

**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS MACEIÓ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANDRESSA ELLEN APOLINÁRIO SILVA

**MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO SWAT+ APLICADO EM REGIÕES COM
ESCASSEZ DE DADOS – UM ESTUDO DE CASO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO PRATAGY EM ALAGOAS**

MACEIÓ - AL

2023

ANDRESSA ELLEN APOLINÁRIO SILVA

**MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO SWAT+ APLICADO EM REGIÕES COM
ESCASSEZ DE DADOS – UM ESTUDO DE CASO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO PRATAGY EM ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Alagoas, Campus Maceió, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Me. Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito Rodrigues.

MACEIÓ - AL

2023



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Instituto
Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte**

628.1
S586m

Silva, Andressa Ellen Apolinário.

Modelo hidrossedimentológico SWAT+ aplicado em regiões com escassez de dados :
um estudo de caso na Bacia Hidrográfica do rio Pratagy em Alagoas / Andressa Ellen
Apolinário Silva. - Maceió, 2023.

70, f. : il., color.

Orientação: Profa. Ma. Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito Rodrigues. Trabalho de
Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto
Federal de Alagoas, Campus Maceió. Maceió, 2023.

Arquivo no formato digital em PDF.

1. Engenharia Civil. 2. Gestão dos recursos hídricos. 3. Modelagem hidrológica.
4. Balanço hídrico. 5. Modelo hidrossedimentológico SWAT+. I. Título.

Franciane Monick Gomes de França
Bibliotecária - CRB 4/1831


ANDRESSA ELLEN APOLINÁRIO SILVA

**MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO SWAT+ APLICADO EM REGIÕES
COMESCASSEZ DE DADOS – UM ESTUDO DE CASO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PRATAGY EM ALAGOAS**


Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) apresentado à Banca do
Curso de bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto
Federal de Alagoas – Campus
Maceió

Aprovado em 30 de outubro de 2023.


BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 TAINARA RAMOS DA ROCHA LINS DE BRITO ROI
Data: 10/12/2023 21:08:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito
Rodrigues(Orientadora - IFAL / Campus Maceió)

Documento assinado digitalmente
 BENICIO EMANOEL OMENA MONTE
Data: 19/12/2023 19:30:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Benício Emanuel Omena Monte
(UFRGS / IPH)

Documento assinado digitalmente
 TAISE MONIQUE DE OLIVEIRA CARVALHO
Data: 13/12/2023 21:27:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Taíse Monique de Oliveira Carvalho
(IFAL / Campus Maceió)

In memoriam de meu pai, Adelmo Apolinário, que é meu primeiro exemplo de engenheiro civil e matemático, para sempre meu orgulho de professor.

À minha mãe, Edna Maria, maior incentivadora da minha educação e quem mais acredita no meu futuro profissional.

São a eles que dedico essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha orientadora, Profa. Ma Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito Rodrigues, por colocar meus pés-no-chão, mas nunca ter desacreditado do potencial deste trabalho, por ter sido grande incentivadora e por não ter medido esforços em me abrir novas perspectivas de estudo e pesquisa.

A minha primeira mentora, Gláucia Nascimento, por ter colaborado com minha formação profissional e por ter me aberto caminhos para adquirir parte dos conhecimentos que tenho hoje e que perpassam o ensino dentro da faculdade.

À equipe de desenvolvedores do SWAT e colegas dos fóruns de dúvidas pelo auxílio na execução do modelo.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal de Alagoas pela oportunidade de ter feito parte da 3° turma do curso de Engenharia Civil do Campus Maceió e aos meus amigos e familiares por fazerem parte, indiretamente, dessa caminhada, me ouvindo e incentivando.

“Águas são muitas, infinitas... e em tal maneira é grandiosa que, querendo, a aproveitar, dar-se-á nela tudo, por bem das águas que tem.”

Carta de Pero Vaz de Caminha, 1500

RESUMO

Diante da importância e finitude da água, tem-se a gestão dos recursos hídricos um pilar essencial para a minimização dos riscos de déficit hídrico. No Brasil, as bacias hidrográficas são normatizadas, pela Política Nacional de Recursos Hídricos, como unidade territorial de planejamento. Assim, com o avanço científico do estudo da hidrologia, as modelagens hidrológicas passam a ser ferramentas valiosas para o estudo de bacias hidrográficas e suas respostas hidrológicas. Em virtude disso, objetiva-se com este trabalho a geração de parâmetros hidrológicos através do modelo hidrossedimentológico SWAT+ integrado ao QSWAT+ em uma região com escassez de monitoramento e dados. A área de estudo corresponde à bacia do rio Pratygy, bacia típica do bioma mata atlântica, com área de 194,77 km² e situada no estado de Alagoas, cujo volume hídrico contribui com 40% no abastecimento público de água do município de Maceió. Os dados exigidos pelo modelo foram extraídos de bases oficiais e precisaram ser tratados para atender à localidade e às correlações dos bancos de dados existentes no SWAT. As séries históricas utilizadas correspondem aos dados de duas estações – uma de precipitação da ANA e outra meteorológica do INMET - para uma análise sob intervalo de 46 anos de dados hidrometeorológicos e período de aquecimento de 5 anos. Após as simulações no SWAT+, os resultados obtidos são semelhantes a outros estudos similares nessa região. Além disso, por meio dos resultados, é possível verificar um potencial aumento da saída de água da bacia, por evapotranspiração, em comparação ao volume precipitado nos próximos anos e às demandas de consumo, advindas da captação para abastecimento público. Portanto, evidencia-se a importância de efetuar gestão hídrica eficiente na BHP e a necessidade de executar calibração para validar a modelagem e extrair resultados mais coerentes às bacias brasileiras.

Palavras-chave: gestão, modelagem hidrológica, balanço hídrico.

ABSTRACT

Considering water's importance and scarcity, the management of water resources is seen as an essential pillar for minimizing the risks of water deficit. In Brazil, hydrological basins are regulated by the National Water Resources Policy as territorial planning units. Therefore, with scientific advancement of hydrology, hydrological modeling becomes a valuable tool for studying river basins and their hydrological responses. The aim of this study is to contribute with the dissemination of SWAT hydro-sedimentological model in a river basin with insufficient monitoring and data, through the applicability of SWAT plus integrated with QSWAT plus. The river basin in question is Pratygy river, typical from the Atlantic Forest biome, with an area of 194.77 km², located in Alagoas and which contributes with 40% of the water supply system of Maceió. The data required by the model were extracted from official databases and had to be processed to meet the locality and correlations of existing data banks in SWAT. The historical series were carried out in two monitoring stations - one for rain gauge station from ANA and other meteorological from INMET - for 46-year interval of hydrometeorological data and a 5-year warm-up period. After the simulations in the SWAT+ hydrosedimentological model, the results obtained are similar to other similar studies in this region. Furthermore, through the results, it is possible to verify a potential increase in water output from the basin, through evapotranspiration, in comparison to the volume precipitated in the coming years and the consumption demands, arising from abstraction for public supply. Finally, the importance of carrying out efficient water management at BHP is highlighted and the need to execute specifically to validate the modeling and extract more consistent results for the Brazilian basins.

