



Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade - PPGCS

Terêncio Lucano Fonseca e Silva

**Uso de dados interpolados de precipitação para modelagem hidrológica
com SWAT na bacia hidrológica do rio do Pardo.**

TEIXEIRA DE FREITAS - BA

2024

Terêncio Lucano Fonseca e Silva

**Uso de dados interpolados de precipitação para modelagem hidrológica
com SWAT na bacia hidrológica do rio do Pardo.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Sustentabilidade da Universidade Federal do Sul da Bahia, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Ciências e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Lopes da Silva

TEIXEIRA DE FREITAS - BA

2024

Catálogo na Publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB)
Sistema de Bibliotecas (SIBI)

S586u Silva, Terêncio Lucano Fonseca e, 1990-

Uso de dados interpolados de precipitação para modelagem hidrológica com SWAT na bacia hidrológica do Rio do Pardo / Terêncio Lucano Fonseca e Silva. – Teixeira de Freitas : UFSB, 2024. - 67f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Paulo Freire, Centro de Formação em Desenvolvimento Territorial, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade, 2024.

Orientador: Dr. João Batista Lopes da Silva.

1. Hidrologia – Métodos de simulação. 2. Pardo, Rio, Bacia (MG e BA). 3. Recursos naturais. I. Título. II. Silva, João Batista Lopes da.

CDD – 551.483

FOLHA DE APROVAÇÃO


TERÊNCIO LUCANO FONSECA E SILVA

USO DE DADOS INTERPOLADOS DE PRECIPITAÇÃO PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM SWAT NA BACIA HIDROLÓGICA DO RIO DO PARDO.


Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Sustentabilidade da Universidade Federal do Sul da Bahia, como parte das exigências para obtenção do título de mestre (a) em Ciências e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Lopes


Este trabalho foi submetido à avaliação e julgado aprovado em: 27 de maio 2024.

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA**
Data: 18/02/2025 14:03:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. André Quintão de Almeida
(UFS)

Documento assinado digitalmente
 **JHONES DA SILVA AMORIM**
Data: 18/02/2025 10:54:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jhones da Silva Amorim
(UFRN)

Documento assinado digitalmente
 **DANILO PAULUCIO DA SILVA**
Data: 18/02/2025 10:47:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Danilo Paulucio da Silva
(UESB)

Documento assinado digitalmente
 **JOAO BATISTA LOPES DA SILVA**
Data: 18/02/2025 10:40:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ORIENTADOR
Dr. João Batista Lopes da Silva
(UFSB)

TEIXEIRA DE FREITAS – BA

2024

FONSECA e SILVA, Terêncio Lucano. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pardo – BA/MG, utilizando o modelo hidrológico SWAT**. Orientador: João Batista Lopes da Silva. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Teixeira de Freitas, 2024.

RESUMO

A simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pardo (BHRP) por meio do modelo hidrológico SWAT ofereceu uma alternativa viável para analisar a hidrologia na região. Este estudo teve como objetivo empregar o modelo SWAT para conduzir simulações hidrológicas do rio Pardo, visando compreender suas características e as interações hidrológicas presentes. A metodologia incluiu a obtenção e inserção de dados espaciais, climáticos e de vazão no modelo SWAT, seguida por análise de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros. Os dados climáticos utilizados para o presente estudo foram dados interpolados, representando a área de estudo e as coordenadas de estações que estão dentro dos limites da BHRP. Na análise de sensibilidade, foi utilizado o método de Sobol, reconhecido por sua eficácia na avaliação de modelos não lineares com um grande número de parâmetros. Na análise de sensibilidade para a BHRP foram considerados 9 parâmetros. Para a calibração, foi utilizado o algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS), um método de otimização global que busca maximizar a eficiência da função objetivo Nash-Sutcliffe (NSE). O processo de calibração envolveu a execução de 850 iterações para a calibração automática, seguido por sucessivas tentativas de calibração manual a fim de determinar os valores ideais dos parâmetros mais influentes. A análise de sensibilidade e calibração são etapas fundamentais na modelagem hidrológica, permitindo ajustar o modelo aos dados observados e melhorar sua capacidade de simular os processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Pardo. A utilização do método de Sobol e do algoritmo DDS demonstra a abordagem sistemática adotada no estudo para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos, em linha com o objetivo geral da pesquisa. Os resultados da calibração e validação foram fundamentais para avaliar a eficácia do modelo SWAT na simulação hidrológica da BHRP com dados interpolados. O valor da função objetivo NSE encontrado durante a calibração foi 0,59 e na validação de 0,51. Esses resultados, representam um ajuste satisfatório do modelo, mas existe a necessidade contínua de refinamento do modelo para uma representação mais precisa do comportamento hidrológico da bacia.

Palavras-chave: semiárido baiano; modelagem hidrológica; recursos hídricos

FONSECA e SILVA, Terêncio Lucano. **Hydrological simulation analysis in the Pardo River watershed – BA/MG, using the SWAT hydrological model**. Orientador: João Batista Lopes da Silva. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Teixeira de Freitas, 2024.

ABSTRACT

The hydrological simulation of the Pardo River watershed (BHRP) using the SWAT hydrological model offered a viable alternative to analyze the hydrology in the region. This study aimed to employ the SWAT model to conduct hydrological simulations of the Pardo River, in order to understand its characteristics and the hydrological interactions present. The methodology included obtaining and inputting spatial, climatic, and flow data into the SWAT model, followed by sensitivity analysis, calibration, and validation of the parameters. The climatic data used for this study were interpolated data, representing the study area and the coordinates of stations within the BHRP boundaries. In the sensitivity analysis, the Sobol method was used, recognized for its effectiveness in evaluating nonlinear models with a large number of parameters. In the sensitivity analysis for the BHRP, 9 parameters were considered. For calibration, the Dynamically Dimensioned Search (DDS) algorithm was used, a global optimization method that seeks to maximize the efficiency of the Nash-Sutcliffe objective function (NSE). The calibration process involved executing 850 iterations for automatic calibration, followed by successive attempts at manual calibration in order to determine the ideal values of the most influential parameters. Sensitivity analysis and calibration are fundamental steps in hydrological modeling, allowing the model to be adjusted to observed data and improving its ability to simulate hydrological processes in the Pardo River watershed. The use of the Sobol method and the DDS algorithm demonstrates the systematic approach adopted in the study to ensure the accuracy and reliability of the results obtained, in line with the general objective of the research. The results of the calibration and validation were fundamental to evaluating the effectiveness of the SWAT model in the hydrological simulation of the BHRP with interpolated data. The value of the NSE objective function found during calibration was 0.59 and during validation was 0.51. These results represent a satisfactory model fit, but there is a continuous need for model refinement for a more accurate representation of the watershed's hydrological behavior.

Keywords: bahian semi-arid; hydrological modeling; water resources

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pardo e do TISB.....	29
Figura 2 – Fluxograma das etapas realizadas na simulação hidrológica.....	31
Figura 3 – Classes de solo encontrados na BHRP.....	34
Figura 4 – Mapa de uso e cobertura da terra da BH do rio Pardo para o ano de 2021.....	35
Figura 5 – Mapa de uso e cobertura da terra da BH do rio Pardo no ano de 2021, reclassificado.....	36
Figura 6 – Localização das estações pluviométricas e fluviométrica utilizada na simulação hidrológica.....	37
Figura 7 – Sub-bacias da BHRP geradas pelo modelo hidrológico SWAT.....	45
Figura 8 – Hidrogramas das simulações realizadas com os diferentes dados climáticos interpolados. A - Simulação 1; B - Simulação 2 e; C - Simulação 3.....	47
Figura 9 – Hidrograma, gerado no SWAT+ ToolBox, das vazões observadas e simuladas após a calibração do modelo.....	51
Figura 10 - Hidrograma, gerado no SWAT+ ToolBox, das vazões observadas e simuladas após a validação do modelo.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de modelos hidrológicos, suas aplicações, criadores e ano de criação.....	19
Tabela 2 – Chave de reclassificação do uso e ocupação do solo utilizado para a transformação da base dos dados do MapBiomias para a base de dados do modelo SWAT.....	35
Tabela 3 – Dados da estação necessários para modelagem hidrológica no SWAT.....	39
Tabela 4– Variáveis climáticas requeridas pelo modelo SWAT.....	39
Tabela 5 – Séries históricas e condições iniciais da simulação hidrológica.....	40
Tabela 6 – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade	41
Tabela 7 – Dados climáticos utilizados na simulação inicial com o modelo SWAT.....	44
Tabela 8 – – Coeficientes estatísticos e vazão média das simulações com os diferentes dados climáticos de entrada no SWAT.....	46
Tabela 9 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros na execução da análise de sensibilidade.....	48
Tabela 10 – Valores dos parâmetros ajustados após o processo de calibração do modelo.....	51
Tabela 11 – Valores encontrados na análise estatística nas etapas de calibração e validação com os dados interpolados.....	53
Tabela 12 – Vazões médias observadas e simuladas.....	54
Tabela 13 – Distribuição dos percentuais de áreas e os respectivos usos e ocupação do solo, gerado pelo SWAT na BHRP.....	54
Tabela 14 – Distribuição dos percentuais de áreas e os respectivos tipos de solos, gerado pelo SWAT na BHRP.....	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	8
2. OBJETIVO GERAL	10
2.1. Objetivos específicos	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1. Recursos Hídricos	11
3.2. Gestão dos Recursos Hídricos.....	13
3.3. Bacia Hidrográfica e Ciclo Hidrológico	15
3.4. Modelos Hidrológicos	16
3.5. SWAT	19
3.6. Estudos realizados com o SWAT.....	24
4. METODOLOGIA.....	28
4.1. Área de Estudo	28
4.2. Softwares utilizados no desenvolvimento do trabalho.....	30
4.3. Composição do banco de dados	32
4.3.1. Modelo Digital de Elevação e delimitação da BHRP	32
4.3.2. Mapa pedológico.....	32
4.3.3. Mapa de uso e ocupação do solo	34
4.3.4. Dados climáticos e de vazão observada requeridos pelo modelo hidrológico SWAT.....	37
4.3.4.1. Dados de vazão.....	37
4.3.4.2. Dados climáticos	38
4.4. Inserção dos dados hidroambientais	39
4.4.1. Simulação hidrológica inicial com o SWAT	41
4.5. Análise de Sensibilidade	41
4.6. Calibração e validação.....	42
4.7. Índices de avaliação – testes estatísticos.	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. Simulação hidrológica inicial	43
5.2. Ajuste do modelo hidrológico na BHRP	48
5.2.1. Análise de sensibilidade	48
5.2.2. Calibração e Validação.....	50
5.3. Análise das características físicas da BHRP.....	54
6. CONCLUSÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO GERAL

A obtenção de dados observados em bacias hidrográficas representa um desafio significativo devido à infraestrutura limitada de monitoramento climático em muitas regiões. A obtenção de dados climáticos precisos e confiáveis requer uma rede bem estruturada de estações meteorológicas distribuídas estrategicamente, capazes de registrar uma variedade de variáveis essenciais como temperatura, velocidade do vento, precipitação, radiação solar e umidade relativa.

Além disso, é fundamental a disponibilidade de séries históricas longas para capturar variações climáticas ao longo do tempo, incluindo períodos de seca e chuvoso, fornecendo informações importantes para a compreensão dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. A falta de dados observados adequados pode comprometer a precisão da modelagem hidrológica e a eficácia das decisões em gestão de recursos hídricos, destacando a importância do uso de dados interpolados como uma alternativa viável e essencial para suprir lacunas na disponibilidade de informações climáticas.

A modelagem hidrológica desempenha um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos e na compreensão dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. No contexto da bacia hidrográfica do rio Pardo, localizada nos estados da Bahia e de Minas Gerais, a utilização de dados interpolados para a modelagem com o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) mostrou-se uma alternativa necessária. A precisão e representatividade dos dados climáticos utilizados na modelagem é essencial para garantir resultados confiáveis e informar decisões eficazes no manejo dos recursos hídricos.

De acordo com a Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) através do Censo Demográfico 2022, a Bahia possui cerca de 85% do seu território e 52,6% da sua população em área considerada semiárida. A bacia hidrográfica do rio Pardo (BHRP) está inserida na região semiárida dos dois estados que ocupa. O semiárido brasileiro abrange cerca de 1.427 municípios em onze estados, com uma extensão superior a 1.000.000 km², dos quais quase 90% pertencem à região Nordeste. O semiárido é caracterizado pela baixa pluviosidade, elevada variabilidade climática e fragilidade ambiental.

Sampaio e Vargas (2011) destacam que a degradação ambiental na BHRP tem sido significativa, especialmente na área inserida no estado da Bahia. Atividades agropecuárias, ocupação irregular do solo e destinação incorreta de resíduos sólidos urbanos e efluentes domésticos e

industriais são os principais poluentes da bacia. Santos (2017) salienta que a irrigação é quem mais consome água na bacia, seguido pelo abastecimento animal, do total das vazões consumidas na BHRP. Neto (2018) aponta que entre os anos de 2001 e 2016 houve um aumento de cerca de 4% na ocupação da área da bacia pela agropecuária e a diminuição de cerca de 5% das áreas de floresta.

No estudo realizado por Fonseca et al. (2023) para analisar a precipitação utilizando séries históricas das estações pluviométricas dentro dos limites da BHRP e no seu entorno, observou-se um padrão de decréscimo da precipitação nas estações pertencentes à bacia, com uma variação de 32% a 39% de diminuição. Essa redução destaca a importância da análise da produção de água na BHRP e a necessidade de compreender adequadamente as questões relacionadas à disponibilidade de água na bacia.

Nesse contexto, a aplicação do SWAT emerge como uma ferramenta metodológica fundamental para avaliar e compreender os processos hidrológicos na região. O uso de dados interpolados de precipitação pode aprimorar a modelagem hidrológica, permitindo uma análise mais detalhada e refinada dos processos hidrológicos e do comportamento da bacia. Desta forma, a precisão dos dados climáticos interpolados desempenha um papel importante na garantia de resultados confiáveis e na tomada de decisões eficazes na gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Pardo.

Portanto, este estudo visa evidenciar que o uso de dados interpolados é eficiente e pode contribuir significativamente para os estudos dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Ao focar na utilização de dados interpolados de precipitação na modelagem hidrológica com o SWAT, espera-se obter uma compreensão mais precisa dos processos hidrológicos da BHRP, melhorando a gestão dos recursos hídricos e contribuindo para a sustentabilidade da região.

2. OBJETIVO GERAL

Realizar simulação hidrológica com dados climáticos interpolados na bacia hidrográfica do rio Pardo com o modelo SWAT, visando melhorar a compreensão dos processos hidrológicos.

2.1. Objetivos específicos

Avaliar a qualidade e a representatividade dos dados climáticos interpolados na bacia hidrográfica do rio Pardo utilizando o modelo SWAT;

Analisar o impacto da utilização de dados interpolados na calibração e validação dos parâmetros do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Pardo;

Analisar a sensibilidade do modelo SWAT aos dados interpolados com foco na capacidade do modelo de reproduzir com precisão os padrões de vazão na bacia hidrográfica do rio Pardo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Recursos Hídricos

O Brasil detém cerca de 12% do total da água doce disponível no mundo, sendo considerado uma das maiores reservas mundiais (OECD/FAO, 2015). Apesar dessa grande reserva, observa-se uma distribuição irregular da água, especialmente no Nordeste brasileiro. Marengo (2011) estima por meio de estudos, principalmente no semiárido nordestino, que a cada cem anos pode ocorrer eventos de seca que duram de 18 a 20 anos, sendo alternado por períodos com anos mais chuvosos e anos de seca. Dias (2020) destaca que a região semiárida do país enfrenta desafios ambientais, econômicos e sociais, sobretudo relacionados à baixa disponibilidade hídrica.

O uso da água pode ser consuntivo, quando se retira a água da sua fonte natural não devolvendo a mesma quantidade, interferindo na sua disponibilidade espacial e temporal; ou não consuntivo, onde o volume da água retirada da fonte natural é devolvido quase que totalmente. Os usos consuntivos, como irrigação, uso doméstico e industrial, são os responsáveis por consumir quase toda a água captada no Brasil. A utilização da água para geração de energia, recreação, piscicultura e navegação, considera-se como usos não consuntivos (SOITO, 2019).

Em 2020, o volume de água retirado para consumo, consuntivo e não consuntivo, no Brasil foi de 1.947 m³/s, com previsão de crescimento de 42% até 2040. Deste total, a agricultura irrigada corresponde a cerca de 50% do consumo; o abastecimento urbano e rural consome, respectivamente, cerca de 25% e 2%; e, a indústria de extração (mineração) 2% e a de transformação 9% (ANA, 2021). Ainda, quando considerado apenas o uso consuntivo, em média, a agricultura corresponde a cerca de 70% do total, a indústria consome 22% e o uso doméstico apenas 8%. Segundo a ONU a quantidade de água suficiente para atender as necessidades básicas de uma pessoa é de 110 litros de água por dia (L/d), a média brasileira é de 150,7 L/hab/dia (SNIS, 2021).

Historicamente, o gerenciamento da água foi negligenciado, ou se quer houve gerenciamento, pois acreditava-se que os recursos naturais eram inesgotáveis, não sendo diferente com os recursos hídricos. Captava-se a água das coleções hídricas para os diferentes usos, e devolvia-se a mesma em forma de efluente, o que ocasionava a poluição do corpo receptor (VICTORINO, 2007). Conforme ressaltam Santos (2007) e Ruppenthal (2014), antes da década de 1950 não havia a preocupação com os impactos causados pelo uso indiscriminado dos recursos naturais, lançamento de efluentes sem tratamento, emissão de gases na atmosfera e disposição inadequada de resíduos sólidos. Com a qualidade de vida sendo comprometida e

sentida pela população, os agentes poluentes começaram a ser estudados e deu-se início uma mudança comportamental diante dos problemas ambientais.

A partir da década de 1980 houve a intensificação da preocupação ambiental e o estabelecimento de legislações específicas que visavam o controle da poluição no ‘final do tubo’, ou seja, o poluidor deveria de alguma maneira ser responsável por minimizar os impactos ocasionados pelos rejeitos do seu processo produtivo (SANTOS, 2007). No ano de 2002 a ONU realizou a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável e, dentre os temas discutidos na cúpula, os países participantes firmaram um acordo que tinha como meta reduzir à metade o número de pessoas que não tinham acesso à água potável ou saneamento básico.

Conforme apontam Bursztyn; Oliveira (1982) a implementação da gestão dos recursos hídricos, no Brasil, pode ser dividida nas seguintes fases. Antes da década de 1940, a gestão concentrava-se em prevenir inundações, regularizar os cursos d’água, captação para abastecimento e a produção de energia pois, a demanda era superada pela capacidade e possibilidade de estocagem; entre as décadas de 1950 e 1970 a gestão foi tornando-se mais complexa, em decorrência do surgimento de indústrias, aumento populacional e da agricultura, originando conflitos entre oferta e procura, optando-se por grandes obras hidráulicas; a partir da década de 1970, observando-se a intensificação dos problemas da fase anterior, foi necessário o planejamento do uso e distribuição da água por meio de uma estrutura que norteasse os usuários através de uma perspectiva holística do gerenciamento, adotando-se como unidade básica de gestão a bacia hidrográfica.

Segundo Padovesi-Fonseca e de Faria (2022) a gestão dos recursos hídricos no Brasil pode ser dividida em três períodos. Até o ano de 1997, prevalecia uma abordagem desarticulada, carente de uma política nacional e gestão integrada. Durante esse período, a água era percebida como inesgotável, destacando-se a prioridade dada à construção de grandes obras de infraestrutura, como barragens e canais. A segunda fase, de transição, entre 1997 e 2000, marcou um ponto de inflexão com a promulgação da Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997). Essa legislação estabeleceu as bases para uma gestão integrada e descentralizada dos recursos hídricos, dando origem aos Comitês de Bacia Hidrográfica, compostos por representantes dos usuários, sociedade civil e poder público, sendo responsáveis por desenvolver e implementar os planos de recursos hídricos, promovendo uma abordagem participativa.

A implementação efetiva da gestão integrada dos recursos hídricos no Brasil começou a ganhar força após a promulgação da Lei das Águas em 1997. Esta legislação estabeleceu uma abordagem mais participativa e descentralizada, dando origem aos Comitês de Bacia Hidrográfica. Desde então, conforme apontam Padovesi-Fonseca e de Faria (2022), novos instrumentos de gestão, como outorgas de direito de uso da água e sistemas de cobrança pelo uso, foram implementados, refletindo uma abordagem mais responsável e sustentável na gestão dos recursos hídricos do país.

