HIGUERA-CASTRO, E. L. **Avaliação dos impactos das Mudanças Climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem**

hidrológica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 123p, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **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.** Geneva, Switzerland, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report.** Geneva, Switzerland, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6).** Geneva, Switzerland, 2023.

JALBERT, J.; MATHEVET, T.; FAVRE, A.-C. **Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis.** Journal of Hydrology, v.397, n.1–2, p.83–92, 2011.

JODAR-ABELLAN, A.; RUIZ, M.; MELGAREJO, J. **Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.35, n.3, p.1-14, 2018.

JOSEPH, J. F.; GUILLAUME, J. H. A. **Using a parallelized MCMC algorithm in R to identify appropriate likelihood functions for SWAT.** Environmental Modelling & Software, v.46, p.292–298, 2013.

KABIR, T.; POKHREL, Y.; FELFELANI, F. **On the precipitation-induced uncertainties in process-based hydrological modeling in the Mekong River Basin.** Water Resources Research, v.58, n.2, p.1-12, 2022.

KARKI, R.; HASSON, S.; SCHICKHOFF, U.; SCHOLTEN, T.; BÖHNER, J. **Rising precipitation extremes across Nepal.** Climate, v.5, n.1, p.1-14, 2017.

KHATIWADA, K.; PANTHI, J.; SHRESTHA, M.; NEPAL, S. **Hydro-climatic variability in the Karnali River basin of Nepal Himalaya.** Climate, v.4, n.2, p.1-17, 2016.

KHOI, D. N.; THOM, V. T. **Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam.** Global Ecology and Conservation, v.4, p.538–548, 2015.

KRAMER, A.; PAHL-WOSTL, C. **The global policy network behind integrated water resources management: Is it an effective norm diffusor?** Ecology and Society, v.19, n.4, p.1-24, 2014.

LIRA, C. S.; PIMENTEL G.; SANTOS, E. M. dos. **Unidades de conservação na bacia do Capibaribe: quem faz educação ambiental.** In: Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão, XIII. 2013, Recife, Garanhuns, Serra Talhada. Anais... Recife: UFRPE, 2013.

LIU, S.; WILLIAMS, J. R.; ZHAN, X.; WANG, X. **Use of climate model data to simulate the impacts of climate change on hydrology and water quality in the southeastern United States.** Journal of the American Water Resources Association, v.53, n.6, p.1351-1366, 2017.

LOUZADA, V. M.; RIBEIRO, C. B. M. **Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow.** Revista Ambiente & Água, v.14, 2303, 2019.

LY, S.; CHARLES, C.; DEGRÉ, A. **Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review.** Biotechnology, Agronomy and Society and Environment, v.17, n.2, p.392-406, 2013.

LYRA, A. **Projeções de mudanças climáticas sobre São Paulo e a plataforma PROJETA.** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São Paulo – SP, p.1-28, 2018.

LYRA, M. J. A.; CAVALCANTE, L. C. V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. **Ligação Entre Extremidade Frontal e Zona de Convergência Intertropical Sobre a Região Nordeste do Brasil.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v.42, p.413-424, 2019.

MACHADO, P. A. L. **Falta de água e soluções jurídicas.** Revista Jurídica ESMP-SP, v.7, p.295-298, 2015.

MARCUSSI, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. C. **Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos-SP.** In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba – PR, 2006. Anais do I

Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Porto Alegre - RS : ABRH, v.1. p.21, 2006.

MARENGO, J. A. (COORD.); NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia.** Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido, 2011.

MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas.** Estudos Avançados, v.22, n.63, p.83-96, 2008.

MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., ALVES, L. M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico.** Revista Climanaálise, v.3, p.49-54, 2016.

MARENGO, J.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L.; NOBRE, C.; PISNITCHENKO, I. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade. Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI.** Atlas de Cenários Climáticos Futuros para o Brasil (Versão 1.0), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Cachoeira Paulista – SP, p.1-124, 2007.

MARTÍNEZ, C. M. G.; LÓPEZ, E. J. G.; CHAMORRO, FR. R. M. **Estado del arte de modelos hidrológicos.** Boletín Informativo CEI, v.5, n.2, p.116-119, 2018.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F. dos; REBOITA, M. S. **Classificação Climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário Atual e Projeções Futuras.** Revista Brasileira de Climatologia, ed. esp., p.129-156, 2018.