Keywords: management, hydrological modeling, water balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de formação das HRU's	22
Figura 2: Fluxograma de processamento do modelo SWAT	23
Figura 3: Fluxograma da Metodologia do Trabalho	29
Figura 4: Mapa de localização e clima da Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy	30
Figura 5: Mapa de clima da Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy	32
Figura 6: Mapa de fases de relevo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy	34
Figura 7: Mapa de distribuição espacial dos solos de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos	35
Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo	37
Figura 9: Dados Espaciais de Entrada relacionados ao banco de dados do SWAT+	40
Figura 10: Disposições dos postos de monitoramento avaliados para o trabalho.....	44
Figura 11: Diagrama de Gantt para escolha da estação usada na interpolação.....	44
Figura 12: Fluxograma de Inicialização do SWAT+ no QSWAT+	48
Figura 13: Mapa de delimitação da bacia, sub-bacias e rede de drenagem no QSWAT+	52
Figura 14: Mapa de áreas inundáveis e declividade geradas pelo QSWAT+.....	54
Figura 15: Gráfico do uso e ocupação do solo gerado pelo SWAT+ <i>Editor</i>	55
Figura 16: Mapa de Polígonos dos HRU's e Aquíferos gerados pelo QSWAT+	55
Figura 17: Comportamento de precipitação média simulado de 1980 a 2050	57
Figura 18: Acúmulo de precipitação mensal no período simulado	58
Figura 19: Correlação entre precipitação e CN	58
Figura 20: Mapa de comparação entre os tipos de solo e valores do CN	59
Figura 21: Mapa de distribuição espacial do escoamento superficial.....	60
Figura 22: Comportamento do escoamento superficial médio simulado de 1980 a 2050	61
Figura 23: Comparação entre percolação e fluxo lateral.....	61
Figura 24: Comparativo da evapotranspiração real e da potencial ao longo da simulação	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados meteorológicos estatísticos para estação convencional do INMET47	
Tabela 2: Resultados dos relatórios exportados do QSWAT+	53
Tabela 3: Resultados dos processos hidrossedimentológicos simulados pelo QSWAT+	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fases do relevo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy	33
Quadro 2: Fontes dos dados hidrológicos e meteorológicos utilizados na modelagem hidrológica do SWAT	38
Quadro 3: Correlação entre os dados de uso e ocupação do solo da BHP e o código SWAT	41
Quadro 4: Postos de monitoramento nos limites de área de estudo	43
Quadro 5: Postos vizinhos de monitoramento usados na modelagem do SWAT	43
Quadro 6: Quantitativo de objetos espaciais gerados pelo modelo	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA O GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS	17
3.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	19
3.2.1	<i>Modelo SWAT</i>	20
3.2.1.1	SWAT+ e Interface QSWAT	24
3.2.1.2	SWAT+ Editor	25
3.2.1.3	Variáveis Exigidas pelo SWAT	26
3.2.2	<i>Modelo Digital de Elevação</i>	27
4	METODOLOGIA	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
4.1.1	<i>Clima</i>	31
4.1.2	<i>Declividade</i>	33
4.1.3	<i>Hidrogeologia e Solo</i>	34
4.1.4	<i>Uso e Ocupação do Solo</i>	36
4.2	ELABORAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	37
4.2.1	<i>Dados Espaciais</i>	39
4.2.2	<i>Dados Tabulares</i>	40
4.2.3	<i>Dados Estatísticos</i>	45
4.3	INICIALIZAÇÃO DO SWAT+	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	51
5.2	HIDROLOGIA MODELADA PELO SWAT+	56
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A expressão “Tudo é água”, de Tales de Mileto, da antiga Grécia do século VI a.C, é considerada a primeira afirmação científica e filosófica do ocidente. Hoje é possível descrever e afirmar cientificamente a importância e a notória inexistência de vida sem água. O seu valor perpassa os aspectos biológicos e de desenvolvimento, de modo que, histórica e geograficamente, a evolução das civilizações apoia-se ao redor de recursos hídricos, base para a formação de sociedades ao decorrer de séculos, consistindo em um recurso estratégico para a vida, principalmente urbana (BRUNI, 1993).

As concepções de que os recursos hídricos são bens finitos e atribuídos de valor econômico contrapõem a cultura da abundância hídrica, principalmente quando se trata do Brasil (ANA, 2019). Nos últimos 100 anos, o consumo global de água doce cresceu seis vezes e, desde a década de 1980, o uso aumenta a uma porcentagem de cerca 1% ao ano. Afirma-se que até 2030, caso não haja mudanças, o mundo possivelmente enfrentará um déficit hídrico de 40% (ONU, 2021).

O ciclo dinâmico da água na hidrosfera é composto por uma sequência de processos que torna instável o volume de água superficial. O aumento da captação nas fontes superficiais e subterrâneas de água tem gerado redução significativa da disponibilidade hídrica dos mananciais (TUNDISI, 2003). Diante disso, faz-se necessária uma gestão integrada da água. No Brasil, esse manejo é regularizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei nº 9.433/1997, em que trata a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e aponta aos usos múltiplos da água, de modo a promover a segurança hídrica.

O desempenho hidrológico de uma bacia hidrográfica depende de suas propriedades geomorfológicas, geológicas, climáticas e entre outras (LIMA, 2008). Nesse contexto, ao longo dos anos a hidrologia, ciência que aborda as interações terrestre da água, tem evoluído em busca de métodos descritivos para melhor representação de fenômenos, minimizando a necessidade de medições extensivas (BARBAROTTO JUNIOR, 2014).

A modelagem hidrológica é a representação simplificada dos processos que ocorrem na realidade, a partir do agrupamento de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Geralmente tem como foco de estudo a bacia

hidrográfica, correspondendo a um fator útil para predição do comportamento hidrodinâmico (RENNÓ e SOARES, 2006; TUCCI, 1998).