3.2. Gestão dos Recursos Hídricos

A Lei das águas instituiu o Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SINGREH) e definiu os instrumentos de gestão e planejamento da água, como o enquadramento dos corpos hídricos em classes e a outorga e cobrança para os mais diversos usos. Em suma, a Lei das Águas, como é conhecida a supracitada lei, mostra-se uma importante ferramenta para nortear as ações a serem tomadas no que se refere aos recursos hídricos.

Para efetivar os princípios que norteiam a gestão dos recursos hídricos segundo a Lei das Águas, destaca-se o estabelecimento dos instrumentos de gestão previstos na lei, sendo eles: i) Planos de bacias hidrográficas, que são elaborados a partir de diagnósticos da atual situação da bacia, dando suporte às ações necessárias para a recuperação, conservação e preservação das águas; ii) Sistema de informações sobre recursos hídricos, onde é realizada a coleta e organização das informações que serviram de base para as intervenções na bacia hidrográfica; iii) Enquadramento dos corpos de água em classes de acordo com os principais usos, importante instrumento para evidenciar os padrões de qualidade dos corpos hídricos; iv) Outorga de direito de uso, possibilitando ao usuário a concessão do uso da água e assegurando o controle da qualidade e quantidade e; v) Cobrança pelo uso dos recursos hídricos, considerado um balizador dos diversos usos da água e condicionando o usuário ao equilíbrio entre oferta e demanda, sendo um meio de arrecadar os recursos financeiros que serviram para amenizar os impactos na bacia (GAMA, 2009).

A responsabilidade pelo cumprimento da Política Nacional de Recursos Hídricos está vinculada a Agência Nacional de Águas e Esgoto – ANA, por meio da Lei nº 9.984 de 2000 (BRASIL, 2000), estando ainda atribuída ao Ministério de Meio Ambiente e Mudanças Climáticas (MMA), objetivando regularizar a utilização dos recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos. O desencadeamento de temáticas como o embate sobre o desperdício de água e a prevenção contra a poluição de cursos d'água natural, perpassam pelo objetivo principal da criação desse órgão.

A gestão dos recursos hídricos deve atentar-se aos diversos usos da água, no sentido de manter a regularidade na disponibilidade em termos de quantidade, decorrente da escassez ou abundância, e da qualidade por conta das interferências antrópicas que podem causar poluição hídrica. Portanto, sendo a água um bem de domínio público é fundamental que o governo estabeleça as políticas públicas para atender às necessidades da população e assegurar a sua gestão, cumprindo assim o seu papel de elaborar, regular e fiscalizar a execução das legislações vigentes (LANNA, 1995).

No gerenciamento dos recursos hídricos os aspectos de quantidade e qualidade são indissociáveis, ressaltando-se a importância da avaliação da disponibilidade hídrica, em termos qualitativos, de águas superficiais e subterrâneas. De acordo com Silva e Almeida (2010), dados de qualidade da água podem ser evidenciados considerando os indicativos de degradação ambiental apontados na avaliação da disponibilidade hídrica. Portanto, conforme destaca Lanna (1995) considera-se a deterioração da qualidade da água uma das causas principais de conflitos pelo seu uso, sendo imprescindível a discussão acerca do planejamento e gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido Mendonça *et al.* (2015) relata a relação direta do uso e ocupação do solo na área de drenagem com a qualidade da água em bacias hidrográficas, em particular a qualidade da água dos afluentes do curso principal.

Outro importante fator é a falta de saneamento básico, responsável por impactar negativamente o ambiente, poluindo cursos d'água e lençóis freáticos por exemplo, e pela proliferação de doenças na população, dentre elas: diarreia, cólera, dengue, leptospirose e dermatites (BARROS, 2018). Visando minimizar ou extinguir os impactos causados pelo déficit de saneamento foi criada a Lei nº 11.445/07, estabelecendo as diretrizes nacionais para o saneamento básico. E, de acordo com a referida lei, saneamento básico é o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água potável; esgotamento sanitário; limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e; drenagem e manejo das águas pluviais (BRASIL, 2007).

Toda a água disponível está em um constante processo de renovação/transporte denominado Ciclo Hidrológico. Nesse ciclo, sobretudo, ocorre a troca de água entre a superfície terrestre e a atmosfera. O ciclo da água é resultado de diversas interações naturais e ecossistêmicas, entretanto, pode sofrer algum tipo de alteração no regime pluviométrico ou no curso do escoamento superficial, devido à interferência das ações do homem (SILVA, 1998 e TUCCI, 2012).

3.3. Bacia Hidrográfica e Ciclo Hidrológico

É um consenso universal o reconhecimento da bacia hidrográfica como a unidade de planejamento para o gerenciamento e manejo de recursos hídricos pois, toda ocorrência de eventos em uma bacia, seja de origem antrópica ou natural, interfere na dinâmica hidrológica da região onde a bacia está localizada (SANTOS, 2007). Ainda, pode-se compreender a bacia hidrográfica como um sistema aberto, fruto das interações antrópicas com o meio físico e seus diversos elementos, em particular a qualidade e quantidade dos recursos hídricos disponíveis (PINTO e AGUIAR NETTO, 2008).

Adicionalmente, entende-se a bacia hidrográfica como um agregado de terras escoadas por um curso d'água principal e seus afluentes, constituindo a rede de drenagem, tendo sua origem em regiões com maiores altitudes de relevo e podendo gerar lençóis freáticos decorrentes da infiltração profunda das águas das precipitações, sendo a forma mais propícia para o estudo dos processos ocorrentes no ciclo hidrológico, como a produção e qualidade da água, bem como fluxos de sedimentos e nutrientes (BARELLA *et al.*, 2004 e PIRES *et al.*, 2008).

Silveira (2009) conceitua a bacia hidrográfica como uma região de captação natural da precipitação. Nesse contexto, os fluxos da rede de drenagem convergem das cotas mais elevadas para as mais baixas, culminando em um único ponto de saída, conhecido como exutório. Pode-se compreender a bacia como um sistema físico, em que o volume de água precipitado é a entrada, o volume escoado pelo exutório representa a saída, e os volumes de evapotranspiração e percolação são considerados como perdas intermediárias. As principais características destacadas para a bacia hidrográfica incluem a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a declividade do rio e a declividade da própria bacia.

Portanto, conhecer o Ciclo Hidrológico facilita o entendimento dos fenômenos naturais que ocorrem na bacia hidrográfica. As etapas do ciclo hidrológico incluem: evaporação e transpiração (evapotranspiração), precipitação, interceptação, escoamento superficial, infiltração e percolação. A principal entrada de água na bacia hidrográfica é a precipitação e, levando em consideração a existência de cobertura vegetal sobre o solo, essa precipitação poderá ser interceptada pelo dossel, atingir diretamente o solo ou os corpos d'água. Parte da água interceptada, atingindo a capacidade de armazenamento do dossel cairá no solo e, parte será evaporada. Ainda, ao atingir a superfície, a água pode infiltrar no solo até atingir a capacidade de saturação, começando a escoar superficialmente (escoamento direto) ou pode percolar (abastecendo os aquíferos) gerando escoamento de base, e seu destino final será os cursos d'água (TUCCI, 2005; BRITTO *et al.*, 2019).

Complementarmente, Tucci (2005) e Britto *et al.*, (2019) destacam que a água infiltrada irá se redistribuir ao longo do perfil de solo e, simultaneamente à sua entrada no solo, a água passará por um processo conhecido por evapotranspiração, consequência da incidência dos raios solares na superfície terrestre, onde a água que se encontra na superfície evapora e a água retirada do solo pelas raízes será transpirada pela vegetação. A água que infiltra mais profundamente no solo por percolação geralmente abastece os reservatórios de água subterrânea, mantendo os rios com considerável vazão mesmo em períodos de seca.

A precipitação em bacias hidrográficas cai sobre as vertentes, ocasionando escoamento direto e a infiltração nos solos. Todavia, qualquer alteração, natural ou antrópica, na superfície da bacia pode impactar significativamente o regime de escoamento e infiltração. Caracteriza-se esse impacto quanto ao efeito provocado no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média, bem como nas condições ambientais no local impactado e a jusante. Portanto, infere-se que alterações na bacia hidrográfica, como uso e ocupação inadequada do solo, contribuem para alteração dos processos hidrológicos.

3.4. Modelos Hidrológicos

A necessidade do gerenciamento e planejamento adequado dos recursos hídricos e o entendimento que a bacia hidrográfica é o local de aplicação das ações necessárias à manutenção desses recursos, busca-se sempre novas tecnologias que possam auxiliar nessa gestão. Destaca-se duas atividades pertencentes a Hidrologia, ciência que estuda as águas, que são importantes no gerenciamento hídrico: o monitoramento, que se refere a observação e medição constantes dos fenômenos naturais como a precipitação, radiação solar, temperatura do ar, dentre outros; e a modelagem, que utiliza os dados obtidos no monitoramento para simulação de possíveis cenários hídricos na bacia hidrográfica (TUCCI, 2005; KOBAYAMA, 2007; SILVA, 2020).

Portanto, para a modelagem em bacias hidrográficas utiliza-se os modelos hidrológicos, que são ferramentas computacionais utilizadas com o objetivo de representar os fenômenos naturais que ditam a dinâmica hidrológica em uma bacia. Pode-se definir um modelo hidrológico como uma representação matemática do fluxo de água sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. A modelagem permite a melhor compreensão desses fenômenos, sendo possível a previsão de situações vindouras e, em alguns casos, reproduzir situações passadas, a fim de direcionar as ações decisórias. Existem modelos capazes de relacionar a interação das modificações referentes ao uso e ocupação do solo e a erosão ocorrida na bacia, através da

criação de cenários diversos, decorrentes do transporte de sedimentos da área de drenagem para os rios (RENNÓ e SOARES, 2000; FUKUNAGA, 2012).

Os modelos hidrológicos permitem analisar fontes de contaminação hídrica difusas ou pontuais, como cargas de nutrientes provenientes de despejos domésticos ou de pesticidas advindos do manejo agrícola, bem como os impactos ocasionados pelas alterações climáticas ocorridas na região onde encontra-se a bacia hidrográfica (FUKUNAGA, 2012; LIMA, 2022). Portanto, os modelos podem auxiliar na adoção de práticas que ajudem na conservação da qualidade da água e na previsão dos impactos consequentes das alterações climáticas, pois tem como vantagem da sua aplicação a possibilidade do estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida.

A aplicação de modelos globais representa uma prática essencial em projetos relacionados aos recursos hídricos. Enquanto as abordagens convencionais se baseiam em análises hidrológicas centradas em eventos de precipitação isolados, os modelos abrangentes, que incorporam todo ou a maior parte do ciclo hidrológico, têm a capacidade de examinar longas séries temporais. Esse enfoque busca aprimorar a interpretação das não-linearidades presentes nos processos hidrológicos associados tanto à bacia hidrográfica quanto à calha fluvial, de maneira integrada. Tais modelos surgem como instrumentos mais confiáveis na simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica, proporcionando melhorias nas interpolações e extrapolações (MACHADO, 2002).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto a distribuição: (i) concentrado, quando não considera a variabilidade espacial, representando a bacia através da precipitação média e com valores constantes dos fenômenos hidrológicos; (ii) distribuído, quando subdivide a bacia e adota os valores de acordo com o espaço/tempo; ou (iii) semi-distribuído, quando divide a bacia hidrográfica em áreas com características hidrológicas comuns, como relevo, uso do solo e tipo de solo. Quanto a concepção: (iv) conceitual, buscam descrever a dinâmica hidrológica da bacia considerando os conceitos físicos e as equações de conservação de massa e quantidade de movimento; ou (v) empíricos, representa a bacia baseando-se em análises estatísticas (métodos de correlação, regressão), que não se relacionam com os processos físicos da bacia. Quanto a temporalidade: (vi) baseados em eventos, analisam apenas eventos isolados ou; (vii) contínuos, utilizam-se de períodos em que não há interrupção para representar a bacia (RENNÓ e SOARES, 2000; TUCCI, 2005; OLIVEIRA, 2014).

Para assegurar que o modelo forneça resultados condizentes com a realidade analisada, é fundamental realizar a calibração e validação do modelo hidrológico utilizado. A calibração consiste na identificação dos valores ótimos dos parâmetros do modelo, proporcionando uma

simulação mais fiel à realidade. Durante esse processo, é crucial avaliar a qualidade e a representatividade dos parâmetros, levando em consideração conceitos essenciais na modelagem, como equifinalidade e parcimônia (COLLISCHONN e TUCCI, 2003).

A equifinalidade surge quando diferentes conjuntos de parâmetros geram resultados muito próximos entre si e em relação aos dados observados, dificultando a identificação do grupo de parâmetros mais sensível e apropriado para a simulação. No que diz respeito à parcimônia, a representação mais eficaz da dinâmica hidrológica da bacia é alcançada ao minimizar o número de parâmetros, conforme destacado por Beven e Binley (1992), Perrin *et al.* (2001) e Pereira (2013). Por isso é realizada a análise de sensibilidade, a fim de verificar a relação dos dados de saída (resultado da simulação) com os dados de entrada (variáveis), o que permite identificar aquele, ou aqueles parâmetros, mais significativos na simulação (RENNÓ e SOARES, 2000).

A calibração precisa do modelo é essencial para assegurar a eficácia da simulação, sendo fundamental que o conjunto de dados utilizado como entrada no modelo seja representativo da variabilidade dos processos hidrológicos da bacia. Posteriormente, procede-se à validação do modelo, simulando conjuntos de dados diferentes ou sob condições distintas daquelas empregadas na calibração. O objetivo é avaliar a proximidade entre os resultados simulados e os dados observados. Durante a validação, mantêm-se os parâmetros ajustados na calibração, aplicando um período temporal diferente ou outras áreas dentro da bacia hidrográfica para analisar a capacidade do modelo hidrológico em representar fielmente a realidade observada, conforme destacado por Fukunaga (2012) e Pereira (2013).

Portanto, para que os modelos realmente deem resultados eficientes e que possam auxiliar na resolução dos problemas e conflitos inerentes a gestão dos recursos hídricos, eles foram sendo aperfeiçoados e cada vez mais utilizados. Lopes (2008) e Uzeika (2009) e Fukunaga (2012) e Pereira (2013) destacam diversos programas que estimam a produção e transporte de sedimentos e produção e qualidade da água. A tabela 1 apresenta alguns dos modelos hidrológicos mais conhecidos e suas principais aplicações.

Tabela 1 – Exemplos de alguns modelos hidrológicos, suas aplicações, criadores e ano de criação.

Modelo	Aplicações	Criador(es)	Ano
Topographic Based Hydrological Model – TOPMODEL	Utilizado para representar os processos hidrológicos na bacia	Beven e Kyrkby	1979
Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – ANSWERS	Utilizado na simulação dos processos hidrológicos (escoamento e erosão) em bacias rurais agrícolas	Beasley e Huggins	1980
Sistema Hidrológico Europeu – SHE	Utilizado para simular os processos físicos do ciclo hidrológico	Abbott <i>et al.</i>	1986
Agricultural Non-point Source Pollution Model – AGNPS	Utilizado para estimar a lâmina de escoamento direto e a vazão máxima, com ênfase nos sedimentos e nutrientes em bacias agrícolas médias a grandes	Young <i>et al.</i>	1987
Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems – GLEAMS	Utilizado para avaliar os efeitos de sistemas de manejo agrícola no movimento de produtos químicos agrícolas	Leonar <i>et al.</i>	1987
Kinematic Runoff and Erosion Model – KINEROS	Utilizado em simulações destinadas ao desenvolvimento urbano, produção de sedimento, projetos de pequenos reservatórios e de canais	Whoolhiser <i>et al.</i> USDA-ARS	1990
Soil and Water Assessment Tool – SWAT	Utilizado para analisar os impactos do uso e manejo do solo sobre o escoamento direto e de base, produção de sedimentos e qualidade da água.	Arnold <i>et al.</i>	1998
Modelo Hidrológico de Grandes Bacias – MGB IPH	Utilizado para simular o comportamento físico dos processos que ocorrem na BH	Collischonn e Tucci	2001
WRF-Hydro (Weather Research and Forecasting Hydrological Model)	Utilizado para modelar e simular chuvas, gerenciamento de reservatórios e previsão de inundações	National Center for Atmospheric Research (NCAR) e National Aeronautics and Space Administration (NASA)	2010

3.5. SWAT

O modelo hidrológico conhecido como SWAT – *Soil and Water Assessment Tool* (Ferramentas de Avaliação de Solo e Água) foi desenvolvido pelo Setor de Pesquisas Agrícolas do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (ARS – USDA) no início da década de 1990. O SWAT é um modelo matemático semiconceitual, semidistribuído e contínuo no tempo, objetivando a previsão dos impactos das atividades antrópicas na bacia, no que concerne a produção e qualidade da água, transporte de sedimentos e produtos químicos utilizados em manejo agrícola (NEITSCH *et al.*, 2009).

O modelo, embora seja resultado de anos de estudos e experiências de modelagem hidrológica desenvolvidas pelo USDA, é continuamente aperfeiçoado. O SWAT descende do modelo *Simulator of Water Resources in Rural Basins* (SRRB). O SRRB foi desenvolvido baseado nos modelos: *Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS)

(KNISEL, 1980); *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) (LEONARD *et al.*, 1987); e o *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC) (WILLIAMS *et al.* 1990).

O SWAT é estruturado considerando elementos como clima, sedimentos, hidrografia da bacia e manejo agrícola, todos interligados diretamente com a produção de água e sedimentos. As simulações hidrológicas do modelo seguem duas etapas fundamentais: a terrestre, que controla a quantidade de água transportada de cada parte da bacia hidrográfica para o canal principal, e a fase aquática, que simula o movimento da água na rede hidrográfica até alcançar o exutório (ADRIOLO *et al.*, 2008; PEREIRA, 2013; FUKUNAGA, 2012).

O modelo, por trabalhar com simulação de sistemas naturais, requer grande quantidade de dados que consigam descrever a heterogeneidade das bacias, o que de certa forma limita a sua aplicação. Entretanto, o uso de ferramentas que operam com sistema de informação geográfica, integrando e analisando grupos de dados georreferenciados, quando utilizadas em modelos hidrológicos como o SWAT, otimizam o processo de modelagem e dão maior segurança e precisão nos resultados (MACHADO *et al.*, 2003; LUBITZ, 2009).

Assim, a integração a um sistema de informação geográfica (SIG) tem como característica a facilitação do trabalho para elaboração da estrutura de dados requerida pelo modelo SWAT, que é bastante complexa e, dando a confiança de tê-la feito corretamente. A interface SIG e modelo ocorre de três maneiras: união, são desenvolvidos em separado e os dados do SIG são extraídos pelo modelo; combinação, configura-se o modelo com o SIG e automaticamente ocorre a troca de dados e; integração, ambos são incorporados exigindo-se grande esforço de programação (MACHADO, 2002).

O SWAT necessita de informações espaciais, como o modelo digital de elevação (MDE), mapas da bacia contendo a hidrografia, as classes de solo, o uso e ocupação do solo e as séries históricas de precipitação, vazão líquida, descarga sólida, temperatura mínima e máxima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, para que seja possível proceder com a simulação (SOUZA *et al.*, 2009). O SWAT possui um banco de dados de classes de solos, entretanto os dados refletem a realidade estadunidense, país onde o mesmo foi desenvolvido, sendo necessário que o usuário/modelador introduza os dados referentes ao local onde será aplicado o modelo hidrológico.

O modelo SWAT, conforme já pontuado, é um modelo semidistribuído e a discretização da bacia hidrográfica em sub-bacias permitindo a aplicação de equações em áreas homogêneas

considerando as condições de declividade, uso e ocupação do solo, classes do solo e clima. A aplicação dessas equações possibilita estimar o escoamento superficial, a vazão, a quantidade de sedimentos e nutrientes dessas bacias hidrográficas (ARNOLD *et al.*, 2012).

Salazar (2016) ressalta que o modelo oferece três níveis espaciais: bacia hidrográfica, sub-bacias e unidades de resposta hidrológicas (URHs). Cada nível possui parâmetros e dados de entrada específicos. A bacia hidrográfica refere-se à área total do modelo; as sub-bacias são subdivisões hidrológicamente conectadas da bacia; e as URHs são áreas dentro das sub-bacias com características de solo, uso do terreno e declividades semelhantes.