MARTINS, L. L.; MARTINS, W. A.; MORAES, J. F. L. de; PEDRO JÚNIOR, M. J.; DE MARIA, I. C. **Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.13, n.2, p.576-594, 2020.

MCCARTNEY, M. P.; GIRMA, M. M. **Evaluating the downstream implications of planned water resource development in the Ethiopian portion of the Blue Nile River.** Water International, v.37, p.362–379, 2012.

MENGISTU, D.; BEWKET, W.; DOSIO, A.; PANITZ, H-J. **Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia.** Journal of Hydrology, v.592, p.1-13, 2021.

MILLINGTON, N. **Producing water scarcity in São Paulo, Brazil: The 2014-2015 water crisis and the binding politics of infrastructure.** Political Geography, v.65, p.26-34, 2018.

MIRANDA, P. T.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W.; FAGUNDES, H. O.; RIBEIRO, L. de C.; ROSSI, J. B.; NETO, A. K.; RIOS, G. M. **Falta de Sensibilidade a Extremos na Modelagem Hidrológica.** In: III Encontro de Desastres, Niterói – RJ, p.1-4, 2023.

MIRANDA, R. D. Q. **Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na Caatinga utilizando o modelo hidrológico SWAT.** Tese (Doutorado e Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 122p, 2017.

MORAIS, L. P. R. de; ARAÚJO, J. M. de; SILVEIRA, S. de F. R.; FERREIRA, M. A. M. **Gestão Integrada de Recursos Hídricos: Efeitos da Governança Local na Segurança Hídrica dos Municípios Brasileiros.** In: IX Encontro Brasileiro de Administração Pública, São Paulo – SP, p.1-16, 2022.

MOUTAHIR, H.; BELLOT, P.; MONJO, R.; BELLOT-ABAD, J. F.; GARCIA, M.; TOUHAMI, I. **Likely effects of climate change on groundwater availability in a Mediterranean region of Southeastern Spain.** Hydrological Processes, v.31, n.1, p.161-176, 2017.

NANGOMBE, S.; FARAMARZI, M.; BEEVERS, L. **Assessing the impacts of climate change on water resources using SWAT: A review.** Science of The Total Environment, p.724-737, 2020.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **Climate Change: Vital Signs of the Planet.** Washington D.C., United States of America, 2021. Available at <https://climate.nasa.gov/>. Accessed June 2023.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil.** Revista de Geografía Norte Grande, V.63, p.9-26, 2016.

OO, H. T.; ZIN, W. W.; KYI, C. C. T. **Analysis of Streamflow Response to Changing Climate Conditions Using SWAT Model.** Civil Engineering Journal, v.6, n.2, p.194-209, 2020.

ORKE, Y. A.; LI, M.-H. **Hydroclimatic Variability in the Bilate Watershed, Ethiopia.** Climate, v.9, n.6, p.1-22, 2021.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 184p, 2016.

PANDAY, P. K.; WILLIAMS, C. A.; FREY, K. E.; BROWN, M. E. **Application and evaluation of a snowmelt runoff model in the Tamor River basin, Eastern Himalaya using a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) data assimilation approach.** Hydrological Processes, v.28, p.5337–5353, 2014.

PASSOS, F. O.; SILVA, B. C. da; SILVA, F. das G. B. da. **Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Utilizando o Modelo SWAT.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.14, n.2, p.619-633, 2021.

PERNAMBUCO. **Climatologia das estações experimentais do IPA.** Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA, Recife – PE, p.137, 1994.

PINHEIRO, N. V. **Modelagem Hidrológica e o Pagamento por Serviços Ambientais no Processo Decisório para a Conservação De Bacias Hidrográficas.** Tese (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 144p, 2023.

PIRES, M. V.; CUNHA, D. A. **Climate change and adaptive strategies in Brazil: the economic effects of genetic breeding.** Revista de Economia e Sociologia Rural, v.52, n.4, p.627-642, 2014.

POLLACHI, A. **Gestão Integrada e Adaptativa da Água: A Governança da Bacia do Alto Tietê em Face da Escassez Hídrica.** Revista Cadernos de Campo, v.1, n.31, p.43-69, 2021.