Vários tipos de modelos foram desenvolvidos e são utilizados para diferentes fins. O SWAT (Soil and Water Assessment Tool), cada vez mais popularizado, é um modelo que integra atributos de outros modelos e exige informações específicas sobre o clima, o solo, topografia, vegetação e práticas de uso do solo presentes na bacia hidrográfica, para a realização de simulações complexas usando equações gerais e leis físicas. Diferentemente de outros modelos que utilizam equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída (NEITSCH et al., 2009).

A ferramenta sofreu alterações, sendo o SWAT+ uma versão aprimorada, em que processa a modelagem com base em objeto para a organização do código. Junto a isso, tem-se o QSWAT+, uma interface, disponível como plug-in do software QGIS, em que são inseridos e lidos os dados de entrada, conforme os códigos do SWAT em conjunto com a linguagem Python. Apesar das evoluções, ainda é uma questão restritiva a falta de dados detalhados em relação às grandes exigências de informações que precisam ser inseridas no modelo. Nesse contexto, é um impasse similar no SWAT bacias hidrográficas brasileiras, uma vez que a ausência de dados corrobora a imprecisões e a coleta e preparação de dados complexa e morosa (BRESSIANI et al., 2015).

Diante do exposto, objetiva-se com este trabalho aplicar o programa SWAT+ integrado ao QSWAT+ para a realização de análises de balanço hídrico na bacia Pratygy, uma importante bacia hidrográfica para o sistema de produção do abastecimento público de água da cidade de Maceió. Além de servir como base para outros trabalhos no entendimento da preparação da estrutura dos dados de entrada no modelo, tendo em vista a região com escassez de dados provenientes de monitoramento hidrometeorológico.

A estrutura do trabalho corresponde à sequência seguinte: o item 3 fundamentação teórica, aborda legislação brasileira, modelagem hidrológica, modelo SWAT e MDE; o item 4 caracterização da área de estudo, procedimentos metodológicos utilizados para obtenção dos parâmetros climatológicos e físicos do solo e o modo de aplicação do SWAT e suas ferramentas; o 5 apresenta e discute os resultados obtidos e o 6 foi destinado à conclusão do estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo geral analisar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica do estado de Alagoas com escassez de dados, por meio da aplicação do modelo hidrossedimentológico SWAT+.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulação hidrológica com período até 2050;
- Analisar a importância do modelo para a gestão dos recursos hídricos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Legislação Brasileira para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos

As bacias hidrográficas são áreas de captação natural da água de precipitação, com fluxo de drenagem e delimitação por divisores de água, onde confluem o escoamento para um leito único, o exutório. Corresponde a um ente sistêmico por realizar balanços de entrada e saída de água (TUCCI, 1997). O seu comportamento hidrológico está relacionado às suas características geomorfológicas e ao tipo de cobertura vegetal (LIMA, 1986). São consideradas unidades que mais retratam os impactos antrópicos (MACHADO, 2002).

As atividades humanas ocorrem em algum território definido como bacia hidrográfica, o que consiste em um ambiente de mutualidade das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural. É possível afirmar que o exutório reflete todos os processos desse sistema e é consequência das atividades de ocupação do solo e uso da água que se encontram nessas regiões (PORTO, A.; PORTO, L., 2008; YASSUDA, 1993).

A territorialidade da bacia hidrográfica como estratégia de planejamento geográfico espacial, a partir da sua delimitação e levantamento físico, corrobora a análise integrada e a concepção de ordenamento do território. Isso ocorre devido às bacias serem unidades globais e espaciais de dimensões variadas, no qual se organizam os recursos hídricos superficiais em função das relações entre a estrutura geológica-geomorfológica e as condições climáticas (CARVALHO, 2020).

Essa visão territorial da bacia hidrográfica é considerada uma evolução na governança das águas, uma vez que a gestão dos recursos hídricos passou a ser baseada na menor escala, ou seja, “uma gestão de bacia hidrográfica”. Tal processo evolutivo de governança das águas, que antes era centralizada e setorial, sucedeu em uma gestão descentralizada - governança por bacia -, integrada - união dos usos múltiplos -, e preditiva - antecipação de regimes e fenômenos -, em que a crise hídrica passou a ser vista como uma crise de gestão. A conferência de Dublin, em 1992, é um marco para essas mudanças e auxiliou no reconhecimento do valor econômico da água (TUNDISI, 2016).

A partir dessa conferência, intitulada como Conferência Internacional sobre a Água e o Meio Ambiente, foram formulados os princípios que deram origem ao conceito de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH). As discussões acerca dos princípios foram debatidas, também, na ECO - 92, Conferência Mundial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que mais tarde motivaram o capítulo 18 da Agenda 21, sustentando a necessidade de minimizar impactos de escassez, acesso e poluição hídrica. No Brasil, apesar de ter havido tentativas anteriores de gerenciamento dos recursos hídricos, como o Código das Águas de 1934 e a Constituição Federal de 1988, foram esses debates e princípios internacionais que influenciaram decerto o modo de gerir os recursos hídricos hoje vigentes (SILVA; HERREROS; BORGES, 2014).

Assim, em 1997, foi sugerido um novo modelo de administração das águas para o Brasil, principiado pela Lei Federal n. 9.433/1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A Lei das Águas baliza assegurar às gerações futuras qualidade e quantidade adequada de recursos hídricos, gerenciando de forma integrada e descentralizada, com o dever de sempre propiciar os usos múltiplos e a fim de atender às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País (SOUZA; PERTEL, 2020). Com isso, segundo Porto e Porto (2008), a nova legislação efetiva a modernização do setor e põe o Brasil entre os países mais avançados no quesito de leis de recursos hídricos.

Além disso, por meio dessa lei, o Brasil passa a dispor de instrumentos legais de gestão como: o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH); a outorga dos direitos de uso; a cobrança pelo uso; os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento de corpos de água e sistemas de fiscalização. Tais mecanismos contribuem para a construção de estruturas institucionais e a padronização de ações em busca dos objetivos previstos. É fundamentado, também, que a descentralização e a gestão ocorram com a implementação da PNRH e com a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos por bacia hidrográfica, sendo essa a unidade geográfica para diagnósticos, análises, balanços de disponibilidade, metas, extração de informações e dados acerca dos recursos hídricos, entre outros (BRASIL, 1997).

O fundamento de que “a água é um bem de domínio público” (BRASIL, 1997, Art. 1. § 1º) reafirma que os recursos hídricos pertencem e são responsabilidade de todos. Sendo a gestão compartilhada das bacias hidrográficas feita pelo princípio

federativo entre os três entes - União, Estados e Municípios -, no âmbito administrativo. Enquanto a gestão integrada e participativa se estende à participação pública - usuários e sociedade civil -, através dos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH), dando legitimidade ao processo decisório (PORTO, A.; PORTO, L., 2008).