Neitsch *et al.* (2011) e Arnold *et al.* (2012) afirmam que após a inserção dos dados de entrada e definição dos parâmetros da modelagem, a obtenção de resultados satisfatórios é garantido por meio de: análise de sensibilidade, identificando os parâmetros que mais influenciam na dinâmica hidrológica da bacia e conseqüentemente no resultado da simulação; calibração, que consiste na alteração dos valores dos parâmetros definidos na análise de sensibilidade a fim de encontrar um ajuste aceitável do modelo e; validação, onde realiza-se uma simulação com os valores dos parâmetros calibrados e com dados de entrada de período diferente, para validar o modelo.

A análise de sensibilidade objetiva definir quais os parâmetros se apresentam mais significativos para a bacia hidrográfica em estudo. O SWAT realiza a análise dos valores de vazão simulada ligada a alteração nos valores dos parâmetros de entrada do modelo. Para tal, o modelo combina dois métodos: Hipercubo Latino – *Latin Hypercube* (LH), o princípio de funcionamento do método é a amostragem estratificada, onde divide-se os parâmetros em N faixas de amplitude e uma combinação aleatória dos parâmetros é testada apenas uma vez; e o método Um fator de cada vez – *One factor at a time* (OAT), consiste na alteração de um parâmetro apenas por simulação, possibilitando associar as mudanças nos valores de vazão ao parâmetro cujo valor foi modificado (PERAZZOLI, 2012 e SRINIVASAN, 2012).

A calibração consiste no processo de alterar os valores dos parâmetros de entrada e realizar novas simulações a fim de comparar os resultados da simulação com os valores reais. Ambiciona-se encontrar a combinação de valores de parâmetros, ou seja, o ajuste ou calibração adequada e que melhor fornecerá resultados mais precisos na simulação. É o processo de calibração que garante a acurácia do modelo e, pode-se realizar de maneira manual ou automática (NEITSCH *et al.* 2009).

Na calibração manual, os parâmetros de entrada são ajustados individualmente para gerar resultados simulados dentro de um intervalo definido pelos dados observados, repetindo o processo até encontrar uma combinação aceitável (NEITSH *et al.*, 2005; MORIASI *et al.*, 2007). Na calibração automática, algoritmos, como SWAT-CUP e SWAT+ ToolBox, aceleram o processo, permitindo um ajuste mais rápido e preciso dos valores simulados/observados no complexo processo de calibração do SWAT. Com os valores calibrados, o próximo passo é validar o modelo, modificando os dados de entrada para dados de monitoramento de um período diferente e executando uma nova simulação para confirmar o bom ajuste do modelo à área estudada.

Para avaliar o modelo, é essencial recorrer a índices estatísticos. De acordo com Tedeschi (2006), a utilização de uma combinação de diferentes índices garante uma avaliação mais completa. Embora os mais comuns sejam o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Chong *et al.*, (1982) e Legates e McCabe Jr., (1999) propõem outros índices estatísticos, que também são comumente utilizados, para avaliação do modelo: i) Erro absoluto médio percentual (EAMP); ii) Índice de concordância ajustado (d'); iii) Coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe ajustado (NS'); iv) Erro absoluto médio (EAM) e; v) Raiz do erro quadrático médio (REQM).

O SWAT utiliza a equação do balanço hídrico na modelagem hidrológica, descrevendo a relação entre as variáveis de entrada e saída, através da divisão da bacia hidrográfica em bacias de menores áreas e posteriormente na divisão em Unidades de Resposta Hidrológica – URHs, onde serão aplicadas as equações que possibilitam ao modelo realizar a simulação (BENAMAN; SHOEMAKER; HAITH, 2005). O balanço hídrico (Equação 1) permite quantificar a água produzida na bacia na fase terrestre e, a variabilidade de água armazenada no solo é encontrada relacionando-se as variáveis na equação do balanço hídrico (NEITSH *et al.* 2005).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

SW_t → quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo t (mm);

SW_0 → quantidade inicial de água no solo no dia i (mm);

t → duração do ciclo hidrológico simulado (dia);

R_{day} → quantidade de água precipitada no dia i (mm);

Q_{surf} → quantidade de escoamento superficial no dia i (mm);

E_a → quantidade de água de evapotranspiração no dia i (mm);

w_{seep} → quantidade de água percolada da camada simulada para a camada inferior, no dia i (mm);

Q_{sw} → quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento subsuperficial (mm).

Na estimativa do escoamento superficial o modelo SWAT utiliza os métodos da Curva Número (CN) e de infiltração de Green e Ampt (1911) e, para o cálculo da evapotranspiração potencial, o modelo utiliza dados climáticos da área em estudo e aplica um dos métodos: Penman-Monteith (FAO-56), Priestley-Taylor ou Hargreaves (NEITSCH *et al.*, 2009). O método racional modificado é utilizado para o cálculo das taxas máximas de escoamento. E, o método de Manning é aplicado para estimar o tempo de concentração (ARNOLD *et al.*, 2012).

Para estimar escoamento superficial o modelo SWAT utiliza os métodos da Curva Número (CN) e de infiltração de Green e Ampt (1911) e, para o cálculo da evapotranspiração potencial o modelo utiliza-se dos dados climáticos da área em estudo e aplica um dos métodos: Penman-Monteith (FAO-56), Priestley-Taylor ou Hargreaves (NEITSCH *et al.*, 2009). O método racional modificado é utilizado para o cálculo das taxas máximas de escoamento. E, o método de Manning é aplicado para estimar o tempo de concentração (ARNOLD *et al.*, 2012).

O método CN foi criado pelo Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS/USDA, 1983), combinando as informações de uso e ocupação e de classes de solo. Cao *et al.* (2006) afirmam que o método é uma abordagem amplamente utilizada para estimar a quantidade de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica pois, compreende que a precipitação em dado evento está relacionada a precipitação total e as perdas/abstrações iniciais (infiltração, retenção da chuva pela vegetação ou depressões no solo). O objetivo principal do método é o cálculo do volume da água que escoou pela superfície do solo após uma precipitação, considerando as características físicas da bacia hidrográfica, como o solo, a vegetação e a cobertura do terreno.

A estimativa do escoamento superficial é fundamental para avaliar o risco de enchentes, a erosão do solo e para planejar medidas de manejo de água e conservação do solo. A precipitação efetiva (Equação 2) é utilizada na estimativa do escoamento superficial direto (ESD) e o valor de CN é utilizado no cálculo do potencial de retenção de água no solo após o início do escoamento (Equação 3). Pode-se considerar que o método é uma abordagem simplificada e considera várias premissas, como a uniformidade da precipitação, a homogeneidade da bacia hidrográfica e a constância do CN ao longo do tempo (CAO *et al.*, 2006 e SOARES *et al.*, 2017).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Eq. 2}$$

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

Onde:

P_e → precipitação efetiva (mm);

P → precipitação total (mm);

I_a → abstrações iniciais (mm);

S → potencial máximo de retenção (mm).

O modelo SWAT destaca-se como uma opção vantajosa para estudos de modelagem hidrológica, sendo gratuito, bem documentado e possuindo interfaces acessíveis, como o ArcSWAT e SWAT+. Com uma documentação teórica abrangente e manuais explicativos disponíveis no site oficial (Neitsch *et al.*, 2011; Arnold *et al.*, 2012), o SWAT é acessível e suporta a simulação de diversos processos físicos em bacias hidrográficas. Sua versatilidade é notável, permitindo configuração por meio de diferentes interfaces para atender às necessidades específicas de estudos e pesquisas (GEORGE; LEON, 2008).

3.6. Estudos realizados com o SWAT.

A utilização do modelo hidrológico SWAT em estudos a nível nacional e internacional ocorre desde a década de 1990, ano de sua criação. A flexibilidade do SWAT em abordar diversas escalas espaciais e temporais torna-o uma ferramenta valiosa para a avaliação de cenários futuros, na previsão da disponibilidade de água e na gestão sustentável dos recursos hídricos. Além disso, a sua aplicação internacional e nacional tem contribuído para avanços significativos no entendimento das dinâmicas hidrológicas globais e locais, fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões em políticas de uso da terra, conservação de recursos naturais e adaptação às mudanças climáticas. Logo, destacam-se estudos nacionais e internacionais onde houve a aplicação do modelo o SWAT.

Lopes (2008) utilizou o modelo para analisar a produção de água e de sedimentos em sete bacias hidrográficas experimentais no estado de Santa Catarina, com diferentes coberturas do solo: duas com vegetação nativa, mata secundária (com áreas de 14,8 ha e 24,0 ha); duas reflorestadas com pinus (10,6 ha e 21,0 ha), uma agrícola de milho e soja (8,2 ha); e duas bacias mistas, sendo uma com vegetação nativa, pinus e agricultura (233,8 ha) e a outra com vegetação nativa e pinus (856,1 ha). A autora destaca que a modelagem com o SWAT gerou simulações que se assemelham aos dados observados de vazão, entretanto, destaca a limitação do modelo em bacias pequenas, visto que há perda de sensibilidade na resposta da bacia, forçando a utilização de um maior número de parâmetros para proceder com a análise de sensibilidade e calibração do modelo. Ainda, a autora aponta que as bacias cobertas por vegetação nativa apresentaram os maiores valores de armazenamento de água, enquanto a bacia com cobertura de pinus

apresentou o maior valor de produção de sedimentos e, a bacia mista (com pinus e vegetação nativa) apresentou a maior produção de água em três meses do ano (maio, novembro e dezembro), porém com baixa produção de sedimentos a montante, aumento consideravelmente na porção do centro a jusante da bacia.

Fukunaga (2012) utilizou o modelo para avaliar sua aplicabilidade na estimativa de vazões em bacias hidrográficas no estado do Espírito Santo, sendo uma bacia com cerca de 22,6 ha (MBJ) e outra com cerca de 2.237 km² (bacia do rio Itapemirim - BIMR). O autor aponta que independente da área da bacia foi possível efetuar a análise de sensibilidade do modelo, porém, devido a limitação de dados na MBJ não foi possível finalizar a sua calibração. Ainda, o autor sinaliza que a calibração do SWAT para a BIMR foi satisfatória e, as simulações para as vazões mínimas e médias tiveram melhores resultados que a simulação para as vazões máximas. Destaca-se que na fase de validação do modelo, quando realizou simulações com uma série histórica de precipitação diferente da utilizada na calibração os índices estatísticos mantiveram-se satisfatórios, mesmo com uma qualidade menor, com coeficiente de determinação (R^2) e o Nash-Sutcliffe (NS), respectivamente, 0,63 e 0,57.

Castro (2013) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT em uma bacia agrícola com aproximadamente 105,0 km², inserida no bioma cerrado e localizado no Distrito Federal. A autora aponta que a simulação hidrológica por meio do modelo SWAT não conseguiu representar satisfatoriamente a realidade sem a calibração dos parâmetros mais sensíveis no modelo e que a calibração resultou em NS de 0,60 e um R^2 de 0,66, valores considerados satisfatórios para a calibração diária, porém, não foi possível o ajustar satisfatoriamente o modelo durante o período utilizado para validação, o que resultou em um R^2 de 0,66 e um NS negativo. Mas, apesar da superestimação nos resultados de vazão, a modelagem mostrou boa representatividade para o fluxo de base de junho de 2007 a janeiro de 2008, acompanhando a tendência da vazão observada. Ainda, a autora destaca que a vazão observada durante calibração é significativamente maior que a do período de validação, sugerindo que o período de calibração pode não representar adequadamente as características climáticas da bacia, especialmente para o ano de validação.

Oliveira (2014) fez uso do SWAT visando avaliar sua aplicabilidade em uma bacia experimental com área de 2,84 km² coberta majoritariamente por eucalipto, no estado do Espírito Santo. A autora destaca a importância da calibração para que as simulações das vazões apresentem bons resultados. E, afirma que o modelo apresenta uma limitação na simulação de baixas vazões, comuns em bacias com áreas relativamente pequenas, devido à perda de sensibilidade,

resultando em uma superestimação excessiva nas simulações iniciais, além do grande número de parâmetros necessários para calibração. A calibração foi automática, com a utilização do SWAT-CUP, que se mostrou eficiente. Ainda, a autora pontua que a simulação de vazões para cenários hipotéticos, pós calibrado e validado do modelo, revelou alta sensibilidade para o uso de pastagem e baixa sensibilidade às mudanças no uso da terra para vegetação nativa e manejos de eucalipto, destacando que essa baixa sensibilidade pode estar associada às baixas vazões observadas em monitoramento, consequência do tamanho da bacia estudada. No entanto, as mudanças indicaram que o regime hidrológico da bacia sofreu alterações, pois o escoamento superficial e a vazão total possuem maior ligação com as características físicas do solo, que foram mantidas constantes.

Izady *et al.* (2015) aplicaram o modelo SWAT associado ao modelo MODular Finite-difference mode (MODFLOW), um modelador de fluxo de água subterrânea em 3D baseado em diferenças finitas, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e muito utilizado para simular e prever as condições de águas subterrâneas e as interações entre águas subterrâneas e água superficial. Os autores utilizaram o modelo combinado SWAT-MODFLOW, calibrados e validados com base em dados de vazão, produção de trigo, extração de água subterrânea e níveis de água subterrânea, para simular de forma integrada os fluxos de água superficial e subterrânea. Eles afirmam que o modelo SWAT apresentou previsões satisfatórias do balanço hídrico no exutório da bacia hidrográfica, bem como boas previsões da produção de trigo irrigado e extração de água subterrânea. Apontam ainda que a combinação dos modelos forneceu uma ferramenta robusta para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos em áreas com aquíferos estressados, onde a interação entre água subterrânea e água superficial não pode ser facilmente avaliada.

Zuo *et al.* (2016) empregaram o modelo SWAT para investigar os efeitos das mudanças no uso da terra e nas condições climáticas nas vazões da bacia do rio Huangfuchuan, na China. Focando no período de 1980 a 2005, analisaram a influência das alterações na cobertura do solo, predominantemente pastagem e agricultura, na produção de água e sedimentos na bacia. Os resultados indicaram uma tendência de redução na vazão anual e na carga sedimentar, sendo esta última mais afetada. Observou-se uma diminuição mais acentuada nas vazões a montante da bacia em comparação com as regiões mais próximas à saída. O impacto do uso da terra foi responsável por uma redução de 25,3% na vazão de água e de 40,6% na carga sedimentar, enquanto as mudanças climáticas contribuíram com 53,7% e 81,0%, respectivamente. A avaliação do modelo revelou um bom desempenho, com coeficientes de determinação e Nash-

Sutcliffe de 0,98 para a calibração e valores de 0,61 para ambos durante a validação, indicando sua aplicabilidade na área estudada.

Moura (2020) realizou um estudo que teve como principal objetivo calibrar e validar o modelo SWAT na bacia do rio Corumbataí-SP, visando analisar os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo na qualidade e quantidade de água da região. A modelagem hidrossedimentológica foi realizada com foco na simulação de diferentes cenários: o Cenário 1 representando a situação atual da bacia, o Cenário 2 com áreas de mineração, o Cenário 3 com respeito a 50 metros de mata ciliar e o Cenário 4 com transformação em florestas. Como resultados, a autora evidencia que o modelo SWAT apresentou bom desempenho na simulação da vazão, com valores de NS e R^2 satisfatórios, destacando-se na escala mensal. Para os nutrientes, o Pbias foi o índice que melhor classificou o desempenho do modelo. O Cenário 2 resultou na maior produção de sedimentos e escoamento superficial, enquanto o Cenário 3 indicou benefícios para a conservação dos recursos hídricos e o Cenário 4 demonstrou potencial para melhorias na qualidade da água e redução da erosão do solo.

Escobar; Carvalho-Santos (2022) aplicaram o SWAT na bacia hidrográfica do rio Homem, em Portugal, com o objetivo de avaliar a relação das alterações climáticas com os serviços ecossistêmicos e a produção de água e controle da erosão do solo. Para tal, os autores projetaram cenários climáticos hipotéticos para os anos de 2020 – 2050 baseados em modelos climáticos regionais e dois cenários de mudanças climáticas (RCP4,5 e RCP8,5). Eles afirmam que o modelo teve um bom desempenho após a calibração e validação, quando comparados os dados observados com os simulados (calibrados), para o volume mensal do reservatório, vazões mensais e diárias. Destacam ainda que em geral, projeções climáticas futuras preveem um aumento da temperatura na bacia do rio Homem e uma diminuição na precipitação com padrões sazonais marcados. A mudança climática pode influenciar a redução do rendimento total anual de água superficial, das vazões altas e baixas, especialmente durante a primavera e o outono e, verifica-se a tendência no aumento da erosão do solo. Apontam ainda que o volume do reservatório (Vilarinho das Furnas) apresenta projeção de diminuição do volume total, podendo interferir diretamente na produção de energia elétrica nos dois cenários analisados (RC P4,5 e RCP8,5).

Tavares (2023) realizou um estudo objetivando analisar o desempenho das simulações de vazões superficiais na bacia do rio Pajeú, em Pernambuco, utilizando dados de uso do solo obtidos por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para os anos 2002 e 2015. O modelo hidrológico SWAT foi utilizado para simular as vazões em duas etapas: uma

simulação sem ajuste de parâmetros e outra com parâmetros ajustados. Na análise estatística sem calibração, para o ano de 2002, foram encontrados os valores de $NSE = 0,27$ e $R^2 = 0,38$ e, para o ano de 2015 o $NSE = 0,01$ e $R^2 = 0,21$. Após a calibração os valores foram $NSE = 0,33$ e $R^2 = 0,45$ (2002) e $NSE = 0,21$ e $R^2 = 0,78$. Os resultados mostraram que a representação do uso do solo, obtida a partir do NDVI, influenciou significativamente a capacidade do modelo em simular as vazões, com melhorias observadas após a calibração dos parâmetros. A análise dos dados de NDVI permitiu uma melhor compreensão da dinâmica hídrica na bacia do rio Pajeú e contribuiu para aprimorar as ferramentas de gestão hídrica na região.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de Estudo

O trabalho foi realizado na bacia hidrográfica do rio Pardo (BHRP), inserida na Região Hidrográfica do Atlântico Leste. Representa uma extensa área, com aproximadamente 32.313 km², abrangendo 22 municípios do estado da Bahia e 13 municípios de Minas Gerais (Figura 1). A bacia localiza-se entre as coordenadas 14°36'50" e 16°08'03" de latitude Sul e 38°58'27" e 42°49'56" de longitude Oeste. O principal rio da bacia é o rio Pardo que possui aproximadamente 831,8 km de extensão, com a nascente no município de Montezuma, em Minas Gerais e a sua foz no Oceano Atlântico Sul, próximo ao município de Canavieiras-BA.

No âmbito do Território de Identidade do Sudoeste Baiano (TISB), a BHRP desempenha um papel crucial. Envolvendo uma área de aproximadamente 27.034,18 km². O TISB é composto por 24 municípios, incluindo Barra do Choça, Belo Campo, Cândido Sales, Encruzilhada, Planalto, Ribeirão do Largo, Tremedal e Vitória da Conquista, todos localizados nos limites da BHRP. A interligação entre o TISB e a BHRP não é apenas geográfica, mas também funcional, visto que a bacia fornece recursos hídricos essenciais para a região, sendo indispensável a gestão integrada dos recursos naturais para garantir o desenvolvimento sustentável dos municípios do TISB.