PUGA, B. P. **Governança dos Recursos Hídricos e Eventos Climáticos Extremos: A Crise Hídrica de São Paulo.** Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico), Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 210p, 2018.

RAFIEI EMAM, A.; KAPPAS, M.; FASSNACHT, S.; LINH, N. H. K. **Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms.** *Frontiers of Earth Science*, v.12, n4, p.661-671, 2018.

RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. **Impact of Climate Change on Water Resources with Modeling Techniques and Case Studies.** [S. I.]: Springer Climate, v.29, 2018.

REFSGAARD, J. C. **Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes.** In: Abbott M. B. & Refsgaard J. C., eds. *Distributed hydrological modelling*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p.17-39, 1996.

RIBEIRO, L. G. G.; ROLIM, N. D. **Planeta água de quem e para quem: uma análise da água doce como direito fundamental e sua valoração mercadológica.** *Revista Direito Ambiental e sociedade*, v.7, n.1, p.7-33, 2017.

RIMMER, A.; GIVATI, A.; SAMUELS, R.; ALPERT, P. **Using ensemble of climate models to evaluate future water and solutes budgets in Lake Kinneret, Israel.** *Journal of Hydrology*, v.410, n.3-4, p.248-259, 2011.

ROCHA, J.; SANTOS, C. C.; DIOGO, P.; BEÇA, P.; KEIZER, J. J.; NUNES, J. P. **Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal).** *Science of the Total Environment*, v.736, 139477, 2020.

ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. **Relação entre fósforo total e vazão afluyente nos principais reservatórios rurais do Estado do Ceará no semiárido brasileiro.** *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.13, n.3, p.715-730, 2020.

RODERICK, T. P.; WASKO, C.; SHARMA, A. **Atmospheric moisture measurements explain increases in tropical rainfall extremes.** *Geophysical Research Letters*, v.46, n.3, p.1375–1382, 2019.

RUELLAND, D.; ARDOIN-BARDIN, S.; BILLEN, G.; SERVAT, E. **Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa.** Journal of Hydrology, v.361, n.1-2, p.96-117, 2008.

SALES, D. C.; COSTA, A. A.; SILVA, E. M.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; MARIN, A. M. P.; GUIMARÃES, S. O.; ARAUJO JUNIOR, L. M.; PEREIRA, J. M. R. **Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.30, n.4, p.435-456, 2015.

SALMI, F.; FLEURY, L. C. **Mudanças climáticas e Ciências Sociais: análise bibliométrica do campo (2011-2021).** Revista Brasileira de Informação Bibliográfica em Ciências Sociais, p.1-19, 2022.

SCHEMBERGUE, A.; CUNHA, D. A.; CARLOS, S. M.; PIRES, M. V.; FARIA, R. M. **Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil.** Revista de Economia e Sociologia Rural, v.55, n.1, p.9-30, 2017.

SCHREINER-MCGRAW, A. P.; AJAMI, H. **Combined impacts of uncertainty in precipitation and air temperature on simulated mountain system recharge from an integrated hydrologic model.** Hydrology and Earth System Sciences, v.26, n.4, p.1145–1164, 2022.

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE - SECTMA. **Diagnóstico dos recursos hídricos da bacia do rio Goiana e dos grupos de bacias de pequenos rios litorâneos GL-1 e GL-6.** Recife - PE, 2003.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.** Recife, 936p, 2010.

SENRA, J. B.; NASCIMENTO, N. O. **Após 20 anos da lei das águas como anda a Gestão Integrada de Recursos Hídricos do Brasil, no âmbito das Políticas e Planos Nacionais setoriais?** Revista de Gestão de Água da América Latina, v.14, e.6, p.1-19, 2017.

SERRÃO, E. A. de O.; SILVA, M. T.; SOUSA, F. de A. S. de; ATAIDE, L. C. P. de; SANTOS, C. A. dos; SILVA, V. de P. R. da; SILVA, B. K. da N. **Influência do uso e cobertura da terra na variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração no sudeste da Amazônia, utilizando o modelo SWAT.** Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.4, p.134-148, 2019.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Disponibilidade Hídrica do Brasil: Estudos de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: Regionalização da Q95% na sub-bacia 39.** Recife: CPRM, 2011.

SHEIL, D. **Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle.** Forest Ecosystems, v.5, n.19, p.1-14, 2018.