É de responsabilidade dos comitês o desenvolvimento dos Planos de Recursos Hídricos da Bacia - que contêm informações advindas do diagnóstico específico da bacia e que orientam as decisões, metas e objetivos do CBH, a fim de garantir segurança hídrica (XAVIER; BENTES, 2020). Logo, para se obter a efetividade da gestão integrada, o sistema participativo necessita dispor de ferramentas de suporte à decisão que estude e analise os vários aspectos da água e suas interações, como também propiciem a construção e observação de cenários preditivos (OLIVEIRA; NASCIMENTO; MOREIRA, 2022).

3.2 Modelagem Hidrológica

A hidrologia é a ciência, de modo geral, que aborda o estudo da água na Terra, desde a sua precipitação, ciclo e distribuição. Ela se concentra nos processos complexos encontrados no ciclo hidrológico. Ao longo do tempo, a hidrologia passou de uma abordagem predominantemente qualitativa para a incorporação de métodos quantitativos, utilizando matemática e estatística em conjunto com a evolução da computação. Inicialmente, assim como outras ciências, seu foco estava no dimensionamento e planejamento do uso dos recursos hídricos para o desenvolvimento econômico (TUCCI, 2005).

No entanto, ainda de acordo com Tucci (2001), a partir da década de 70, com a crescente conscientização ambiental, a hidrologia precisou se adaptar, incorporando preocupações com os impactos ambientais resultantes do uso inadequado da água. Isso exigiu uma abordagem integrativa, ao se conectar a outras áreas do conhecimento, como geomorfologia, pedologia, biologia, química e estudos climáticos. Essa concepção integrada busca garantir o uso adequado da água, respeitando as condições e limitações identificadas pela própria hidrologia e pelas outras áreas mencionadas. Portanto, a hidrologia pode ser considerada como parte do contexto inter e multidisciplinar que abrange a área ambiental.

A partir disso, a hidrologia tem se desenvolvido em busca de métodos descritivos para representar preciso e computacionalmente fenômenos reais, minimizando a necessidade de medições extensivas (BARBAROTTO JUNIOR, 2014). Nesse âmbito, tem-se a modelagem hidrológica, no qual, segundo Tucci (1998), modelo é a representação simplificada dos processos que ocorrem na realidade, com o intuito de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Um modelo é um agrupamento de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Sendo assim, a modelagem hidrológica é um fator útil para predição do comportamento dinâmico da água em uma bacia hidrográfica.

Os modelos hidrológicos geralmente têm como foco de estudo a bacia hidrográfica, que consiste nas áreas que coletam e direcionam a água para um ou mais canais de escoamento que deságuam em uma única saída. A bacia pode ser considerada como uma unidade espacial em modelos agregados, que levam em conta as propriedades médias de toda a bacia, ou pode ser subdividida de acordo com diferentes abordagens para considerar suas características distribuídas espacialmente (RENNÓ; SOARES, 2006).

Vários tipos de modelos foram desenvolvidos e são utilizados para diferentes finalidades. Rennó e Soares (2006) afirmam que os modelos podem ser categorizados com base na forma de representação do sistema (físico ou numérico), nas relações entre as variáveis (empíricas ou teóricas), nas variáveis utilizadas na modelagem (estocásticas ou determinísticas), na presença de relações espaciais (concentradas ou distribuídas) e no tipo de equação diferencial (linear ou não-linear).

3.2.1 Modelo SWAT

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi desenvolvido pela USDA (Agricultural Research Service) junto com a Universidade A&M do Texas e agências federais com o objetivo de prever o impacto da poluição agrícola difusa e analisar processos relacionados ao solo e à vegetação. Esse modelo estima fluxos de água, nutrientes, pesticidas e sedimentos no solo, águas subterrâneas e águas superficiais, bem como a vazão dos rios em diferentes intervalos de tempo - sub

diários, diários, mensais e anuais, podendo ser aplicado em bacias hidrográficas de diversos tamanhos (ARNOLD et al., 1998).

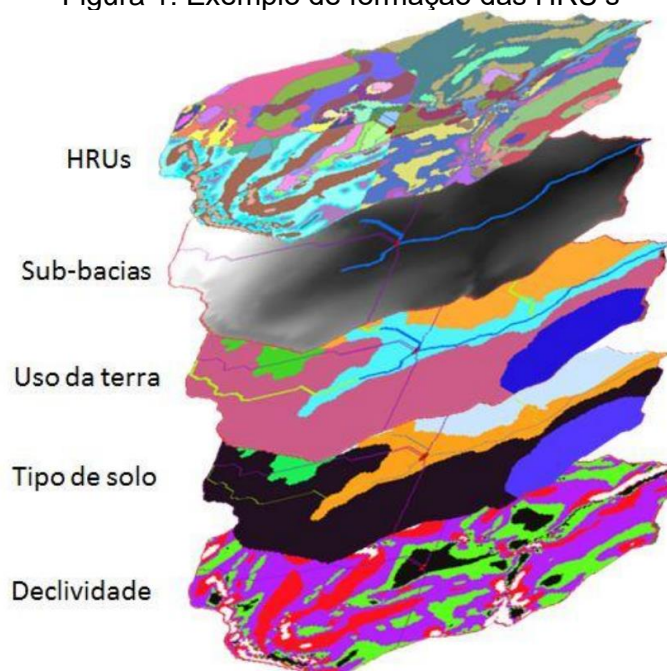
Dessa forma, pelo agrupamento feito por DeVries e Hromadka (1992), o SWAT é um Modelo de Simulação de Vazão Contínua, pois considera a variação temporal da precipitação e o movimento da água em toda bacia hidrográfica até o seu exutório, reproduzindo a maioria dos processos hidrológicos que regem a movimentação da água em uma bacia.

O modelo integra propriedades de outros modelos que foram desenvolvidos de forma isolada para funções específicas, além de possuir base física, o que significa que em vez de usar equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, ele exige informações específicas sobre o clima, o solo, topografia, vegetação e práticas de uso do solo presentes na bacia hidrográfica. Dessa forma, os processos físicos relacionados ao fluxo de água, transporte de sedimentos, crescimento das culturas, ciclo de nutrientes e outros são diretamente modelados pelo SWAT usando equações gerais e leis físicas. Essas equações e leis permitem que o modelo SWAT calcule os resultados principais utilizando os dados de entrada mencionados (NEITSCH et al., 2009).