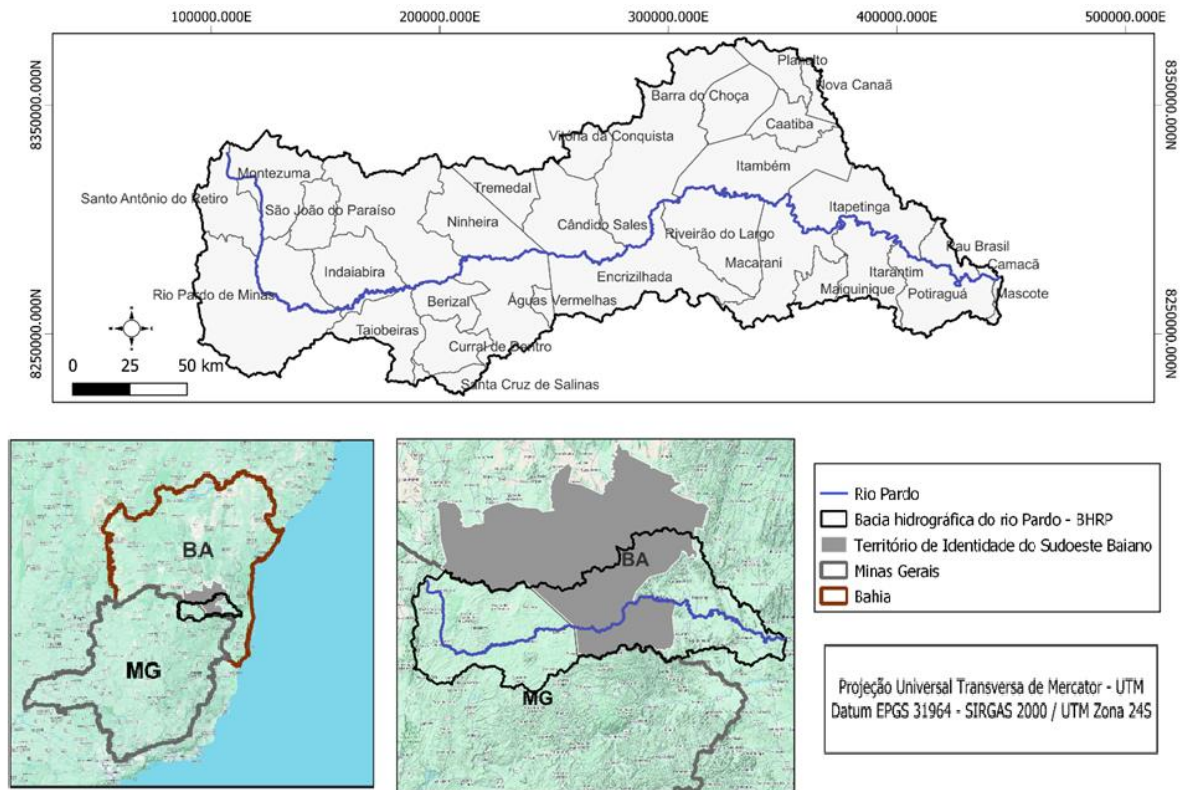


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pardo e do Território de Identidade do Sudoeste Baiano.

Quanto as condições climáticas na bacia, Kottek *et al.* (2006) e Alvares *et al.* (2013) salientam que a região onde a bacia hidrográfica do rio Pardo está localizada apresenta diferentes tipos climáticos de acordo com a classificação de Köppen. Os climas predominantes na região são os seguintes:

Clima Seco: típico da caatinga, com clima quente, chuvas concentradas no verão e períodos de seca no inverno.

Clima Tropical de Altitude: verões chuvosos e invernos secos, com altitudes superiores a 1000, com temperaturas acima de 22°C no mês mais quente e abaixo de 18°C no mês mais frio.

Essas classificações climáticas indicam a diversidade de climas presentes na região da bacia do rio Pardo, que abrangem desde climas tropicais úmidos, com e sem estação seca, até climas secos, e de altitude. Essa variedade de climas influencia a vegetação e os padrões de precipitação na região (IBGE, 2021).

4.2. Softwares utilizados no desenvolvimento do trabalho

A metodologia empregada neste estudo abrangeu a utilização de informações meteorológicas, parâmetros físicos do solo, dados relacionados à configuração do uso do solo e características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pardo. Esses elementos foram integrados na formulação do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), submetido a um cuidadoso processo de calibração e validação. Os softwares utilizados na elaboração dessa pesquisa estão descritos a seguir:

- Processamento dos dados de vazão das estações fluviométricas
 - SisCAH versão 1.0- Sistema Computacional para Análise Hidrológica desenvolvido pela rede de pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos composta pelas instituições de ensino superior Universidade Federal de Viçosa (instituição coordenadora), Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal do Espírito Santo, Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Elaboração e edição dos dados espaciais essenciais ao estudo
 - ArcGIS versão 10.8.2 - conjunto de software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute (ESRI);
 - QGIS versão 3.18.1 'Firenze' – SIG de código aberto desenvolvido pela Open Source Geospatial Foundation (OSGeo);
- Utilizado para elaboração do modelo hidrológico
 - Interface SWAT+ 2.3 para QGIS – desenvolvido pelo USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS);
- Inserção de dados climáticos, edição de informações e criação do modelo hidrológico
 - SWAT+ Editor 2.3 – desenvolvido pelo USDA.
- Utilizado para a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT+
 - SWAT+ ToolBox 1.0.5 – software de código aberto desenvolvido por James Celray Chawanda, Vrije Universiteit Brusse

O fluxo de trabalho seguiu as etapas apresentadas na Figura 2.

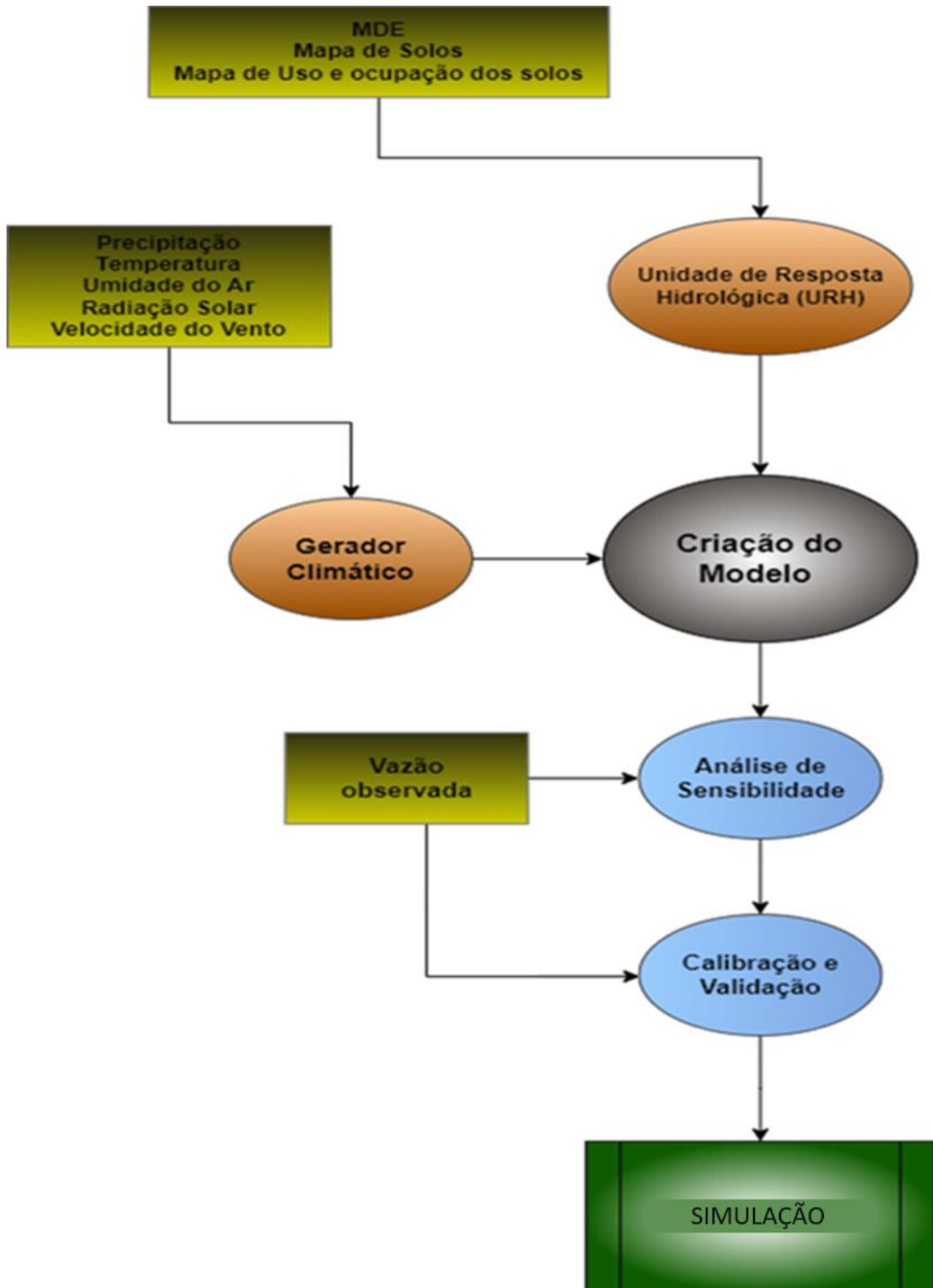


Figura 2: Fluxograma das etapas realizadas na simulação hidrológica.

4.3. Composição do banco de dados

4.3.1. Modelo Digital de Elevação e delimitação da BHRP

Os dados de altimetria utilizados foram do Projeto TOPODATA, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que compõe o Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Esse projeto, é o resultado da pesquisa/missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Através do QGIS as folhas 14S42ZN, 14S045ZN, 14S435ZN, 15S39ZN, 15S42ZN, 15S405ZN, 15S435ZN, 16S42ZN e 16S435ZN, com resolução espacial de 30 m e disponibilizadas pelo INPE no endereço eletrônico oficial, foram agrupadas formando um mosaico.

Para a etapa de tratamento do MDE formado pelo mosaico de folhas, objetivando melhorar a sua qualidade, foi utilizado o ArcGIS. O *raster* de elevação foi analisado de forma detalhada a fim de identificar as células ou pixels que não possuíam dados de elevação associados, ou seja áreas com valores *no data*. Essas células sem valores foram preenchidas por interpolação, utilizando o método bilinear. Isso foi feito através da análise dos valores dos quatro pontos vizinhos mais próximos (células adjacentes), tornando possível estimar os valores faltantes. A correção do MDE originou o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), possibilitando a extração da malha de drenagem, direção de fluxos, declividade do terreno e altimetria.

4.3.2. Mapa pedológico

O mapa pedológico representa as diferentes classes de solo em uma determinada área. O mapa de classes de solo da área da BHRP teve como base o levantamento dos dados de solo no Brasil realizado pela EMBRAPA – Solos e disponibilizados através do Projeto RADAMBRASIL¹.

Conforme pontua Neitsch *et al.* (2009), é fundamental na modelagem com o SWAT as informações pedológicas referentes tanto as classes de solo da bacia hidrográfica quanto as características físicas de cada uma dessas classes. Portanto, além de inserir o mapa pedológico da BHRP elaborado a partir dos dados do projeto RADAMBRASIL, também foi inserido no modelo as informações abaixo, que representam as características físicas do solo. Essas informações foram obtidas através dos estudos realizados com o SWAT por: Baldissera (2005); Fukunaga (2012); Lima *et al.* (2013); Moreira *et al.*, (2019).

¹ O Projeto RADAM, em operação entre os anos de 1970 e 1985, foi uma iniciativa pioneira realizada pelo governo brasileiro na década de 1970, desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia por meio do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNMP) com o intuito de coletar e compor um banco de dados, priorizando a coleta de dados de solos, vegetação, uso da terra e cartografia da Amazônia e áreas adjacentes da região Nordeste.

- SNAM: classificação do solo ou nome dado a cada classe;
- NLAYERS: número de horizontes a serem considerados por classe de solo;
- HYDGRP: grupo hidrológico do solo (A, B, C e D);
- SOL_ZMX: profundidade máxima das raízes (mm);
- SOL_Z: profundidade de cada horizonte (mm);
- SOL_BD: densidade do solo (g/cm^3);
- SOL_AWC: capacidade de armazenamento de água do solo (mm/mm);
- SOL_K: condutividade hidráulica saturada (mm/hr);
- SOL_CBN: conteúdo de carbono orgânico do solo (%);
- CLAY: porcentagem de argila no solo (%);
- SILT: porcentagem de silte no solo (%);
- SAND: porcentagem de areia no solo (%);
- ROCK: porcentagem de cascalho no solo (%);
- USLE_K: erodibilidade do solo ($\text{t.m}^2.\text{hr}/\text{m}^3.\text{t.cm}$).

O mapa de solos do Brasil, do Projeto RADAMBRASIL, com escala de 1:250.000, foi recortado pelos limites da BHRP, permitindo a identificação específica das classes de solos na área de interesse. Santos *et al.* (2018) afirmam que os solos são divididos por classe e apresentam níveis categóricos. Na BHRP foram encontradas as seguintes classes de solo: Argissolos Amarelos Distrocosos; Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos; Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos; Cambissolos Haplicos Ta Eutróficos; Cambissolos Haplicos Tb Distróficos; Chernossolos Argiluvicos Órticos; Espodossolos Ferrihumiluvicos Hidromórficos, Gleissolos Sálidos Sódicos; Latossolos Amarelos Distróficos; Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos; Latossolos Vermelhos Distróficos; Luvisolos Crômicos Pálidos; e Neossolos Litólicos Distróficos. Há uma predominância de Latossolos e Argissolos, ocupando, respectivamente, 49% e 29% (Figura 3).

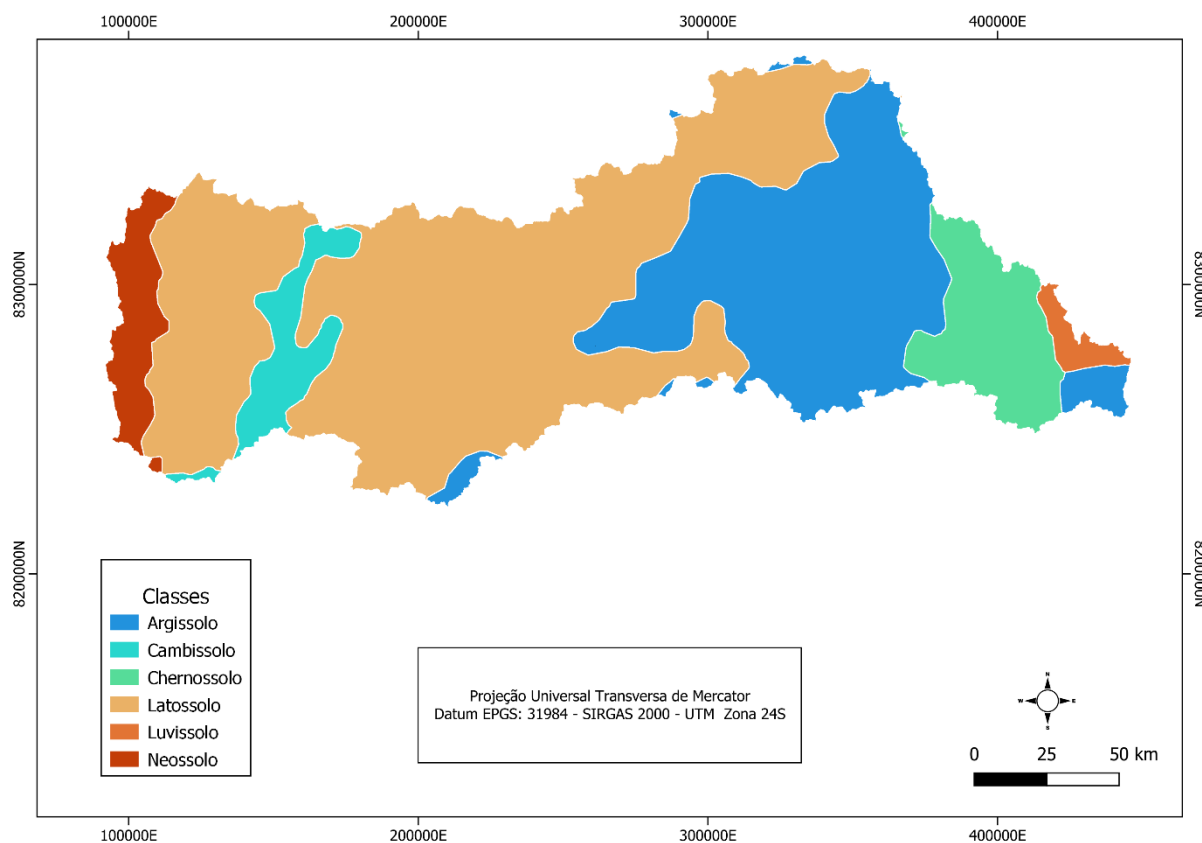


Figura 3 - Classes de solo encontradas na BHRP.

4.3.3. Mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo teve como base os dados e informações fornecidos pelo Projeto MapBiomias (SOUZA *et al.*, 2020). O projeto tem como propósito o mapeamento do uso e cobertura da terra em todo o território nacional, disponibilizando o resultado no endereço eletrônico oficial do projeto, permitindo-se acessar mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1987-2022 divididos em coleções. Para a confecção do mapa de uso e ocupação da BHRP foram utilizados os dados da Coleção 7. O recorte do mapa foi feito considerando a região do semiárido brasileiro, onde está inserida a bacia hidrográfica.

Para acessar os dados do MapBiomias, que foram processados na nuvem através da plataforma *Google Earth Engine*, foi necessário fazer o download direto da plataforma e do Google Drive, por meio de *Toolkits*. Além de realizar o *download* da Coleção 7, foi preciso baixar também o Código de Legendas, atribuindo cores aos diferentes usos do solo e facilitando a interpretação dos dados. Após reunir todas as informações necessárias o mapa de uso e ocupação da BHRP foi elaborado para o ano 2021 (Figuras 4).

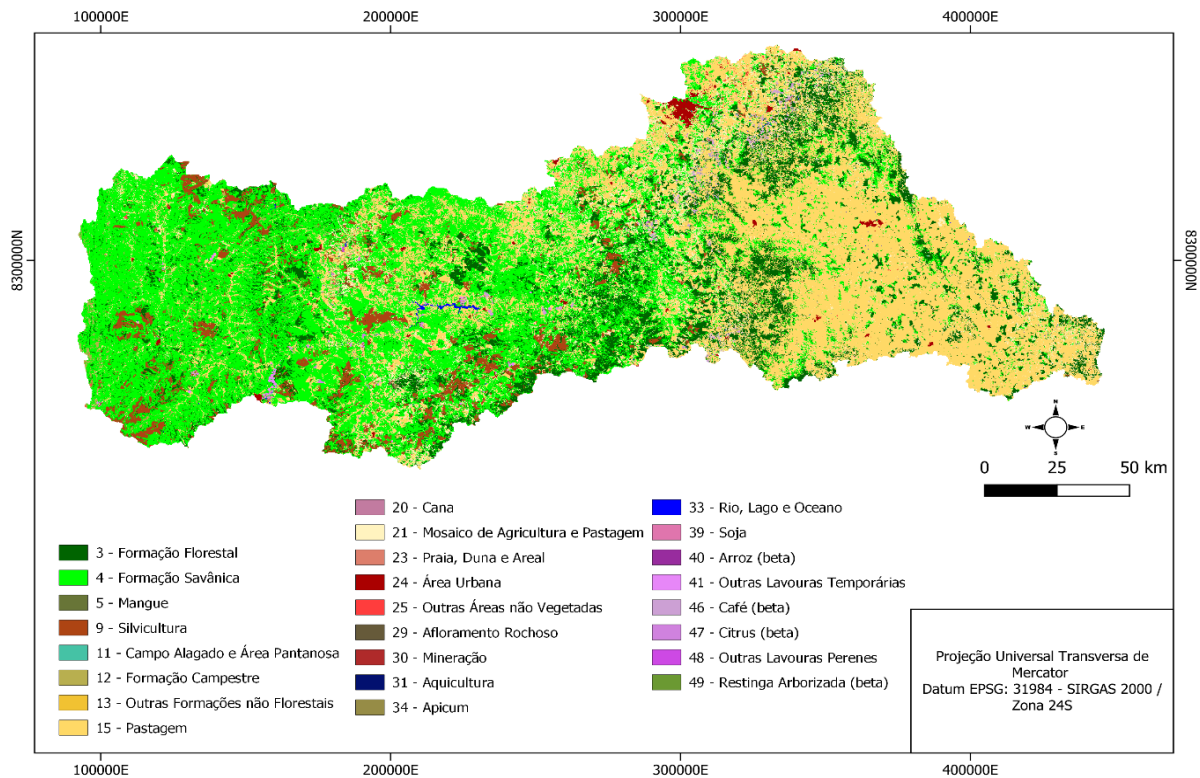


Figura 4 - Mapa de uso e cobertura da terra da BHRP para o ano de 2021.