SHIVHARE, N.; DIKSHIT, P. K. S.; DWIVEDI, S. B. **A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed.** Engineering, v.4, p.643-652, 2018.

SHRESTHA, K. N.; DU, X.; WANG, J. **Assessing climate change impacts on freshwater resources of the Athabasca River Basin. Canada.** Science of the Total Environment, v.601, n.602, p.425–440, 2017.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. **Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos.** Revisão Brasileira de Recursos Hídricos, v.11, n.4, p.15-29, 2006.

SILVA, M. B.; HERREROS, M. M. A. G.; BORGES, F. Q. **Gestão integrada dos recursos hídricos como política de gerenciamento das águas no Brasil.** Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria, v.10, n.1, p.101-115, 2017.

SINGH, V. P. **Watershed modeling.** In: Singh V. P., ed. Computer models of watershed hydrology. Colorado, USA: Water Resources Publications, p.1-22, 1995.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. **Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America.** Hydrology and Earth System Sciences, v.22, p.4815–4842, 2018.

SOBRAL, M. do C.; ASSIS, J. M. O. de; OLIVEIRA, C. R. de; SILVA, G. M. N. da; MORAIS, M.; CARVALHO, R. M. C. **Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos**

Hídricos no Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – Brasil. Revista Eletrônica do PRODEMA, v.12, n.3, p.95-106, 2018.

SØRLAND, S. L.; BROGLI, R.; POTHAPAKULA, P. K.; RUSSO, E.; VAN DE WALLE, J.; AHRENS, B.; ANDERS, I.; BUCCHIGNANI, E.; DAVIN, E. L.; DEMORY, M.-E.; DOSIO, A.; FELDMANN, H.; FRÜH, B.; GEYER, B.; KEULER, K.; LEE, D.; LI, D.; VAN LIPZIG, N. P. M.; MIN, S.-K.; PANITZ, H.-J.; ROCKEL, B.; SCHÄR, C.; STEGER, C.; THIERY, W. **COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review.** Geoscientific Model Development, v.14, p.5125–5154, 2021.

SOUSA, R. M. de; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES, M. V. G.; AVANZI, J. C. **Projeções Climáticas Regionalizadas para o Estado do Tocantins, Brasil, nos Cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.** Revista Brasileira de Climatologia, v.24, p.330-347, 2019.

SOUSA, W. S.; VIANA, J. F. S.; SILVA, R. R. da; IRMÃO, R. A. **Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v.3, n.1, p.146-154, 2018.

STACKELBERG, N. O. V.; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. **Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay.** Transactions of the ASABE, v.50, n.3, p.455-468, 2007.

SUEKAME, H. K.; COMMAR, L. F. S.; GONÇALVES, F. V.; CARVALHO, G. A.; PEREIRA, R. B. **Modelagem Hidrológica Combinado à Mudança Climática, Uso e Ocupação do Solo.** Anuário do Instituto de Geociências, v.44, p.1-16, 2021.

TABARI, H. **Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability.** Scientific Reports, v.10, p.1-10, 2020.

TANG, G.; CLARK, M. P.; KNOBEN, W. J. M.; LIU, H.; GHARARI, S.; ARNAL, L.; BECK, H. E.; WOOD, A. W.; NEWMAN, A. J.; PAPALEXIOU, S. M. **The Impact of Meteorological Forcing Uncertainty on Hydrological Modeling: A Global Analysis of Cryosphere Basins.** Water Resources Research, v.59, p.1-31, 2023.

TANG, T.; STROKAL, M.; VAN VLIET, M. T. H.; SEUNTJENS, P.; BUREK, P.; KROEZE, C.; LANGAN, S.; WADA, Y. **Bridging global, basin and local-scale water quality modeling towards enhancing water quality management worldwide.** Current Opinion in Environmental Sustainability, v.36, p.39-48, 2019.

TAVARES, V. C.; ARRUDA, I. R. P. de; SILVA, D. G. da. **Desertificação, Mudanças Climáticas e Secas no Semiárido Brasileiro: Uma revisão bibliográfica.** Geosul, v.34, n.70, p.385-405, 2019.

THIELEN-DEL POZO, J.; PAPPENBERGER, F.; SALAMON, P.; BOGNER, K.; BUREK, P.; de ROO, A. **The state of the art of flood forecasting – hydrological ensemble prediction systems.** In: 10th EMS Annual Meeting. pp. EMS2010-145, 2010.