Uma característica importante do modelo é a sua distribuição, ou seja, a fragmentação da bacia hidrográfica em sub-bacias, com o propósito de melhor discernir os valores presentes no solo e em seu uso e ocupação e no relevo, com base nas características topográficas do terreno. Essa divisão é feita a partir da discretização da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU–*Hidrologic Response Units*), que passam pelo processo de simulação e, com os resultados obtidos para cada HRU, é possível assimilar informações gerais de todo o ciclo hidrológico da bacia em estudo (ADRIOLO et al., 2008).

Logo, no SWAT, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias que correspondem aos canais dos rios. A HRU é a unidade básica para cálculos e análises, criadas a partir da integração de quatro diferentes camadas de arquivos (figura 1), ou seja, tipo de solo, uso e ocupação da terra, declividade (MDE) e sub-bacia associada a uma estação meteorológica. A modelagem do ciclo hidrológico no SWAT calcula o crescimento das plantas considerando fatores climáticos e do solo, o que determina a evapotranspiração (ET), sendo o desenvolvimento destas baseado no modelo EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*) (ARNOLD et al., 1990).

Figura 1: Exemplo de formação das HRU's



Fonte: Fukunaga (2012, p. 17)

O perfil do solo é dividido em várias camadas e o movimento da água no solo inclui processos como escoamento da superfície (SURFQ), infiltração, evaporação, absorção pelas plantas, fluxo lateral e percolação para camadas mais profundas. O modelo também calcula o fluxo de água utilizando processos de roteamento através da rede de canais da bacia hidrográfica até a saída (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 1998).

Ademais, o ciclo hidrológico calculado no SWAT é realizado, segundo Neistch (2009), através da equação 1 a seguir:

$$SWt = SW0 + \Sigma (Rday - Qsurf - Ea - wseep - Qgw) \quad (1)$$

Onde:

SWt é o conteúdo de água no solo no dia t (atual ou final do período estudado);

$SW0$ é o conteúdo inicial de água no solo no dia i , em mm H₂O;

$Rday$ é a quantidade de precipitação no dia i , em mm H₂O;

$Qsurf$ é a quantidade de escoamento superficial no dia i , em mm H₂O;

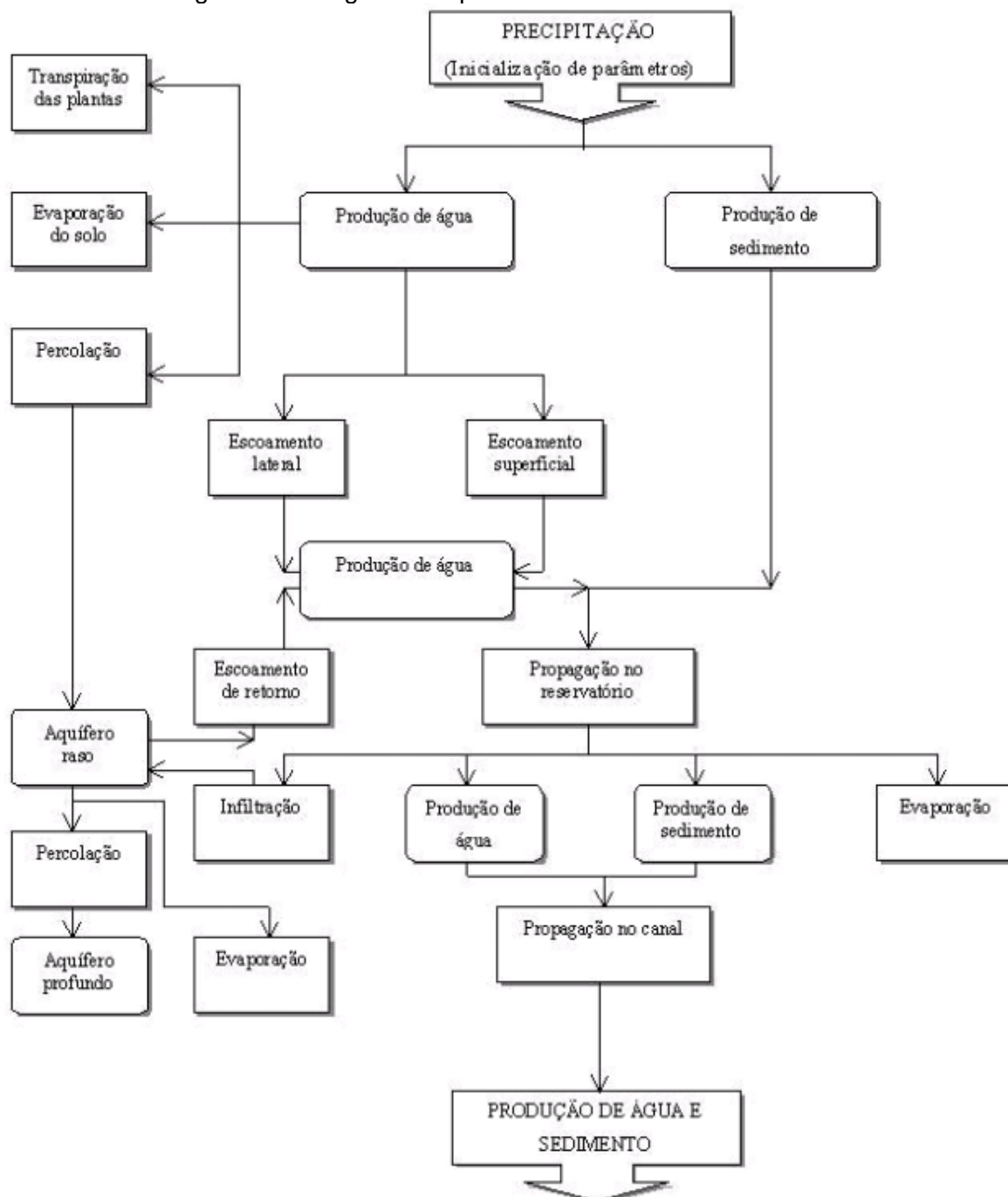
Ea é a quantidade de evapotranspiração no dia i , em mm H₂O;

$wseep$ é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i , em mm H₂O;

Qgw é a quantidade de fluxo de retorno no dia i , em mm H₂O.

Os processos representados no modelo podem ser resumidos conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma de processamento do modelo SWAT



Fonte: Adriolo, et al. 2008

3.2.1.1 *SWAT+ e Interface QSWAT*

Embora o modelo SWAT original tenha se mostrado valioso, sua ampla aplicação revelou certas limitações e a necessidade de desenvolvimento de ferramentas adicionais. Para enfrentar esses desafios e atender às crescentes necessidades de modelagem de recursos hídricos, o código SWAT passou por modificações significativas nos últimos anos, resultando no SWAT plus (em português SWAT+).