O padrão (*default*) do modelo SWAT não possui as informações referentes aos usos e ocupação do Brasil, sendo necessário realizar uma reclassificação no mapa. Assim, o mapa atual foi reclassificado antes de ser inserido no modelo, agrupando os diferentes usos e ocupações do solo por similaridade (Tabela 2). A análise de forma detalhada das classes originais, a consulta ao banco de dados do modelo e a análise de estudos com o SWAT foram essenciais para garantir que a reclassificação fosse precisa e representativa. Isso exigiu um entendimento detalhado tanto do mapa de uso e ocupação do MapBiomias quanto do modelo SWAT. Sendo assim, criou-se um mapa mais simplificado e alinhado com as categorias reconhecidas pelo modelo SWAT, possibilitando a modelagem hidrológica da bacia em estudo (Figura 5).

Tabela 2: Chave de reclassificação do uso e ocupação do solo utilizado para a transformação da base dos dados do MapBiomias para a base de dados do modelo SWAT.

ID	Uso e ocupação (SWAT)	Código SWAT	ID	Uso e ocupação (MapBiomias)
1	Formação Florestal (vegetação nativa) - Forest Evergreen)	FRSE	3	formação florestal
			4	formação savânica
			12	formação campestre
2	Silvicultura - Eucalyptus	EUCA	9	silvicultura
			13	outras formações não florestal
3	Pastagem Pasture	PAST	15	pastagem
			20	cana

4	Agricultura - Agricultural Land	AGRL	21	mosaico de agricultura
			36	lavoura perene
			39	soja
			40	arroz
			41	outras lavouras temporárias
			43	café
			47	citrus
5	Infraestrutura urbana - Urban infrastructure	URHD	23	duna, praia, areal
			24	área urbana
			25	outras áreas não vegetadas
			27	não observado
6	Apicum – Wetland non forested	WETN	32	apicum
7	Mineração – Barren or sparsley vegetated	BSVG	30	mineração
8	Mangue - wetlands forested	WETF	5	mangue
			49	restinga arborizada
9	Corpo hídricos - Water	(WATR)	11	campo alagado, área pantanosa
			31	aquicultura
			33	rios, lagos, oceanos

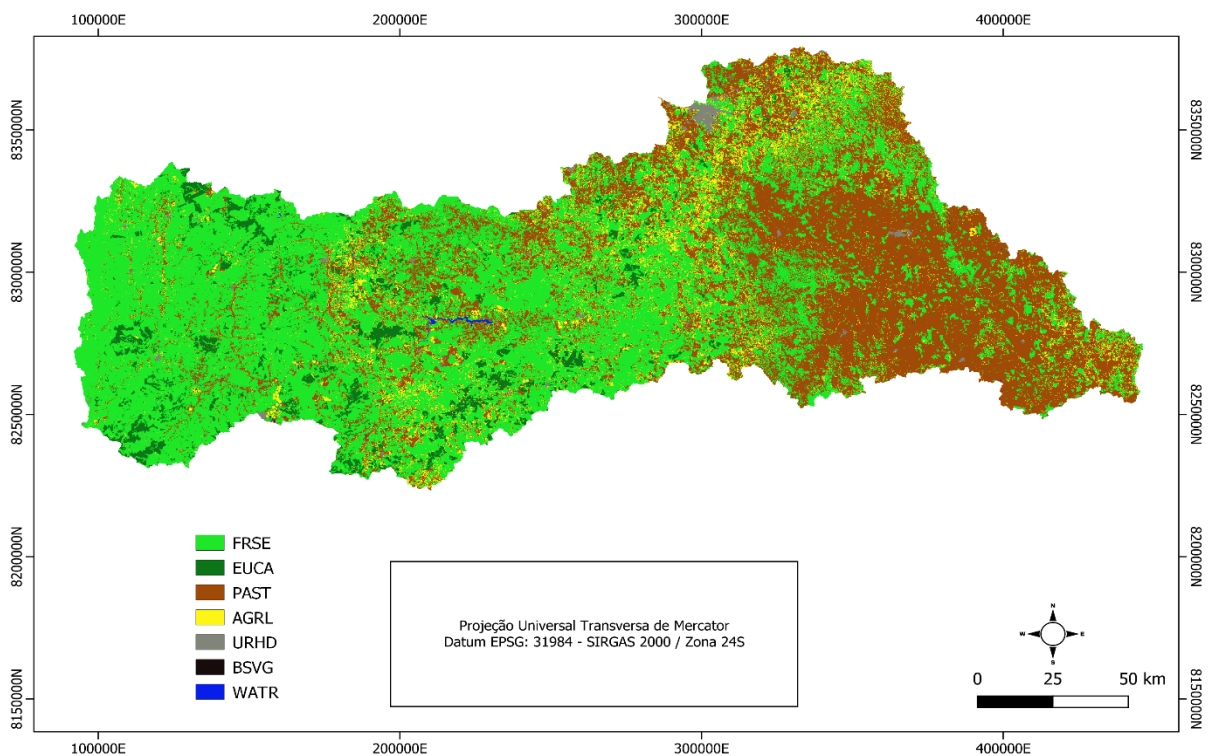


Figura 5 - Mapa de uso e cobertura da terra da BH do rio Pardo no ano de 2021, reclassificado da base do MapBiomas para as classes do SWAT, em que: FRSE – Forest Evergreen; EUCA – Eucalyptus; PAST – Pasture; AGRL – Agricultural Land; URHD - Urban infrastructure; BSVG - Barren or sparsley vegetated; e WATR – Water.

4.3.4. Dados climáticos e de vazão observada requeridos pelo modelo hidrológico SWAT

Para realizar a simulação o SWAT requer dados climáticos diários, incluindo precipitação (PCP - mm), temperatura máxima e mínima (TMP - °C), umidade relativa (HMD - %), radiação solar (RS - MJ m⁻²), velocidade do vento (WND - m s⁻¹), e dados observados de vazão (m³ s⁻¹). As estações utilizadas como base para obtenção dos dados de entrada requeridos pelo modelo encontram-se na Figura 6.

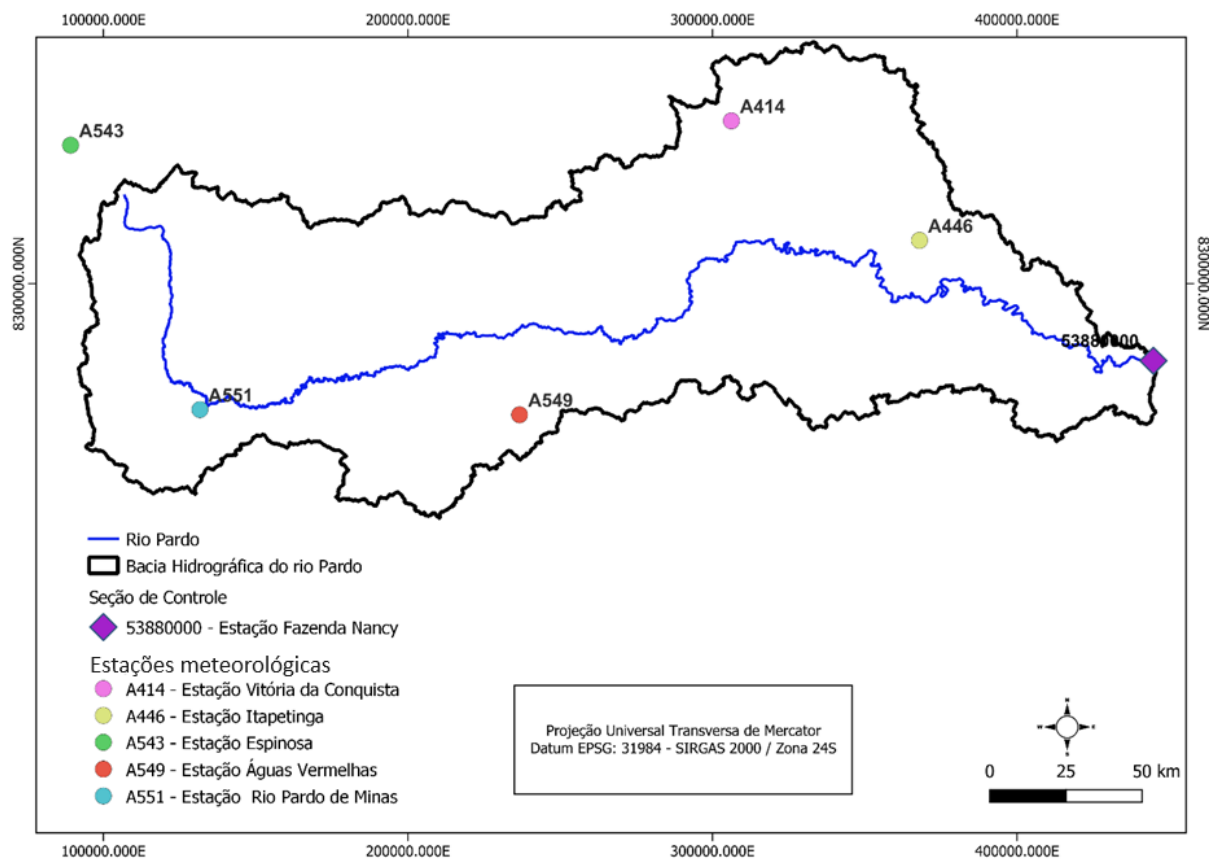


Figura 6: Localização das estações meteorológicas e fluviométrica utilizadas no estudo.

4.3.4.1. Dados de vazão

Os dados de vazão utilizados no desenvolvimento deste estudo foram de vazão média, em escala mensal, e foram aplicados para a calibração e validação do modelo. Os dados de vazão foram obtidos do banco de dados da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) por meio do portal HidroWeb e processados utilizando o Sistema Computacional para Análise Hidrológica (SisCAH). Para efetuar a calibração e validação do modelo SWAT, optou-se por utilizar os dados de vazão da estação Fazenda Nancy, que está localizada dentro dos limites da BHRP, com o código 53880000 e área de drenagem de 29.400 km².

4.3.4.2. Dados climáticos

O SWAT requer uma grande quantidade de dados diários para desenvolver um modelo hidrológico. Para realizar a simulação da bacia hidrográfica do rio Pardo (BHRP), foram utilizados os dados climáticos interpolados e compilados pelo professor e pesquisador da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alexandre Candido Xavier (Xavier *et al.*, 2022). Os dados interpolados consideraram as coordenadas de estações meteorológicas automáticas inseridas nos limites da BHRP e abrangeram o período de precipitação entre 01/01/2001 e 31/12/2022, e os dados de temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento entre 01/01/2001 e 31/07/2020.

Xavier *et al.* (2022) utilizaram informações de 3.625 estações climáticas disponíveis em todo o território nacional e, para compor o banco de dados climáticos utilizados no estudo, foram extraídos os dados nos limites da BHRP. Xavier *et al.* disponibilizam esses dados em grade NetCDF em escala diária, utilizando-se de medições das estações climáticas físicas fornecidas por instituições como a Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Departamento de Águas e Energia de São Paulo (DAEE). Os métodos de interpolação adotados, ponderação de distância angular (ADW) e ponderação do inverso da distância (IDW), foram validados através de uma análise cruzada. Com uma resolução de grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, as interpolações resultaram em 11.299 células para todo o território brasileiro, cada uma contendo um único valor central de precipitação obtido pela média aritmética não ponderada de 25 interpolações por célula, com intervalos de $0,05^\circ$ de distância.

Os dados climáticos passaram por um processo de organização e tratamento para garantir que todos abrangessem o mesmo período de anos. Os dados interpolados foram agrupados em arquivo .csv, por tipo de dado climático: precipitação, radiação solar, umidade relativa, temperatura (máxima e mínima) e velocidade do vento. Esses dados foram inseridos na ferramenta *SWAT Weather Database*, acessível por meio da interface com o Microsoft Access. Essa ferramenta, fornecida pelos desenvolvedores do modelo SWAT, tem como principal objetivo converter os dados climáticos brutos em um formato compatível com o modelo SWAT. Isso possibilita ao usuário inserir dados mais precisos e confiáveis no modelo.

Adicionalmente, foi utilizada a ferramenta WGNmaker4.1, macro escrita em Visual Basic e executada no Microsoft Excel. Essa ferramenta auxilia na criação de arquivos de dados climatológicos para uso no SWAT. O objetivo da ferramenta é gerar as variáveis climáticas requeridas pelo modelo e que possibilitam o preenchimento de falhas nas estações inseridas

quando realizada a simulação. As variáveis climáticas referentes aos dados hidrológicos da BHRP encontram-se no ANEXO I. O uso combinado das duas ferramentas fornece uma série de dados completa, com os dados faltantes preenchidos e no formato aceitável como entrada no modelo, evitando assim possíveis falhas de execução relacionadas a estrutura dos dados climáticos inseridos.

Além das variáveis climáticas, o modelo exige a localização exata das estações e o número de anos (não podendo ser inferior a uma década) de dados meteorológicos observados (Tabela 3 e 4), para que seja possível realizar o cálculo da precipitação máxima de meia hora no mês (BALDISSERA, 2005; NEITSCH *et al.*, 2011).

Tabela 3: Dados da estação necessários para modelagem hidrológica no SWAT.

WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIN_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados utilizados para o cálculo da RAINHHMAX

Tabela 4: Variáveis climáticas requeridas pelo modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição	Unidade de medida
PCPMM	Precipitação média	mm
PCPSTD	Desvio da precipitação	mm
PCPD	Número de dias de precipitação	dias
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas	mm
TMPMX	Temperatura máxima	°C
TMPMN	Temperatura mínima	°C
TMPSTDMX	Desvio da temperatura máxima	°C
TMPSTDMN	Desvio da temperatura mínima	°C
SOLARAV	Valor diário da energia solar	MJ m-2 dia-1
WNDVAV	Velocidade do vento	m/s
DEWPT	Temperatura no ponto de orvalho	°C
PR_W1	Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de seca	%
PR_W2	Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de chuva	%
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação máxima	-

4.4. Inserção dos dados hidroambientais

O projeto desenvolvido no SWAT tem uma base de dados (.sqlite) e abrange todas as modificações referentes ao solo, uso e ocupação do solo e ao clima. Empregou-se o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 24S, com datum SIRGAS 2000, como o padrão para a elaboração do trabalho, resultando na uniformização de todos os mapas e do MDE.

O SWAT +, interface com o QGis, foi utilizado para realizar a simulação hidrológica na BHRP. As etapas do modelo incluem: inserção do MDE; inserção dos mapas de classes do solo e uso

e ocupação do solo; inserção das tabelas com os dados e informações de solo e uso e ocupação do solo, que não constam no *default* do SWAT; determinação dos limiares para criação das unidades de resposta hidrológicas (URH); inserção dos dados climáticos no SWAT Editor; definição das condições de simulação (período de aquecimento e período de simulação) e; análise de sensibilidade, calibração e validação.

Na divisão da BHRP em sub-bacias foi definido o ponto de saída, coordenadas 15°36'14,27" de latitude Sul e 39°30'53,53" de longitude Oeste, a estação fluviométrica 5388000 (Fazenda Nancy) foi utilizada como seção de controle. Assim, a área de drenagem da bacia em estudo corresponde a área de drenagem da estação 5388000. A criação das Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs) envolveu a inserção de mapas de uso e ocupação do solo, juntamente com classes do solo e tabelas específicas da BHRP. Isso foi necessário devido ao fato de que o banco de dados padrão do SWAT contém apenas informações dos EUA. As URHs foram delimitadas de acordo com faixas de declividade do terreno, escolhendo-se faixas de 0-5%, 5-10%, 10-20% e >20%.

A criação de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) para as sub-bacias pode ser realizada de duas maneiras: i) através de uma única URH e; ii) adotando o modelo de URHs múltiplas. Na abordagem de URH única, cada sub-bacia será designada exclusivamente para uma URH, com base na classe predominante de uso do solo local. Por outro lado, ao escolher a opção de URHs múltiplas, é necessário especificar níveis de sensibilidade para o uso do solo, tipo de solo e declividade. No presente trabalho foi utilizado a opção múltiplas URHs - filtrar por uso solo, tipo de solo e declividade; com limiar de 10% para uso do solo, solo e declividade, sendo assim as classes que ocupam área inferior ao limiar não foram consideradas para a criação das URHs.

No SWAT+ Editor, foram inseridos os dados de localização das cinco estações utilizadas, juntamente com suas variáveis climáticas correspondentes. Os dados climáticos foram importados em uma escala diária e foram realizadas as simulações utilizando os dados interpolados por Xavier *et al.* (2022). A o período de abrangência dos dados interpolados, bem como o tempo de aquecimento e simulação do modelo encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Séries históricas e condições iniciais da simulação hidrológica.

	Série Histórica	Aquecimento	Simulação
Período	01/01/2001 - 31/12/2022	01/01/2001 - 31/12/2005	01/01/2006 - 31/12/2022
Tempo	22 anos	5 anos	17 anos

4.4.1. Simulação hidrológica inicial com o SWAT

A simulação inicial permitiu determinar qual o grupo de dados interpolados é mais adequado para utilização na simulação hidrológica com o SWAT. Essa análise comparativa entre os grupos de dados interpolados por Xavier *et al.* (2022) forneceu informações sobre o desempenho do modelo em relação a diferentes conjuntos de dados climáticos. Assim, a análise preliminar da simulação foi conduzida para interpretar o comportamento hídrico simulado, fornecendo suporte para a identificação de melhorias necessárias e a seleção de parâmetros influentes visando mitigar essas deficiências.

4.5. Análise de Sensibilidade

A definição dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade foi baseada em estudos anteriores (Fukunaga, 2012; Castro, 2013; Ferrigo, 2014; Abbaspour *et al.*, 2015; Amorim, 2016; Alves, 2018; Martins, 2020; Dill, 2021). Conforme aponta Abbaspour *et al.* (2015) os parâmetros comumente mais sensíveis são: CN2, SOL_AWC, ESCO, GWQMN (FLOW_MIN), GW_REVAP, REVAPMN, OV_N, SLSUBBSN (SLOPE_LEN) e HRU_SLP (SLOPE). A análise de sensibilidade para a BHRP foi realizada considerando os nove parâmetros que encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
ALPHA BF	Constante de recessão do escoamento de base
CANMX	Armazenamento máximo do dossel
CH_CN2	Coefficiente de Manning para o canal
CN2	Número da curva na condição II de umidade
EPCO	Fator de compensação do consumo de água pelas plantas
GW_REVAP	Coefficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado
SURLAG	Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias)

A análise de sensibilidade foi conduzida utilizando o SWAT+ ToolBox, empregando o método de Sobol. Este método, classificado como uma Análise de Sensibilidade Global, é reconhecido por sua eficácia na avaliação de modelos não lineares com um grande número de parâmetros. Ele permite a quantificação individual dos impactos dos parâmetros e de suas interações nos resultados do modelo, proporcionando uma compreensão mais profunda dos fatores que influenciam as saídas do modelo hidrológico (ZHANG *et al.*, 2013).

Na análise de sensibilidade foram definidas 55 amostras para cada parâmetro, totalizando 1100 iterações. Ao final da análise de sensibilidade foram considerados sensíveis os parâmetros com 5% de relevância, ou seja, com sensibilidade superior a 0.05 (DILL, 2021).

4.6. Calibração e validação

Na calibração do modelo SWAT, foram utilizadas três abordagens para ajustar os parâmetros dentro de limites definidos: substituição direta, adição e multiplicação (CASTRO, 2013). Na substituição direta, o valor do parâmetro é ajustado diretamente pelo modelo. Na abordagem de adição, um valor constante é somado ao valor inicial do parâmetro. Já na abordagem de multiplicação, o valor inicial do parâmetro é alterado por uma porcentagem, podendo ser tanto positiva quanto negativa, indicando uma variação percentual superior ou inferior ao valor inicial.

A calibração foi realizada por meio do método *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), disponível no SWAT+ ToolBox, com iterações visando maximizar a função objetivo NSE (Nash-Sutcliffe), a partir dos dados observados de vazão mensal. Tolson e Shoemaker (2007) definem o DDS como um algoritmo de otimização global para realizar a calibração automática de modelos hidrológicos. Na calibração do modelo hidrológico para a BHRP foi determinada a faixa de valores para cada parâmetro e foram inseridos os dados de vazão monitorada.

Os dados coletados na estação fluviométrica Fazenda Nancy ao longo de doze anos, de 2006 a 2017, em intervalos mensais, foram empregados na fase de calibração do modelo. Esta etapa envolveu a execução de 850 iterações para alcançar uma calibração automática. Após essa fase, foram realizadas diversas tentativas de calibração manual para refinar o modelo, isto é, para determinar os valores ideais dos parâmetros mais influentes. Uma vez ajustado, o modelo foi submetido a simulações adicionais, variando o período de dados observados para validar sua eficácia. Para a validação, foram utilizados dados do período de 2018 a 2022.