TIBÚRCIO, I. M.; SILVEIRA, N. T.; SANTOS, T. O.; MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D. **Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer).** Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.3, p.1657-1670, 2023.

TOUHAMI, I.; CHIRINO, E.; ANDREU, J. M.; SÁNCHEZ, J. R.; MOUTAHIR, H.; BELLOT, J. **Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain.** Journal of Hydrology, v.527, p.619-629, 2015.

TROIN, M.; MARTEL, J.-L.; ARSENAULT, R.; BRISSETTE, F. **Large-sample study of uncertainty of hydrological model components over North America.** Journal of Hydrology, v.609, p.1-13, 2022.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e Evapotranspiração.** In: Hidrologia – Ciência e Aplicação. 2. ed.; 2. reimpr. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 943p, 2001.

URSULINO, B. e S.; FARIAS, V. E. M. de; SILVA, S. F. da; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Respostas da Vegetação à Dinâmica de Variáveis Hidroclimatológicas Utilizando Sensoriamento Remoto na Bacia do Rio Capibaribe-PE.** In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju – SE, p.1-9, 2023.

VAGHEFI, S. A.; MOUSAVI, S. J.; ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. **Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran.** Hydrological Processes, v.28, n.4, p.2018-2032, 2013.

VERÇOSA, L. F. de M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 115p, 2019.

VIANA, J. F. S.; MONTENEGRO, S. M. G.; SILVA, B. B. da; SILVA, R. M. da; SOUSA, W. S. **Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama - PE utilizando o modelo SWAT.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v.3, n.1, p.155-172, 2018.

WANG, S.; HUANG, G. H. **A multi-level Taguchi-factorial two-stage stochastic programming approach for characterization of parameter uncertainties and their interactions: an application to water resources management.** European Journal of Operational Research, v.240, p.572–581, 2015.

WELLEN, C.; ARHONDITSIS, G. B.; LONG, T.; BOYD, D. **Quantifying the uncertainty of nonpoint source attribution in distributed water quality models: a Bayesian assessment of SWAT's sediment export predictions.** Journal of Hydrology, v.519, p.3353–3368, 2014.

WONGCHUIG-CORREA, S.; PAIVA, R. C. D. de; BIANCAMARIA, S.; COLLISCHONN, W. **Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent observations and discharge estimations into uncertain global hydrological models.** Journal of Hydrology, v.590, p.1-19, 2020.

WU, H. J.; FAN, J. T. **Measurements of moisture transport within multi-layer clothing assemblies consisting of different types of batting: a factorial design analysis.** Textile Research Journal, v.78, p.988–995, 2008.

YOU, Q.; MIN, J.; ZHANG, W.; PEPIN, N.; KANG, S. **Comparison of multiple datasets with gridded precipitation observations over the Tibetan Plateau.** Climate Dynamics, v.45, n.3, p.791–806, 2015.

ZABALETA, A.; MEAURIO, M.; RUIZ, E.; ANTIGUEDAD, I. **Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain.** Journal of Environmental Quality, v.43, n.1, p.235-245, 2014.

ZÁKHIA, E. M. S.; ALVARENGA, L. A.; TOMASELLA, J.; MARTINS, M. A.; SANTOS, A. C. N.; MELO, P. A. **Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia**

Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Meteorologia, v.36, n.4, p.667-681, 2021.

ZANELLA, M. E. **Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do Semiárido Nordeste.** Caderno Prudentino de Geografia, v.esp, n.36, p.126-142, 2014.

ZHAN, Y.-J.; REN, G.-Y.; SHRESTHA, A. B.; RAJBHANDARI, R.; REN, Y.-Y.; SANJAY, J.; XU, Y.; SUN, X.-B.; YOU, Q.-L.; WANG, S. **Changes in extreme precipitation events over the Hindu Kush Himalayan region during 1961–2012.** Advances in Climate Change Research, v.8, n.3, p.166-175, 2017.

ZHANG, J.; LI, Y.; HUANG, G.; CHEN, X.; BAO, A. **Assessment of parameter uncertainty in hydrological model using a Markov-Chain-Monte-Carlo-based multilevel-factorial-analysis method.** Journal of Hydrology, v.538, p.471-486, 2016.