Assim, o módulo SWAT+ representa uma versão aprimorada da Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT), que ganhou uso generalizado em todo o mundo nas últimas duas décadas, onde os principais algoritmos usados para calcular processos no modelo permaneceram inalterados, garantindo continuidade e compatibilidade com versões anteriores. No entanto, a estrutura e a organização do código e dos arquivos de entrada passaram por revisões substanciais e tornaram o SWAT mais flexível que suas versões anteriores (ARNOLD et al., 2020).

Por meio do SWAT+ o processo de modelagem passou a ser baseado em objeto para a organização do código, mudança essa que permite uma melhor manutenção do código e facilita alterações futuras. Ao organizar o código em torno de interações, será possível atualizar e aprimorar componentes específicos de forma mais fácil sem afetar todo o modelo (BIEGER, K. et al., 2019).

Nesse contexto, o QSWAT+ nada mais é do que uma interface, disponível como plug-in do software QGIS a partir da versão QGIS 3, a qual são inseridos e lidos os dados de entrada para modelagem, conforme os códigos do SWAT em conjunto com a linguagem Python. A interface ainda processa os dados espaciais e tabulares, gerando de forma prévia resultados da integração das camadas.

O QSWAT funciona de forma gradual, a partir de quatro passos detalhados a seguir:

- O primeiro passo consiste no delineamento da bacia hidrográfica - onde são inseridos o MDE, os parâmetros de rios principais e canais menores, que serão considerados ou não no estudo como áreas de drenagem, e outros elementos de entrada e saída da bacia, como exutórios, reservatórios, lagoas, entre outros.

- O segundo passo está relacionado à criação das Unidades de Resposta Hidrológica, cuja concepção depende da integração dos dados espaciais e tabulares do uso e ocupação do solo, tipo do solo, declividade, áreas de inundação e sub-bacias (essas duas últimas resultadas da etapa 1). Após esse passo já é possível visualizar características físicas da bacia e analisar se as áreas definidas são satisfatórias para o estudo e, caso não sejam, podem ser alterados requisitos e estabelecidos novos intervalos;
- O terceiro passo é feito no SWAT+ Editor e consiste na etapa de inserção dos dados meteorológicos e estatísticos, edição de parâmetros e simulação do modelo; e
- O quarto passo corresponde à visualização dos resultados, a partir de definições de como os visualizar, interpretar e comparar.

3.2.1.2 *SWAT+ Editor*

SWAT+ Editor, de acordo com o site oficial do SWAT, é um software independente e uma interface de edição e execução do projeto, advindo do banco de dados SQLite, gerado no QSWAT+, ou criado diretamente no programa. Com o Editor é possível configurar as entradas para padrões aceitáveis pelo SWAT+, definir parâmetros complexos e específicos de cada entrada e diagnosticar erros, isso realizado de forma dinâmica, interativa e a cada simulação.

É na primeira etapa do SWAT+ Editor que são adicionadas informações estatísticas meteorológicas complexas; já na segunda etapa são inseridos arquivos para cada dado meteorológico da estação observada - precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Após essas inserções o SWAT+ Editor permite realizar alterações em cada uma das conexões (HRUs, canais, aquíferos, reservatórios e outros) e visualizar outras propriedades para melhoria da modelagem. A última etapa corresponde às configurações de aquecimento e simulação do modelo.

O período de aquecimento do SWAT, é um intervalo de tempo para estabilização das condições iniciais do modelo e minimização de eventuais erros,

deve conter, portanto, séries consistentes. O período é definido pela variável NYSKIP e é desconsiderado na geração dos resultados. Recomenda-se, no mínimo, 2 anos de aquecimento para séries temporais menores que 30 anos. Enquanto para séries iguais ou maiores que 30 anos esse período é opcional.

3.2.1.3 Variáveis Exigidas pelo SWAT

O SWAT exige variáveis relacionadas à área de estudo que será realizada a simulação hidrológica, sendo inseridos os valores de: clima, declividade, solos e uso e ocupação do solo. Portanto, a variabilidade climática é uma das principais influências físicas no processo de entrada e saída de água em uma bacia hidrográfica, o que infere diretamente na disponibilidade hídrica dos mananciais (MACIEL, 2021).

Para as bacias hidrográficas, a declividade é um dos fatores mais importantes que influenciam nas suas características e no seu comportamento hidrológico, analisar os desníveis do terreno está ligado ao estudo da velocidade do escoamento superficial que é intrínseco ao tempo de concentração da água para formação da rede de drenagem das bacias (GOUVEIA et al., 2019).

À medida que o ângulo da declividade aumenta, mais acelerada é a transformação da energia potencial em energia cinética. O aumento da velocidade do escoamento superficial e da capacidade de transporte da água é derivada desse fenômeno que, por conseguinte, é o responsável pelas formas de relevo - morfogênese - em vertentes e bacias hidrográficas (SILVEIRA et al., 2006).

Por outro lado, a distribuição, quantidade e qualidade da água dependem em grande parte das características geológicas de uma bacia hidrográfica. Os tipos de rochas e solos influenciam na capacidade de armazenamento e recarga dos aquíferos, bem como na velocidade de escoamento da água superficial (GUERRA; CUNHA, 2001).

O solo é uma das principais variáveis hidrológicas, pois é nele que ocorrem as trocas de água e energia entre a atmosfera e a bacia hidrográfica (TUCCI, 2011). As propriedades hidrodinâmicas do solo são importantes, uma vez que as curvas de retenção de água, porosidade e condutividade hidráulica saturada do solo auxiliam no manejo adequado dos recursos hídricos (SILVA; SILVA; SANTOS, 2012).

As mudanças do uso e ocupação do solo natural por atividades antrópicas impactam diretamente no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas. As alterações provocam diferenças na qualidade e quantidade da disponibilidade hídrica, uma vez que a interceptação de água pela vegetação nativa é superior a outros tipos de ocupação e, por interferir na porosidade e na permeabilidade do solo, as modificações aumentam as variações de vazão e o escoamento superficial, que para esse último caso, pode reduzir o armazenamento de água nos aquíferos e resultar em enchentes e inundações durante períodos de chuva intensa, uma vez que a água não é absorvida pelo solo.(BRITO et al., 2019; FARIAS et al., 2021).