4.7. Índices de avaliação – testes estatísticos.

O desempenho do modelo SWAT foi avaliado utilizando estatísticas que fornecem resultados precisos, considerados como índices de avaliação do modelo. Os testes estatísticos empregados incluem o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação (R^2) e o percentual de viés das vazões simuladas em relação às monitoradas (Pbias). O índice de Nash-Sutcliffe evidencia o grau de ajuste entre os dados monitorados e os estimados pelo modelo. Moriasi *et al.*, (2007) afirmam que os valores do NSE podem variar de $-\infty$ a 1. O valor de 1 representa um ajuste perfeito entre os dados observados e os simulados pelo modelo. Valores

entre 0,51 e 1 são geralmente considerados aceitáveis, enquanto valores abaixo dessa faixa indicam falta de ajuste, ou seja, um desempenho ainda insatisfatório do modelo.

O coeficiente de determinação varia de 0 a 1 e indica a proporção da variação dos dados observados que é explicada pelo modelo. Valores acima de 0,5 são geralmente considerados aceitáveis, pois indicam menor variância do erro. Além disso, a tendência percentual (Pbias) é considerada ideal quando igual a zero. Valores positivos indicam uma superestimação dos valores simulados, enquanto valores negativos indicam uma subestimação desses valores (MORIASI *et al.*, 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$R^2 = 1 - \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)(S_i - \bar{S}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \right] \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

n – número de observações;

O_i – valores observados;

S_i – valores estimados pelo modelo;

\bar{O} – média dos valores observados;

\bar{S} – média dos valores simulados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Simulação hidrológica inicial

A simulação hidrológica inicial conduzida neste estudo teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo SWAT na representação das condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Pardo, utilizando-se de dados interpolados. Os dados interpolados foram subdivididos em três grupos distintos: (1) dados interpolados considerando as coordenadas de estações de monitoramento climático dentro dos limites da BHRP; (2) dados interpolados considerando a média global da BHRP e; (3) dados interpolados considerando o centroide de cada sub-bacia gerada pelo modelo SWAT. Essa subdivisão permitiu uma análise mais refinada do desempenho do modelo em relação aos dados climáticos interpolados (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados climáticos utilizados na simulação inicial com o modelo SWAT.

Simulação	Descrição
Simulação 1	Dados interpolados considerando as coordenadas das estações monitoradas nos limites da BHRP
Simulação 2	Dados interpolados considerando a média global da bacia hidrográfica do rio Pardo BHRP
Simulação 3	Dados interpolados considerando o centroide de cada sub-bacia gerada pelo modelo SWAT

Para compreender o comportamento do modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do rio Pardo, foi realizada uma comparação gráfica das vazões observadas e simuladas ao longo dos períodos representativos. A análise considerou período hidrológico de 2006 a 2022 para todos os grupos de dados interpolados. Além da análise visual dos hidrogramas, os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e de determinação (R^2) foram calculados para cada conjunto de dados interpolados. Essas métricas forneceram uma avaliação objetiva do desempenho dos diferentes conjuntos de dados em representar a realidade hidrológica da região.

Após a inserção dos dados espaciais, o modelo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Pardo foi estabelecido. A área de aplicação do modelo foi subdividida em 28 sub-bacias, ilustradas na Figura 7, e 2.212 unidades de resposta hidrológica (URHs). As URHs foram criadas a partir da combinação das características predominantes do solo, uso e ocupação do solo e declividade, com 10% de limiar para cada, ou seja, URHs que possuíam menos que 10% de tipos de solo, uso e ocupação do solo e declividade não foram utilizadas na simulação.

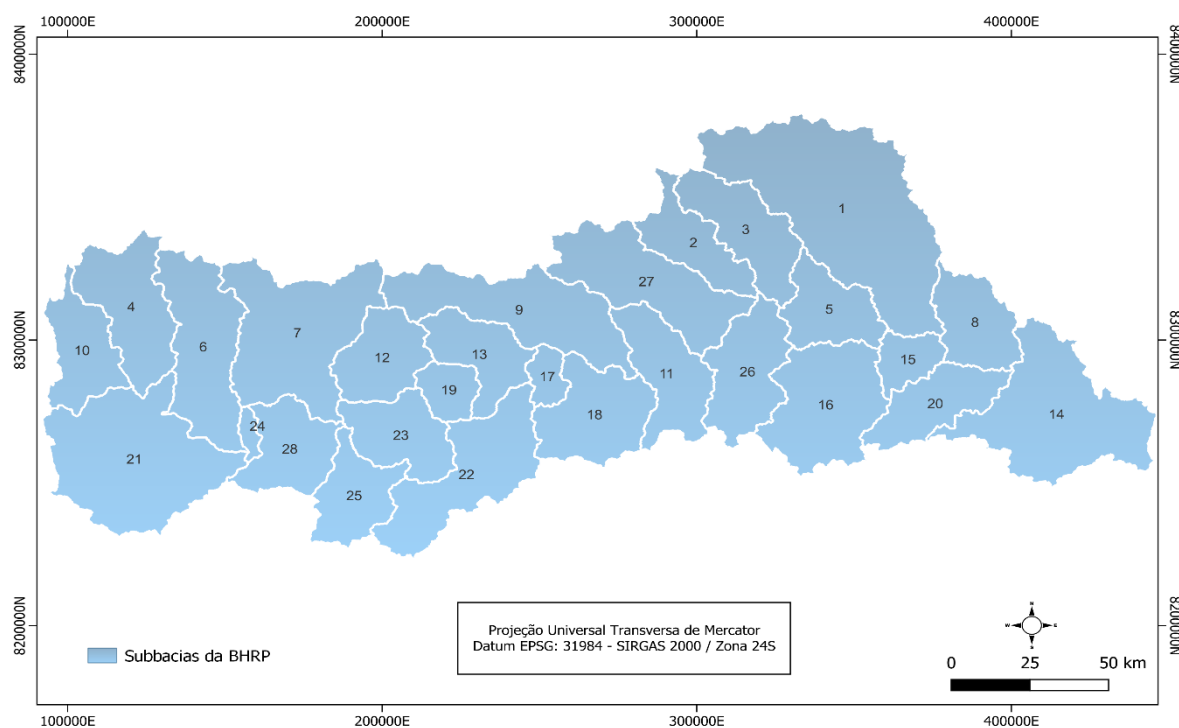


Figura 7 – Sub-bacias da BHRP geradas pelo modelo hidrológico SWAT.

Na simulação do modelo SWAT, as coordenadas do centroide de cada sub-bacia são utilizadas para determinar a estação meteorológica mais próxima, da qual serão extraídos os dados para simulação. Portanto, a escolha dos dados interpolados para serem comparados não se limita apenas à comparação com as coordenadas das estações que se encontram na BHRP, mas também considera o método de interpolação utilizado pelo modelo SWAT. Essa consideração é essencial para uma análise abrangente do desempenho do modelo em representar as condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Pardo.

Os resultados da simulação hidrológica utilizando os diferentes conjuntos de dados climáticos de entrada podem ser observados na Tabela 8. Os resultados são expressos em termos dos coeficientes de determinação (R^2) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), que são indicadores do desempenho do modelo em reproduzir as vazões observadas na BHRP e, são gerados pelo próprio modelo SWAT. Os valores dos coeficientes foram fornecidos pelo modelo após cada simulação. Os dados interpolados foram comparados, destacando as diferenças em seus desempenhos na representação das condições hidrológicas da bacia.

Tabela 8 – Coeficientes estatísticos e vazão média das simulações com os diferentes dados climáticos de entrada no SWAT.

Área de Drenagem	Limites das Áreas (%)	Dados Climáticos	Período	Vazão média (m ³ s ⁻¹)			
				R ²	NSE	Simuladas	Observada
29066 km ²	10 – 10 - 10	Simulação 1	2006 - 2022	0.01	-0.013	23.59	38.39
		Simulação 2		0.008	-1.31	104.94	
		Simulação 3		0.004	-3.762	166.84	

Os resultados das simulações indicam que a Simulação 1 se destaca por apresentar um valor de NSE mais próximo de zero, sugerindo uma estimativa mais precisa da vazão em comparação com as outras. No entanto, todas as simulações carecem de resultados satisfatórios, evidenciando a necessidade de ajustes nos dados climáticos ou no modelo de simulação. A Simulação 1 é a mais promissora, mas ressalta-se que são resultados preliminares e passíveis de aprimoramento com ajustes adicionais.

A análise visual dos hidrogramas complementou os resultados estatísticos, confirmando a correlação mais próxima da Simulação 1 com os dados reais de vazão. Assim, sugere-se que essa simulação oferece uma representação mais precisa das condições hidrológicas da bacia do rio Pardo, embasando avanços na modelagem hidrológica com o SWAT.

Tendo em vista a necessidade de ajustes no modelo para uma representação mais precisa do comportamento hidrológico da bacia, foi realizada uma calibração automática, seguido de sucessivas tentativas de calibração manual. Arnold et al. (2012) destacam a importância de dados climáticos abrangentes para uma calibração e validação satisfatórias do modelo SWAT, considerando tanto os anos úmidos quanto os secos para uma avaliação completa da variabilidade hidrológica ao longo do tempo.

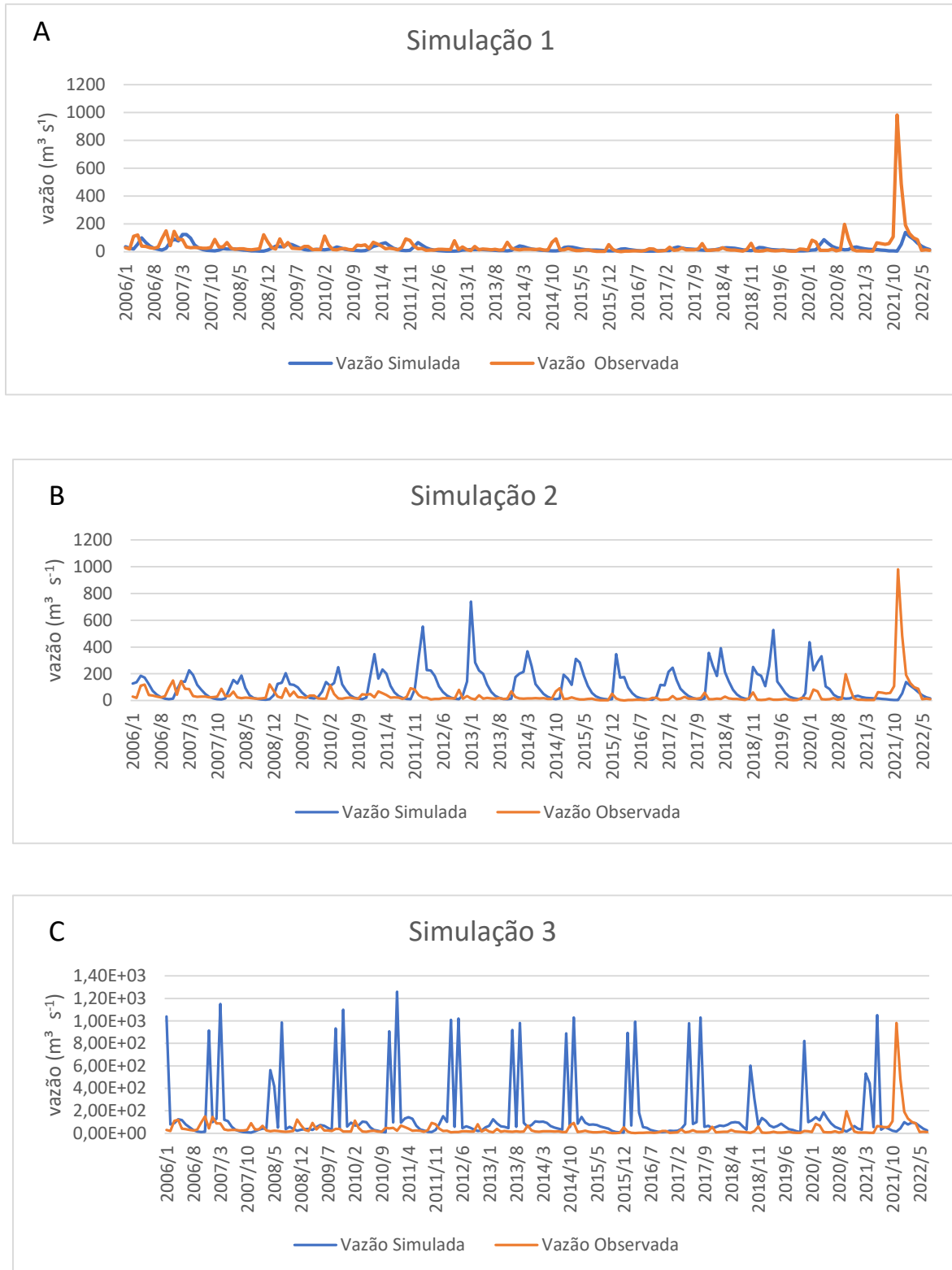


Figura 8 – Hidrogramas das simulações realizadas com os diferentes dados climáticos interpolados. A - Simulação 1; B - Simulação 2 e; C - Simulação 3.

5.2. Ajuste do modelo hidrológico na BHRP

A análise de sensibilidade permitiu a identificação dos parâmetros do modelo que exercem maior influência nas simulações hidrológicas, utilizando o conjunto de dados da Simulação 1 - dados interpolados considerando as coordenadas das estações monitoradas nos limites da BHRP. Essa análise proporcionou informações valiosas sobre a sensibilidade do modelo às variações nos dados de entrada, auxiliando na calibração mais precisa. Na fase de calibração, ajustou-se os parâmetros do modelo com o objetivo de otimizar a correspondência entre as simulações e os dados interpolados.

Na etapa de validação verificou-se a capacidade do modelo calibrado em reproduzir independentemente os padrões hidrológicos observados. Essa validação permitiu confirmar a confiabilidade do modelo em diferentes condições e sua capacidade de generalização além dos dados de calibração. Logo, ao apresentar os resultados desta fase de ajuste do modelo hidrológico, concentra-se a análise no conjunto de dados que melhor se ajustou ao modelo, destacando suas vantagens e discutindo sua capacidade de representar fielmente a dinâmica hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pardo após a calibração.

5.2.1. Análise de sensibilidade

Para determinar a relevância dos parâmetros, adotou-se o critério de considerar aqueles com sensibilidade superior a 0,05, equivalente a 5% de relevância, conforme destacado por Dill (2021). Considerando a entrada dos dados do modelo com os interpolados utilizados na Simulação 1, a análise de sensibilidade foi realizada utilizando-se nove parâmetros. Após 1.100 iterações o resultado da análise evidenciou sete parâmetros sensíveis, conforme apresentado na Tabela 9. Essa abordagem possibilitou identificar os parâmetros com influência significativa, ressaltando a importância de uma análise abrangente e iterativa para priorizar os parâmetros mais relevantes e garantir uma calibração precisa do modelo.

Tabela 9 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros na execução da análise de sensibilidade.

CLASSIFICAÇÃO	PARÂMETRO	SENSIBILIDADE
1	CN2	0,262205599
2	SURLAG	0,138180351
3	GW_REVAP	0,126447052
4	CH_CN2	0,098334326
5	EPCO	0,072655186
6	SOL_AWC	0,040008444
7	ALPHA BF	0,005925037
8	SOL_K	-0,067339666
9	CANMX	-0,091736371

Para garantir a representatividade dos parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade na BHRP, foram adotadas medidas específicas. A seleção criteriosa dos parâmetros levou em consideração tanto a relevância teórica quanto prática de cada um em relação aos processos hidrológicos específicos da bacia. Esse enfoque contribuiu para garantir que os parâmetros escolhidos fossem verdadeiramente representativos para a BHRP.

Ao analisar os resultados da sensibilidade dos parâmetros do modelo hidrológico na BHRP, destacam-se alguns parâmetros chave que exercem influência significativa na calibração e validação do modelo SWAT. Por exemplo, o CN2, que representa o número da curva para a condição de umidade antecedente II, é frequentemente identificado como um dos parâmetros mais sensíveis em estudos com o modelo SWAT. Pesquisas realizadas por Amorim (2016) e Alves (2018) na bacia do rio Catolé Grande, sub-bacia do rio Pardo, corroboram a sensibilidade desse parâmetro, indicando sua importância na modelagem hidrológica da BHRP.

Além disso, o SURLAG, coeficiente de retardo do escoamento superficial, desempenha um papel crucial na regulação do escoamento para o canal principal em bacias hidrográficas com tempo de concentração elevado, conforme destacado por NEITSCH *et al.* (2005). Essa variável influencia diretamente o retardo do escoamento superficial, afetando, por conseguinte, toda a dinâmica hidrológica da bacia.

Em áreas extensas, como na BHRP, o SURLAG pode exercer uma influência significativa nessa dinâmica. No estudo conduzido por Neto (2018), foram encontrados valores de fator de forma (Kf), índice de compactidade (Kc) e índice de circularidade (Ic) de 0,185, 3,338 e 0,088, respectivamente, evidenciando a tendência de conservação da precipitação na BHRP. Portanto, é razoável que o parâmetro SURLAG apresente sensibilidade.

O parâmetro GW_REVAP, coeficiente de ascensão de água à zona de saturação, também demonstrou alta sensibilidade em estudos com o modelo SWAT. Por exemplo, Castro (2013) identificou alta sensibilidade desse parâmetro em análises realizadas em bacias do Distrito Federal, bioma cerrado, ressaltando sua relevância na calibração do modelo. Além disso, o CH_N2, que representa o coeficiente de curva para o CN2, o EPCO, que indica a evaporação potencial máxima, e o SOL_AWC, que indica a capacidade de água disponível no solo, são parâmetros com certa sensibilidade e que demandam atenção durante o processo de calibração e validação do modelo SWAT na BHRP.

O ALPHA BF, que representa a taxa na qual a água subterrânea retorna ao rio, apresentou baixa sensibilidade, entretanto os estudos realizados por Baldissera (2005) e Paim e Menezes (2009), evidenciam sua importância na representação dos processos hidrológicos. Ainda, o SOL_K, que indica a condutividade hidráulica do solo, e o CANMX, responsável pela quantidade máxima de água interceptada pelas plantas, são parâmetros que apresentam sensibilidade significativa, como constatado por Lubitz (2009), Lino (2009), Aguiar (2011) e Fukunaga (2012). Esses parâmetros influenciam diretamente a dinâmica da água no solo e sua interação com a vegetação, afetando a resposta do modelo hidrológico. Portanto, a interpretação detalhada da sensibilidade desses parâmetros permite compreender como suas variações afetam as saídas do modelo, contribuindo para uma calibração mais precisa e uma representação fiel do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Pardo.

5.2.2. Calibração e Validação

A calibração do modelo SWAT na BHRP foi realizada considerando a escala mensal da vazão, de forma automática e manual. O período utilizado para a calibração do modelo foi de 01/01/2006 a 31/12/2016. Os dados de vazão utilizados para a calibração correspondem a estação fluviométrica do ponto da seção de controle (estação Fazenda Nancy). Optou-se por utilizar os nove parâmetros considerados na análise de sensibilidade (Tabela 6) na calibração e validação do modelo para a BHRP.

Foi realizada uma tentativa de calibração automática, seguida de sucessivas tentativas de calibração manual. Castro (2013) e Oliveira (2014) destacam a dificuldade da calibração e sua necessidade para representar adequadamente a realidade da bacia em estudo, enquanto Fukunaga (2012) e Tavares (2023) relatam os desafios e melhorias observadas após o ajuste dos parâmetros do modelo. Gupta *et al.*, (1999) apontam que a calibração manual é um método demorado e desafiador, mas defendem o uso combinado com a calibração automática.

Durante a etapa de calibração automática, conduzida com 850 iterações e visando aprimorar o ajuste do modelo às características da BHRP, o valor da função objetivo NSE encontrado foi de 0,45, ainda abaixo do esperado e considerado insatisfatório. Como não houve ajuste do modelo na tentativa de calibração automática, o próximo passo recomendado seria considerar uma nova tentativa de calibração automática, aumentando o número de iterações para buscar um melhor ajuste. Alternativamente, seria viável dar seguimento realizando tentativas de calibração manual, partindo dos parâmetros considerados mais sensíveis, a fim de explorar detalhadamente as características do modelo e otimizar sua capacidade de reprodução da vazão observada.

Optou-se por prosseguir com a calibração manual e, após diversas tentativas de ajuste, com modificações individuais dos parâmetros, chegou-se a um valor da função objetivo NSE de 0,59. Os valores dos parâmetros ajustados nesta calibração encontram-se na Tabela 10 e Figura 10.

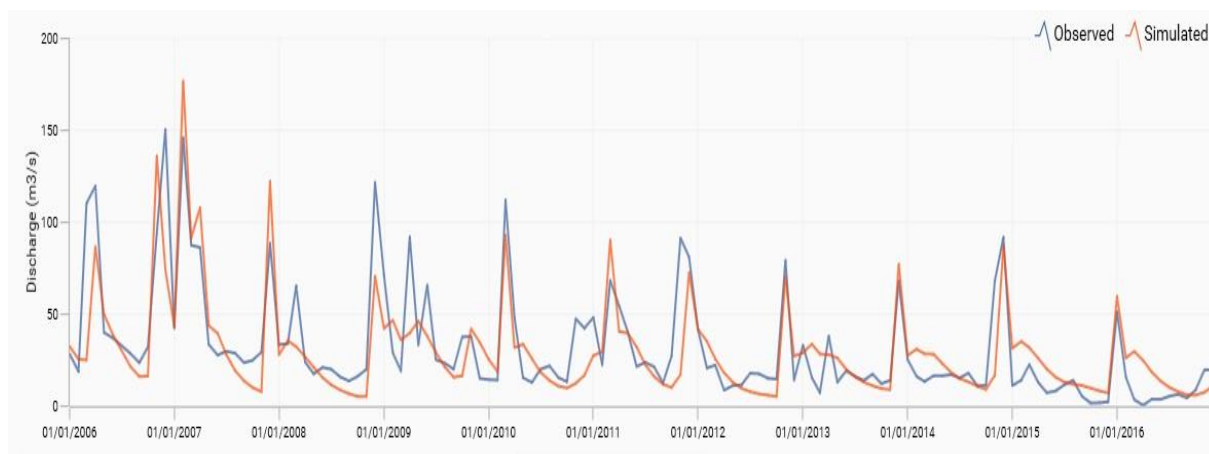


Figura 9 – Hidrograma, gerado no SWAT+ ToolBox, das vazões observadas e simuladas após a calibração do modelo.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros ajustados após o processo de calibração do modelo.

Parâmetro	Valor de ajuste	Método de alteração	Processo
ALPHA BF	0,063	Substituição direta	Água subterrânea (.gw)
CANMX	0,562	Substituição direta	Geração de escoamento (.hru)
CH_CN2	0,080	Substituição direta	Sub-bacia (.rte)
CN2	29,650	Porcentagem multiplicada ao valor padrão	Escoamento Superficial (.hru)
EPCO	0,050	Substituição direta	Geração de escoamento (.hru)
GW_REVAP	0,086	Substituição direta	Água subterrânea (.gw)
SOL_AWC	-7,715	Porcentagem multiplicada ao valor padrão	Características do solo (.sol)
SOL_K	58,208	Porcentagem multiplicada ao valor padrão	Características do solo (.sol)
SURLAG	5,310	Substituição direta	Geração de escoamento (.hru)

No hidrograma gerado após a calibração, ilustrado na figura 10, é possível visualizar que o modelo hidrológico conseguiu ajustar as vazões de pico, com pequena subestimação em meses específicos nos anos de 2006, 2009 e 2012. No entanto, o modelo ainda se mostra limitado em representar as vazões de recessão. Esse aspecto destaca a necessidade contínua de refinamento do modelo e a consideração de possíveis melhorias para uma representação mais precisa do comportamento hidrológico da bacia.

Durante o processo de calibração do modelo SWAT os parâmetros foram ajustados considerando as condições e características da BHRP. Um desses parâmetros foi o CN2, cujo valor padrão foi aumentado em aproximadamente 30%, com o intuito de aumentar o escoamento superficial e reduzir a infiltração. Essa modificação foi essencial para garantir que o modelo reproduzisse de forma mais precisa o comportamento hidrológico da bacia em resposta às condições climáticas e à cobertura do solo.

Além disso, o coeficiente de retardo do escoamento superficial (Surlag) foi ajustado, com um valor alterado para 5,3 dias. Essa mudança levou em consideração a resposta lenta da bacia ao escoamento superficial, resultante de sua forma alongada e da extensão considerável de sua área. É importante destacar que as alterações no parâmetro Surlag têm um impacto significativo na infiltração e na quantidade de água armazenada na bacia hidrográfica, contribuindo para suavizar o hidrograma e melhorar a representação dos processos hidrológicos.

Outra modificação realizada durante a calibração foi no parâmetro Canmx, que controla a evapotranspiração na bacia do rio Pardo. Essa adaptação foi feita com o objetivo de ajustar a estimativa da evapotranspiração no modelo, levando em conta as características específicas da vegetação e do clima da região da BHRP. Para aumentar o fluxo de base e garantir uma representação mais precisa do movimento da água no solo, foram realizados ajustes nos parâmetros do modelo.

O parâmetro SOL_K, que representa a condutividade hidráulica do solo saturado, também foi modificado no processo de calibração. Apesar de apresentar baixa sensibilidade ao modelo que representa as condições na BHRP, o parâmetro teve um impacto significativo na dinâmica hidrológica, especialmente durante os meses secos. Essa alteração foi essencial para evitar que fosse subestimada a vazão de base, corrigindo uma falha anterior que resultava em valores de vazão de base igual a zero em períodos de baixa precipitação.

Além disso, foram feitos ajustes em outros parâmetros relacionados à interação entre a superfície do solo e o aquífero subterrâneo. O parâmetro ALPHA_BF, que representa a constante de recessão do escoamento de base, foi calibrado para garantir uma resposta adequada do modelo aos fluxos de água subterrânea. Também foram feitas adaptações no parâmetro GW_REVAP, que controla o coeficiente REVAP da água subterrânea, influenciando diretamente a taxa de evaporação da água subterrânea de volta para a atmosfera.

Essas modificações permitiram uma melhor representação do comportamento hidrológico da bacia durante os períodos de seca, aumentando a vazão mínima e melhorando a precisão das

simulações do modelo SWAT. Ao ajustar esses parâmetros, foi possível corrigir as deficiências do modelo e obter resultados mais confiáveis, garantindo uma representação mais precisa dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Pardo.

A validação do modelo ocorreu utilizando os dados de vazão para o período de 2017 a 2022, sendo o valor da função objetivo NSE encontrado de 0,51 (Figura 10). Segundo Moriasi *et al.* (2007) os valores de NSE encontrados na calibração e validação caracterizam o modelo como satisfatório. Portanto, analisando os valores da função objetivo NSE e dos demais índices estatísticos, conforme apresentado na Tabela 11, pode-se inferir que o modelo simula a vazão média mensal na BHRP de forma satisfatória.

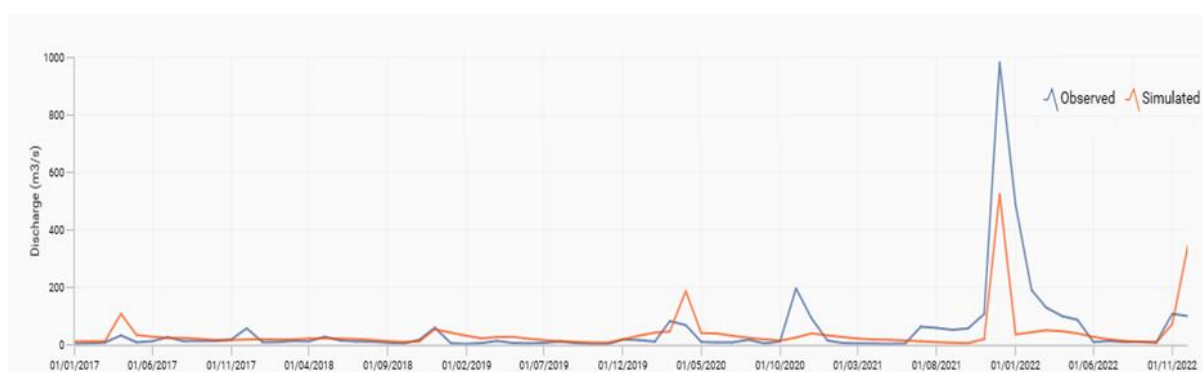


Figura 10 – Hidrograma, gerado no SWAT+ ToolBox, das vazões observadas e simuladas após a validação do modelo.

Tabela 11 – Valores encontrados na análise estatística nas etapas de calibração e validação com os dados interpolados.

ÍNDICES	CALIBRAÇÃO	DESEMPENHO	VALIDAÇÃO	DESEMPENHO
NSE	0.59	SATISFATÓRIO	0.51	SATISFATÓRIO
PBIAS	6.4	MUITO BOM	24.6	SATISFATÓRIO
R²	0,72	BOM	0,66	SATISFATÓRIO

Os valores das vazões médias simuladas e observadas para os períodos de calibração e validação estão apresentados na tabela 12. Em média, o modelo subestimou a vazão para o período de calibração em torno de 6% e, superestimou a vazão para o período de validação em cerca de 10%. Embora para o período de validação os índices estatísticos apresentem valores que apontam um ajuste mais moderado do modelo, os valores encontrados tanto na calibração quanto na validação permitem o estudo da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Pardo.

Tabela 12 – Vazões médias observadas e simuladas.

Etapa	Vazão média (m ³ s ⁻¹)	
	Observada	Simulada
Calibração	31.9	30.1
Validação	34.7	38.5

5.3. Análise das características físicas da BHRP

Os resultados da distribuição de uso da terra na BHRP, como mostrado na Tabela 13, são essenciais para compreender a dinâmica hidrológica e os processos de escoamento na região. A maior parte da área da bacia é coberta por Floresta Secundária (FRSE), representando mais da metade da área total da bacia (52,67%). A maior parte dessa cobertura do solo é encontrada no estado de Minas Gerais. Essa predominância de florestas secundárias tem um impacto significativo na recarga de águas subterrâneas e na conservação do solo, devido à capacidade dessas áreas em reter água e reduzir a erosão.

Tabela 13 – Distribuição dos percentuais de áreas e os respectivos usos e ocupação do solo, gerado pelo SWAT na BHRP

USO DO SOLO	ÁREA (km ²)	% da BHRP
FRSE	15.310,85	52,67%
PAST	9.865,86	33,94%
AGRL	23.05,54	7,93%
EUCA	1.328,53	4,57%
URHD	213,49	0,73%
WETW	40,94	0,14%
BSVG	1,43	0,01%
Total	29.066,65	100,00%

Em que: FRSE – Forest Evergreen; EUCA– Eucalyptus; PAST – Pasture; AGRL – Agricultural Land; URHD - Residential High Density; BSVG - Barren or sparsley vegetated; e WATR – Water.

A presença significativa de áreas de Floresta Secundária na BHRP desempenha um importante papel na regulação dos fluxos de água na bacia. Essas áreas possuem uma alta capacidade de retenção de água no solo devido à sua densa cobertura vegetal e à presença de matéria orgânica em decomposição. Como resultado, contribuem para a recarga de aquíferos e mananciais, além de reduzirem a erosão do solo, promovendo a estabilidade do ecossistema e a conservação da biodiversidade (PEREIRA, 2020).

Além disso, as Pastagens (PAST) abrangem uma parcela considerável da área da bacia, ocupando 33,94% do território, em sua maioria no estado da Bahia. Isso sugere uma extensa utilização de terras para atividades pecuárias na região, o que pode influenciar a qualidade da

água e a erosão do solo, especialmente nas áreas onde a vegetação natural foi substituída por pastagens.

As extensas áreas de pastagem na BHRP representam uma importante forma de uso da terra, principalmente para economia referente as atividades pecuárias. No entanto, o manejo inadequado dessas áreas pode resultar em problemas relacionados à qualidade da água e à erosão do solo. Dias (2013) indica que a remoção da vegetação natural para dar lugar às pastagens pode aumentar o escoamento superficial e a carga de sedimentos nos corpos d'água, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos e impactando negativamente o ambiente.

As áreas destinadas à agricultura na BHRP desempenham um papel importante papel na produção de alimentos e no desenvolvimento econômico da região. Embora a agricultura corresponda apenas 7,9 % da área total da bacia, cerca de 95 % da vazão consumida na BHRP é destinada a agricultura (SANTOS, 2017). No entanto, práticas agrícolas intensivas podem resultar em impactos negativos no ciclo hidrológico, como a compactação do solo, o aumento da erosão e o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, que podem contaminar os recursos hídricos (VALVASORI, 2018). Portanto, a gestão sustentável dessas áreas é essencial para mitigar esses impactos e garantir a disponibilidade de água de qualidade para as gerações futuras.

As plantações de eucalipto na BHRP são comuns e têm sido uma fonte importante de matéria-prima para a indústria de papel e celulose. Embora essas plantações possam contribuir para a economia regional, elas também podem afetar os recursos hídricos de várias maneiras. Mosca (2008) afirma que o eucalipto possui um sistema radicular profundo que pode aumentar a infiltração de água no solo, mas também pode competir com outras espécies vegetais nativas, alterando a composição e a estrutura do ecossistema local.

As áreas urbanas na BHRP representam centros de atividade humana e concentram uma série de atividades e infraestruturas que podem impactar significativamente os recursos hídricos locais. Apesar de representar uma área de menos de 1% da BHRP, as áreas urbanas podem influenciar direta ou indiretamente a dinâmica hidrológica da bacia. Moura (2018) aponta que o aumento da impermeabilização do solo devido à pavimentação e construção de edifícios pode levar a um aumento do escoamento superficial e da incidência de enchentes. Além disso, o descarte inadequado de resíduos sólidos e efluentes domésticos pode contaminar os corpos d'água e comprometer a qualidade da água para consumo humano e atividades recreativas.

Os resultados da distribuição de tipos de solo na BHRP, conforme apresentados na Tabela 14, são fundamentais para compreender a dinâmica hidrológica e os processos de infiltração e escoamento na região. A maior parte da área da bacia é composta por Latossolos, representando mais da metade da área total (53,97%). Esses solos caracterizam-se por sua alta fertilidade natural e capacidade de retenção de água, o que pode influenciar significativamente os processos hidrológicos, como a recarga de aquíferos e a disponibilidade de água para as plantas.

Tabela 14 – Distribuição dos percentuais de áreas e os respectivos tipos de solos, gerado pelo SWAT na BHRP.

TIPO DE SOLO	ÁREA (km²)	% da BHRP
Latossolo	15.686,14	53,97%
Argissolo	8.188,29	28,17%
Chernossolo	2.322,36	7,99%
Cambissolo	1.289,24	4,44%
Neossolo	1.217,75	4,19%
Luvissolo	362,87	1,25%
Total	29.066,65	100,00%

Os Argissolos também ocupam uma parte considerável da área da bacia, abrangendo 28,17% do território. Dos Santos (2018) afirma que esses solos são conhecidos por sua alta capacidade de drenagem e textura média a argilosa, o que pode afetar a infiltração da água no solo e o escoamento superficial. A presença significativa de Argissolos na região pode influenciar a distribuição espacial da umidade do solo e a resposta hidrológica às precipitações.

Os Latossolos são solos altamente intemperizados, caracterizados por sua textura predominantemente argilosa e por serem solos profundos ou muito profundos e bem drenados (BALDISSERA, 2015). Suas propriedades, como baixa capacidade de troca catiônica e forte acidez, influenciam diretamente os parâmetros calibrados no modelo SWAT.

O parâmetro CN2 é fortemente influenciado pela textura dos Latossolos. Silva (2011) destacou sua sensibilidade ao aplicar o modelo SWAT na bacia do rio Descoberto, enquanto Correa (2018) também o identificou como o parâmetro mais sensível na bacia do rio Tapajós, onde os Latossolos predominam. Devido à alta porosidade e baixa capacidade de retenção de água desses solos, a taxa de infiltração tende a ser menor, resultando em maior escoamento superficial. Assim, ao calibrar o CN2 para modelos SWAT em áreas com Latossolos, é essencial considerar essa característica para uma representação precisa do escoamento superficial.

O parâmetro SURLAG, também pode ser influenciado pela textura e pela drenagem dos Latossolos. Devido à sua capacidade de drenagem relativamente alta, os Latossolos geralmente têm um tempo de resposta mais rápido ao escoamento superficial em comparação com solos

mais imperfeitamente drenados (SANTOS, 2018). Portanto, ajustes nos valores do SURLAG podem ser necessários para capturar adequadamente o atraso no escoamento superficial em áreas com Latossolos.

Além disso, parâmetros como GW_REVAP e SOL_K também podem ser influenciados pelas características dos Latossolos, como sua capacidade de armazenamento de água e sua estrutura porosa. A alta porosidade dos Latossolos pode resultar em uma taxa de recarga de água subterrânea diferente em comparação com solos com estrutura mais compacta. Portanto, ajustes específicos nesses parâmetros são necessários para uma modelagem hidrológica precisa em áreas com Latossolos.

Conforme destaca Schlesner (2022), os argissolos são caracterizados por uma textura que varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt. Nesses solos, há um aumento gradual da concentração de argila do horizonte A para o horizonte Bt. Além disso, são solos de forte a moderadamente ácidos, com saturação por bases alta ou baixa. Essas características podem influenciar os parâmetros calibrados no modelo SWAT.

Os Argissolos têm uma ótima capacidade de drenagem devido à sua porosidade e ao alto teor de argila. Isso significa que eles absorvem água muito bem, o que ajuda a reduzir o escoamento superficial e, por consequência, a erosão do solo (SILVA *et al.*, 2006). A textura do solo também afeta o parâmetro CN2, que é essencial para representar a capacidade de infiltração no modelo SWAT. Para garantir que o escoamento superficial seja modelado com precisão em Argissolos, é necessário ajustar o valor do CN2 de acordo com a variação na textura do solo.

6. CONCLUSÕES

A aplicação do modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do rio Pardo utilizando dados climáticos interpolados demonstrou ser uma abordagem eficaz para simular os processos hidrológicos da região. A simulação proporcionou uma compreensão aprofundada das interações hidrológicas, evidenciando a complexidade do escoamento e do armazenamento de água na bacia, influenciados por fatores como topografia, uso do solo e características climáticas. A utilização de dados interpolados mostrou-se eficaz para capturar as variáveis climáticas essenciais, oferecendo uma representação confiável das condições meteorológicas mesmo em áreas com cobertura limitada de estações. Essa abordagem garantiu que as simulações fossem baseadas em informações precisas e relevantes para o comportamento hidrológico da bacia.

Os dados climáticos interpolados foram adequados para a modelagem, e os resultados obtidos na calibração e validação indicam que o modelo pode representar satisfatoriamente os padrões hidrológicos observados. Isso reforça a importância de fontes de dados de entrada confiáveis e bem distribuídas espacialmente para a modelagem hidrológica.

A análise de sensibilidade destacou os parâmetros críticos que influenciam o desempenho do modelo, revelando uma resposta consistente do SWAT aos dados climáticos utilizados. Parâmetros como CN2, SURLAG e GW_REVAP foram fundamentais para a calibração do modelo, permitindo ajustes que aumentaram a precisão da simulação. A habilidade do modelo de reproduzir padrões de vazão de forma contínua reforça a confiança nos resultados obtidos, demonstrando que o SWAT é uma ferramenta eficaz para simulações hidrológicas na BHRP. A identificação dos principais componentes do balanço hídrico, como evapotranspiração e escoamento superficial, forneceu informações importantes para a gestão dos recursos hídricos na bacia, oferecendo suporte à tomada de decisões para práticas de manejo sustentável e conservação dos ecossistemas locais.

Contudo, apesar dos resultados positivos alcançados, o estudo evidencia a necessidade contínua de aprimoramento na representação dos dados de entrada e no ajuste dos parâmetros do modelo para futuras simulações. O refinamento contínuo do modelo é essencial para aumentar a sua precisão e capacidade preditiva, considerando a variabilidade climática e as mudanças no uso do solo.

Em suma, este estudo sugere a viabilidade do uso de dados interpolados para simulações hidrológicas com o modelo SWAT na BHRP, contribuindo para um melhor entendimento dos processos hidrológicos e fornecendo uma base sólida para estratégias de gestão hídrica efetivas na região. A abordagem metodológica utilizada pode ser aplicada em outras bacias hidrográficas, ampliando o potencial de estudos hidrológicos em regiões com dados limitados e promovendo práticas de manejo sustentável.

7. REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C., E. ROUHOLAHNEJAD, S. VAGHEFI, R. SRINIVASAN, B. KLOVE. Modelling hydrology and water quality of the European Continent at a subbasin scale: calibration of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752, 2015.

ADRIOLO M V, SANTOS I, GIBERTONI R C, CAMARGO A S G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas; Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil 2008.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVEZ, J.D. de; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, L. F. Influência de reservatórios de regularização no regime de vazões da bacia do rio Catolé Grande. 2018.

AMORIM, J. S. Produção de água na Bacia Hidrográfica do rio Catolé Grande utilizando o modelo hidrológico SWAT. Dissertação de mestrado. Itapetinga-BA: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2016.

ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation: Version 2012. College Station, Texas Water Resources Institute, p. 650, 2012.

Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, n.1, p.241-254. 2003.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do Modelo de Simulação SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MG. 2005. 132 f. Dissertação (Mestre em Física e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente da Universidade Federal do Mato Grosso – UFMG, Cuiabá, 2005.

BARELLA, W.; JUNIOR, M. P.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. F. A. As Relações entre as Matas Ciliares, os Rios e os Peixes. in: RODRIGUES, R. R. e LEITÃO FILHO, H. F.(eds.). *Matas Ciliares: Conservação e Recuperação*. São Paulo, Edusp/Fapesp, 2004, pp. 187 - 208.

BARROS, Robson Marcos Freitas. Saneamento básico no meio rural. 2018.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and Validation of Soil and Water Assessment Tool on an Agricultural Watershed in Upstate New York. *Journal of Hydrologic Engineering*, doi: 200.131.233.140, 2005.

BEVEN, K., BINLEY, A. , “The future of distributed models:model calibration and uncertainty prediction” , *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.

BRASIL. Lei n.9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, 18 jul. 2000. p.1.

BRASIL. Lei no 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. *Diário Oficial da União* 2007

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p

BRITTO, Marcela; DE MELLO BAPTISTA, Gustavo M.; DE LIMA, Erondina Azevedo. O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. *Paranoá*, n. 23, p. 127-146, 2019.

- BURSZTYN, M. A. A.; OLIVEIRA, S. L. de. Análise da experiência estrangeira no gerenciamento dos recursos hídricos. Brasília: Ministério do Interior, Secretaria Especial do Meio Ambiente. 1982
- CASTRO, K. B. de. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília, 2013.
- COLLISHONN, W; TUCCI, C. E. M. Previsão de vazão. In: Tucci, C. E. M.; Braga, B. (org.). Clima e recursos hídricos no Brasil. Porto Alegre: ABRH, 2003. p.281-348.
- CORREA, Edinelson Saldanha. O efeito da alteração nas entradas pedológicas no modelo de SWAT: estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 9, n. 6, p. 357-368, 2018.
- DANTAS, José Carlos. Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- DIAS, Dimária Aparecida Fernandes *et al.* Uso e ocupação do solo, qualidade da água e disponibilidade hídrica do médio curso do rio Piracicaba-MG. 2023.
- 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. 2020. Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- dos SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., dos ANJOS, L. H. C., De Oliveira, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ... & CUNHA, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro. 412p.
- ESCOBAR, Emanuel, e CARVALHO-SANTOS, Cláudia. Impacts of Future Climate On Water Ecosystem Services in the Watershed of the River Homem (northwest Portugal). 2022.
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome
- FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF. 2014. 147 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- FONSECA, T. L., de BRITO JUNIOR, B. S., & da SILVA, J. B. L. Análise do Regime Pluviométrico no Território de Identidade do Sudoeste Baiano: Implicações para a Gestão dos Recursos Hídricos: Analysis of the Pluviometric Regime in the Southwest Bahia Identity Territory: Implications for Water Resources Management. *Revista de Geociências do Nordeste*, 9(2), 144-155. 2023

FUKUNAGA, D. C. Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando SWAT. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2012.

GUIMARÃES, Tulio Machado Humberto *et al.* Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica. 2018.

GUPTA, Hoshin Vijai; SOROOSHIAN, Soroosh; YAPO, Patrice Ogou. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. (Cambridge Univ. Press. 2001). Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers*. IPCC Geneva, 2007.

IZADY A, DAVARY K, ALIZADEH A, ZIAEI AN, AKHAVAN S, ALIPOORA, JOODAVIA, BRUSSEAU ML. 2015. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeol. J.* 23: 47–68

KOBIYAMA, M.; LOPES, N.H.Y.; SILVA, R.V. *Hidrologia urbana*. Florianópolis: Pandion, 2007b. 44p.

KOTTEK, M. *et al.* Mapa mundial da classificação climática de Köppen-Geiger atualizada. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, p. 259-263, 2006.

LANNA, A. E. L. Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1995. 171 p.

LEGATES, D.R., MCCABE Jr., G.J. Evaluating the use of "good-ness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 1999.

LIMA, IPC *et al.* Avaliação dos processos hidrológicos em uma bacia do semiárido com o modelo SWAT calibrado com evapotranspiração por satélite. 2022.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do Bioma Cerrado. *Proceedings of the XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, Brazil, p. 17-22, 2013.

LOPES, N.H.Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

LUBITZ, E. Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau. 125p. 2009.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em

Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP, 154p. 2002.

MACHADO, R.E; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, p. 147 – 155, 2003.

MACHADO, Ronalton Evandro. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. Tese de Doutorado. University of São Paulo, Brazil.

MACIEL, Samuel Alves et al. Clima, disponibilidade hídrica e pobreza na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. 2021.

MAGALHÃES, P. C. Hidrologia superficial. In: RAMOS, F. Engenharia hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. cap. 3, 201-289.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S. et al. (Eds.). Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 383-422.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança Climática. Águas Subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido. 2007 p. 8. Disponível em: Acesso dia 20 de maio de 2019

MONTGOMERY, D. C.;RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2021. p.513-554.

MOREIRA, Luana Lavagnoli; SCHWAMBACK, Dimaghi; RIGO, Daniel. Parâmetros pedológicos para estimativa de vazões em bacias hidrográficas. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 14, n. 1, p. 78-84, 2019.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v.50, p.885-900, 2007.

MOSCA, Andreia Arruda de Oliveira. Avaliação dos impactos ambientais de plantações de eucalipto no Cerrado com base na análise comparativa do ciclo hidrológico e da sustentabilidade da paisagem em duas bacias de segunda ordem. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOURA, Lysanne Souza de. Avaliação dos impactos da urbanização sobre a geração de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe João Pessoa. 2018.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2009. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station., 2009. 634p.

NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; WILLIAMS, J. R. 2005. Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 530p

- OUTLOOK, AGRICULTURAL et al. OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK. 2015.
- PADOVESI-FONSECA, Claudia; DE FARIA, Rafaela Silva. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no Brasil e Europa. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 3, 2022.
- PERAZZOLI, Maurício. Avaliação das Mudanças Climáticas e do uso do solo nas vazões e nos sedimentos da Bacia do Ribeirão Concórdia Lontras-SC, 2012. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. FURB. Blumenau.
- PEREIRA, D. R. dos. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. 2013. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- PEREIRA, Luara Castilho. Evolução dos serviços ecossistêmicos em diferentes estágios de regeneração natural. 2020.
- PINTO, J. E. S. de S.; AGUIAR NETTO, A. de O.. *Clima, Geografia e Agrometeorologia: uma abordagem interdisciplinar*. Edufs. Aracaju – SE. 2008.
- PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. *Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações*. 2. ed. Ilhéus, BA: Editus, 2008. 293 p.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Relatório Técnico Parcial. São Paulo, 60p, 2000.
- ROSA, Alexandra Matilde Resende; GUARDA, Vera Lúcia de Miranda. *Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico*. 2019.
- RUPPENTHAL, J. E. *Gestão Ambiental*. Santa Maria, 2014. (Apostila do Curso de Graduação em Engenharia – Colégio Técnico Industrial – UFSM)
- SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROppo, Juliano Daniel; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 64-73, 2016.
- SAMPAIO, N.; VARGAS, M. A. M. As Paisagens do Rio Pardo Desvendadas pela Comunidade Ribeirinha no Sudoeste da Bahia: Conversações entre o Percebido e o Vivido. *Ateliê Geográfico*, v. 4, n. 4, 2011.
- SANTOS, L. C. O. Influência dos usos consuntivos da água e do uso e cobertura da terra na vazão da bacia hidrográfica do rio Pardo. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2017.
- SANTOS, R. F. *Planejamento Ambiental: Teoria e Prática - 2o edição*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. v. 1. 184p.

- SCHLESNER, Alexandre Augusto et al. Funções das áreas hidrologicamente frágeis na formação e modelagem do escoamento superficial na bacia experimental do Arroio Lajeado Ferreira, Arvorezinha-RS. 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.
- SEQUINEL, Maria Carmen Mattana. Cúpula mundial sobre desenvolvimento sustentável- Joanesburgo: entre o sonho e o possível. *Análise conjuntural*, v. 24, n. 11-12, p. 12, 2002.
- SILVA, E. R. da. O curso da água na história: simbologia, moralidade e a gestão de recursos hídricos. Fundação Oswaldo Cruz. Tese (Doutorado em Saúde Pública), PPG em Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 201p. 1998
- SILVA, Glauciene Justino Ferreira da et al. Modelagem dos componentes do balanço hídrico e monitoramento da seca em bacia hidrográfica no bioma caatinga. 2020.
- SILVA, Luciana Roberta Sarmiento da. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. 2011.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. In: TUCI, C. E. M. (Org). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS:ABRH, 4. ed., 2009.
- SOITO, João. Usos múltiplos da água. 2019.
- SOUZA R M, SANTOS I, KOBAYAMA M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In: ABRH, editor. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos; Campo Grande – Mato Grosso do Sul, Brazil. 2009.
- SRINIVASAN, R. Soil and Water Assessment Tool: Advanced Manual – Introduction to sensitivity and uncertainty analysis and SWAT-CUP. Apostila. 2012.
- TAVARES, Válter Cardoso; DE ARRUDA, Ítalo Rodrigo Paulino; DA SILVA, Danielle Gomes. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019.
- TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, Oxford, v. 89, n. 2/3, p. 225-247, 2006.
- TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically Dimensioned Search Algorithm for Computationally Efficient Watershed Model Calibration. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 43, 2007.
- Tucci, C. E. M. *Hidrologia ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4ª edição. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 4, 2012.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora da UFRGS, 2005.
- UZEIKA T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. Porto Alegre - Rio Grande do Sul, Brazil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009

VALVASORI, Guilherme Pires de Campos Godoy. Análise do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Fumaça e seus impactos sobre os recursos hídricos no distrito e Belisário (Mg). 2018. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

VICTORINO, Célia Jurema Aito. Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

VIEIRA, R. M. S.P. *et al.* Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, p. 129-138, 2013.

VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto *et al.* Avaliação do impacto da desertificação no ambiente e na população do Semiárido brasileiro por meio de uma base de dados geográficos. *Sustainability in Debate*, v. 7, p. 52-68, 2016.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: UFMG, v. 452, 2005.

Zuo, D., Xu, Z., Yao, W., Jin, S., Xiao, P., & Ran, D. (2016). Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 544, 238-250.

ANEXOS

Anexo I - Variáveis climáticas das estações utilizadas na modelagem hidrológica

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Estação A551 - Rio Pardo de Minas												
tmpmx	29,62	30,26	29,04	27,43	26,27	25,62	26,64	28,39	30,19	30,2	28,78	29,68
tmpmn	17,97	18,29	18	16,22	14,34	12,54	12,85	14,11	16,57	17,81	18,05	18,02
tmpstmx	2,29	1,96	2,43	2,51	2,65	2,18	2,68	2,88	3,28	3,26	3,29	2,42
tmpstdmn	1,79	1,25	1,4	2,06	2,46	2,49	2,53	2,4	2,04	1,6	1,51	1,29
pcpmm	84,18	77,06	55,43	22,2	6,6	7,03	2,55	31,31	131,68	130,18	89,83	110,54
pcpstd	8	9,51	6,63	3,04	1,01	1,95	0,37	4,5	10,27	11,39	7,51	8,94
pcpskw	4,46	6,15	5,95	7,28	8,75	13,42	5,93	8,53	3,52	4,25	3,58	3,63
pr_w(1)	0,17	0,21	0,21	0,14	0,14	0,09	0,06	0,08	0,2	0,18	0,14	0,18
pr_w(2)	0,58	0,56	0,55	0,53	0,4	0,4	0,37	0,64	0,7	0,68	0,73	0,72
pcpd	9,54	9,08	9,15	7,77	6	3,85	2,69	5,08	11,54	11,46	10,23	11,46
rainhmx	65,4	71,2	59	52,4	9,4	2,8	7	4,8	8,6	53,4	90	69,2
solarav	24,555	22,667	19,517	15,204	12,305	10,496	11,876	14,672	17,815	20,469	22,786	24,414
dewpt	2,381	2,285	2,030	1,919	1,674	1,868	2,404	2,809	2,852	2,707	2,367	2,208
windav	2,381	2,285	2,030	1,919	1,674	1,868	2,352	2,651	2,708	2,522	2,168	1,973
Estação A414 - Vitória da Conquista												
tmpmx	26,42	26,7	26,76	26,17	25,35	24,69	24,69	26,49	28,5	28,2	26,47	26,44
tmpmn	18,15	18,2	18,28	17,75	15,75	14,37	13,78	15,1	17,57	18,39	18,32	18,26
tmpstmx	3,71	3,51	3,18	3,22	3,61	3,53	4,27	4,58	4,76	4,96	3,62	3,49
tmpstdmn	1,42	1,47	1,24	1,73	2,07	1,96	1,76	2,09	1,82	1,73	1,62	1,31
pcpmm	169,98	132,72	189,68	152,45	27,72	2,73	0,67	4,8	24,12	121,05	251,92	221,35
pcpstd	10,56	9,47	10,35	12,65	4,19	0,69	0,33	1,08	3,2	9,1	13,27	11,87
pcpskw	2,93	3,34	2,13	3,68	6,34	9,06	18,66	8,52	5,67	3,89	2,25	2,67
pr_w(1)	0,23	0,27	0,31	0,18	0,09	0,03	0,01	0,03	0,07	0,24	0,44	0,42
pr_w(2)	0,8	0,76	0,8	0,72	0,49	0,15	0,17	0,44	0,57	0,72	0,83	0,76
pcpd	17	14,42	18,92	12,08	4,92	1,08	0,5	1,33	4,08	13,17	21,5	20,17
rainhmx	75,8	59	66,4	88,6	35,4	4,4	6,2	14,4	31,2	77,8	72	61,8
solarav	23,798	20,229	18,322	17,918	17,355	16,954	18,310	20,201	20,927	19,954	17,765	19,467
dewpt	73,634	73,769	77,468	74,514	69,562	65,165	56,059	47,568	46,796	59,380	75,837	76,008
windav	2,114	2,240	2,054	2,072	2,160	2,305	2,441	2,601	2,488	2,305	2,089	2,076
Estação A543 - Espinosa												
tmpmx	31,72	32,89	31,92	31,12	30,47	29	29,16	30,5	32,7	33,01	31,21	31,25
tmpmn	21,1	21,37	21,29	20,31	18,48	17,16	16,67	17,93	19,93	21,41	21,26	20,71
tmpstmx	2,49	2,09	2,66	2,47	2,64	2,52	2,73	2,85	2,91	3,41	3,55	2,98
tmpstdmn	1,71	1,65	1,87	1,89	2,43	2,49	2,68	2,58	2,51	2,1	1,75	1,87
pcpmm	84,18	77,06	55,43	22,2	6,6	7,03	2,55	31,31	131,68	130,18	89,83	110,54
pcpstd	8	9,51	6,63	3,04	1,01	1,95	0,37	4,5	10,27	11,39	7,51	8,94
pcpskw	4,46	6,15	5,95	7,28	8,75	13,42	5,93	8,53	3,52	4,25	3,58	3,63
pr_w(1)	0,17	0,21	0,21	0,14	0,14	0,09	0,06	0,08	0,2	0,18	0,14	0,18
pr_w(2)	0,58	0,56	0,55	0,53	0,4	0,4	0,37	0,64	0,7	0,68	0,73	0,72
pcpd	9,54	9,08	9,15	7,77	6	3,85	2,69	5,08	11,54	11,46	10,23	11,46
rainhmx	65,4	71,2	59	52,4	9,4	2,8	7	4,8	8,6	53,4	90	69,2
solarav	25,964	27,212	25,191	24,130	21,421	20,377	21,285	23,263	24,867	26,005	23,586	27,741
dewpt	61,215	58,085	63,092	60,632	56,570	54,778	50,841	47,169	43,725	49,965	60,687	63,640
windav	2,247	2,471	2,066	2,159	2,148	2,545	2,782	3,211	3,426	3,283	2,277	3,776
Estação A446 - Itapetinga												
tmpmx	27,37	27,51	27,46	26,95	26,29	25,61	26,03	27,97	30,09	29,56	27,58	28,1

tmpmn	17,88	17,88	18,06	17,24	15,24	13,92	13,73	15,12	17,42	18,39	18,14	18,28
tmpstmx	2,43	1,98	1,76	1,72	1,83	1,64	1,93	2,1	2,4	3,15	2,95	2,94
tmpstdmn	1,03	0,94	0,93	1,54	1,87	1,76	1,88	2,06	1,8	1,61	1,31	1,44
pcpmm	188,15	132,6	210,97	128,35	18,27	3,73	2,02	8,47	31,2	135,6	240,6	208,63
pcpstd	12,21	9,39	11,65	10,68	3,25	1,41	0,44	1,4	3,66	10,65	13,24	11,53
pcpskw	2,94	3,23	1,99	3,32	7,08	15,33	9,97	6,28	4,86	4,29	2,3	2,69
pr_w(1)	0,26	0,34	0,33	0,17	0,09	0,02	0,04	0,03	0,09	0,25	0,38	0,4
pr_w(2)	0,83	0,79	0,81	0,71	0,52	0,27	0,37	0,59	0,52	0,72	0,82	0,77
pcpd	17,33	15,83	18,42	11,67	4,17	0,92	1,58	2,25	4,67	14,17	20,42	19,42
rainhmx	83,8	75,8	66,4	80,8	35,4	24,2	6,2	12	31,2	94	66,4	72
solarav	19,78	19,60	18,61	18,46	17,48	17,15	18,13	20,05	20,87	19,52	18,89	20,39
dewpt	74,00	75,00	78,05	74,77	68,95	63,63	55,81	47,90	45,11	61,83	75,08	73,75
windav	2,53	2,19	2,26	2,13	2,11	2,35	2,51	2,66	2,67	2,40	2,30	2,24
Estação A549 - Águas Vermelhas												
tmpmx	30,12	30,57	30,16	28,7	27,11	26,06	25,47	27	29,09	29,79	29,18	29,78
tmpmn	17,47	17,46	17,66	16,63	14,48	12,59	11,2	11,8	14,18	16,74	17,74	17,63
tmpstmx	2,26	2,35	2,55	2,83	3,11	2,85	2,76	3,13	3,39	3,71	3,72	2,83
tmpstdmn	2,04	1,84	1,97	2,21	2,72	2,85	2,92	3,28	3,41	2,54	1,91	1,92
pcpmm	87,05	50,06	92,12	48,06	22,08	7,85	11,45	5,62	20,89	85,42	117,62	126,54
pcpstd	9,32	6,17	9,06	5,72	3,71	0,74	1,37	0,64	5,31	9,25	8,93	9,99
pcpskw	5,09	4,78	5,07	5,95	10,34	3,94	11,2	4,51	10,08	4,52	2,8	2,97
pr_w(1)	0,16	0,18	0,18	0,2	0,23	0,22	0,17	0,12	0,09	0,11	0,24	0,21
pr_w(2)	0,66	0,57	0,66	0,64	0,42	0,5	0,6	0,45	0,44	0,73	0,7	0,66
pcpd	9,92	7,85	11	10,54	8,69	8,85	9,15	4,92	3,85	7,85	12,31	11,38
rainhmx	93,2	55,8	97,4	60	54,8	5	22,2	5,6	66	80,8	59,2	67
solarav	29,65	30,50	28,73	27,08	26,02	24,97	18,68	28,17	29,69	27,54	26,66	28,53
dewpt	71,72	71,79	74,32	76,57	76,94	76,17	74,55	68,33	64,75	66,68	72,81	73,76
windav	2,15	2,03	1,76	1,55	1,42	1,64	2,01	2,38	2,71	2,78	2,29	2,08