Os autores Farias et al. (2021) acrescentam que o levantamento do uso e ocupação do solo se faz importante para os estudos de uma bacia hidrográfica, pois é uma maneira de supervisionar o meio físico e as capacidades de uma bacia e é um fator primordial para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos contra as degradações causadas pelo homem.

3.2.2 Modelo Digital de Elevação

Nos últimos anos houve uma crescente utilização de softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na caracterização física de bacias hidrográficas. Isso se deve às facilidades na obtenção de ferramentas gratuitas e de código aberto para o uso, estudo e tratamento de dados espaciais, também conhecidos como imagens matriciais ou *raster*. São usadas geotecnologias para o processamento de imagens advindas do Sensoriamento Remoto a fim de modelar digitalmente a superfície terrestre (SOUZA; CRUZ; ARAGÃO, 2011, CECÍLIO et al., 2012).

Os Modelos digitais de terreno (MDT) correspondem a uma representação matemática e numérica de características espaciais ambientais que expressam, dentre outros, a superfície altimétrica do terreno. O MDT é conceitualmente dividido em Modelo Digital de Elevação, que representa especificamente a superfície topográfica do terreno, e em Modelo Digital de Superfície (MDS), que retrata a superfície territorial junto às demais matérias existentes que possuem valor de reflectância do pixel sobre ela (CORREA et al., 2017).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) reproduzem a superfície topográfica por meio das coordenadas cartesianas no plano com o adicional da variável altimétrica z , no qual z é a elevação de superfície (YOGI e STANGANINI, 2023). O MDE pode ser extraído por vetorização e interpolação de curvas de nível ou pelo tratamento de dados aéreos e orbitais (MEDEIROS; FERREIRA; FERREIRA, 2009).

Atualmente, o modelo está difundido em várias áreas de pesquisa relacionadas ao estudo da terra, como geomorfologia e hidrografia. Por causa da diversidade de aplicações e da disponibilidade de vários modelos pelos órgãos oficiais, a escolha do modelo deve considerar a qualidade e a resolução, pois há variância regional que podem ocasionar em erros verticais que se propagam no processamento de dados e no resultado (CREMON et al., 2022).

Dentre os modelos globais gratuitos acessíveis à comunidade acadêmica, o *Copernicus* DEM tem ganhado destaque. Conforme a Agência Espacial Europeia (ISTO), organização desenvolvedora da missão TanDEM-X entre 2011 e 2015, onde os dados do modelo foram adquiridos. O WorldDEM do *Copernicus* DEM está disponível gratuitamente nas resoluções de 30 e 90 metros desde 2019 e ambos os conjuntos de dados têm uma cobertura de superfície de aproximadamente 149 Mkm².

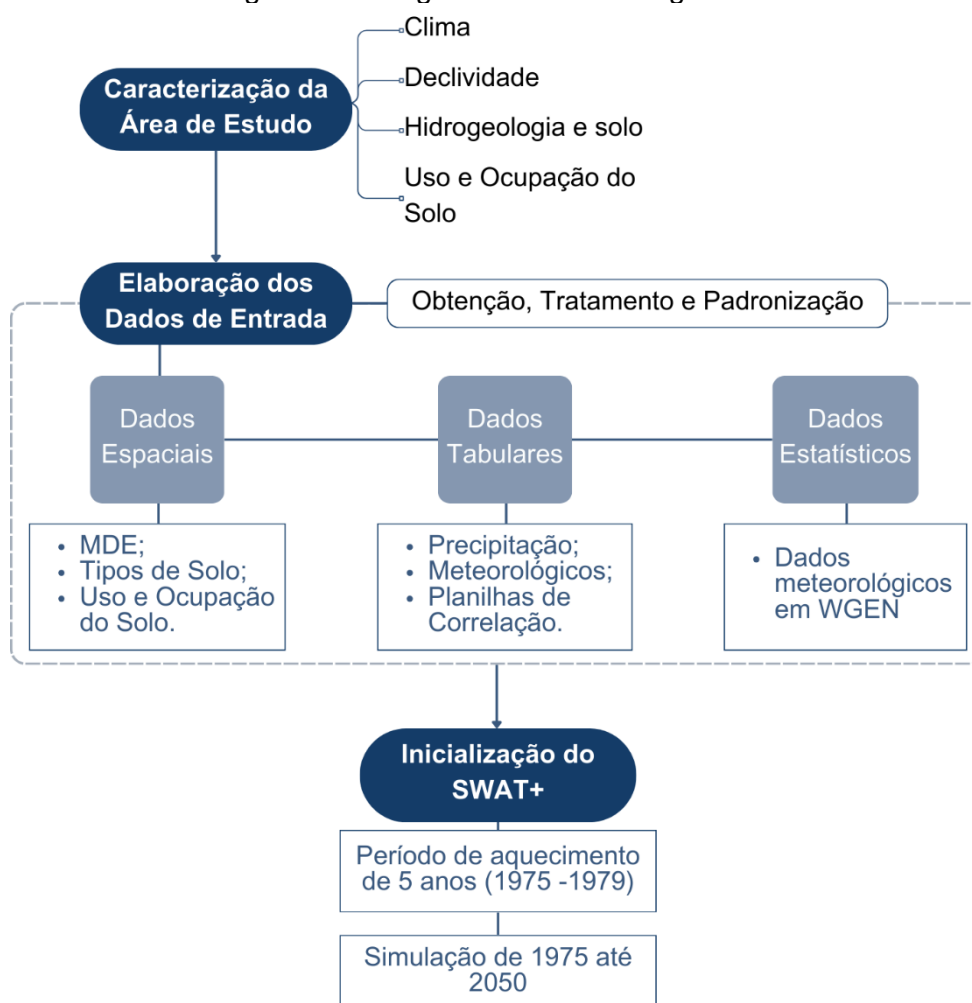
Cremon et al. (2022) afirma com base em revisão bibliográfica que COP-30 é superior em melhorias que os outros MDEs globais com 1 segundo de arco. O autor ainda conclui que a qualidade altimétrica dos dados do MDE COP-30 respeita os requisitos das normas brasileiras para mapas topográficos de 1:25.000 Classe B e 1:50:000 Classe A. Os dados espaciais de altitude do MDE COP-30 são uma alternativa para a falta ou baixa qualidade dos modelos em mapeamento topográfico semidetalhado nas regiões brasileiras com problemas de informações altimétricas.

Além disso, o Copérnico DEM foi produzido para suavizar e corrigir o fluxo dos rios (PINTO, 2022). No contexto de bacias hidrográficas, a adequada definição e modelação da superfície física do terreno possibilita executar a modelagem hidrológica de maneira robusta. O conhecimento da elevação do terreno auxilia na análise do escoamento na modelação hidrológica, haja vista que é o relevo que conduz o percurso e escoamento da água (MONTEIRO, 2021).

4 METODOLOGIA

Nesse item é apresentada a sequência de desenvolvimento do trabalho, em que a metodologia aplicada foi direcionada à pesquisa descritiva e à abordagem qualitativa do estudo de caso e dos resultados obtidos com a modelagem do SWAT+. Dessa forma, a realização do trabalho foi orientada a partir da caracterização da área de estudo e seus aspectos relevantes para compreensão dos processos hidrológicos da região. Em seguida os estudos relacionados à fundamentação do Modelo SWAT, cujos subitens são os módulos do SWAT; a elaboração e fonte dos dados de entrada, bem como tratamento e pré-processamentos dos arquivos exigidos; e, por último a inicialização, configuração e simulação do modelo. Um fluxograma dessas etapas é mostrado na figura 3.

Figura 3: Fluxograma da Metodologia do Trabalho

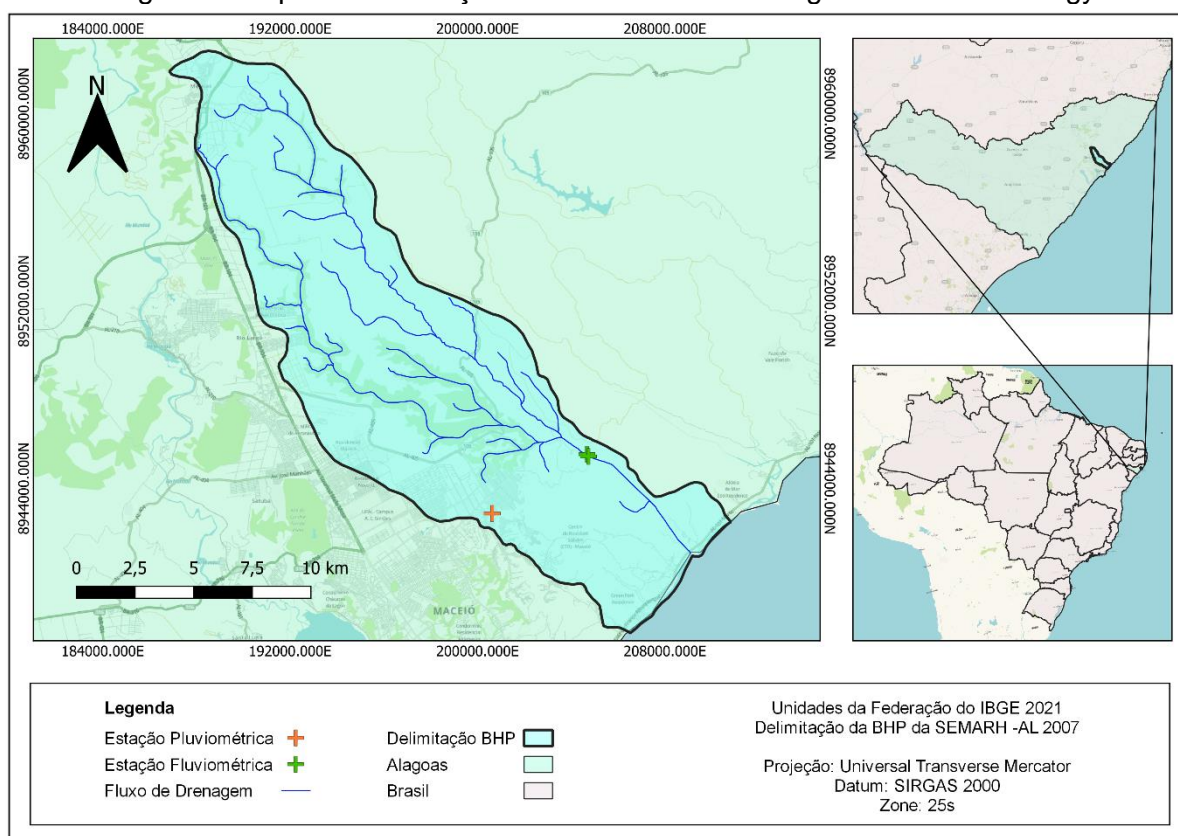


Fonte: Autora (2023)

4.1 Caracterização da área de Estudo

A área em estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Pratagy (BHP), localizada no Leste Alagoano e na Região Hidrográfica do Pratagy, junto às bacias metropolitanas, rio Meirim e rio Sapucaí. O Pratagy é o principal curso dessa região, possui o maior volume de drenagem de água e é responsável por alimentar o Sistema de Abastecimento Pratagy, com cerca de 40% de contribuição. Está inserido integralmente na zona metropolitana do estado de Alagoas e abrange os municípios de Maceió, Messias e Rio Largo. De acordo com Pedrosa (1999), cerca de 60% da área da bacia situa-se na capital alagoana e o restante nos outros dois municípios, onde se encontram suas nascentes.

Figura 4: Mapa de localização e clima da Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy



Fonte: Autora (2023)

A bacia do Pratagy deságua no Oceano Atlântico e faz fronteira ao norte com a bacia do rio Meirim, ao oeste com a do rio Mundaú e Camaragibe, a Leste com a faixa litorânea e ao sul com as bacias Mundaú e litorâneas do município. Situa-se entre as latitudes 8.941.000 N e 8.970.000 N e longitudes 187.000 E e 213.500 E.

Segundo a Base Cartográfica das Regiões Hidrográficas da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL), a bacia possui área de, aproximadamente, 194,774 km².

O bioma da bacia é o Mata Atlântica e essa região é protegida pela Área de Proteção Ambiental (APA) do Pratagy, criada pelo Decreto nº 37.589/1998. Conforme imagens de satélite do Projeto MapBiomas (1985 - 2021), ao longo dos anos, essa região é acometida pelo aumento de áreas urbanas em detrimento do avanço da agricultura e pastagem. No entanto, a monocultura da cana-de-açúcar predomina em zonas de mata ciliar e é considerada um problema pelo Instituto do Meio Ambiente do Estado de Alagoas.

Atualmente, conforme informações colhidas em visita à captação do Sistema de Produção Pratagy, foi reportado por trabalhadores da Companhia de Saneamento de Alagoas - CASAL, que o rio tem sofrido com problemas de assoreamento, identificado como solo massapé, e proliferação de plantas aquáticas, denominadas de baroa, no qual se suspeita ser a causa do aumento de turbidez da água. Além disso, em períodos de chuva a qualidade da água também é prejudicada.

4.1.1 Clima

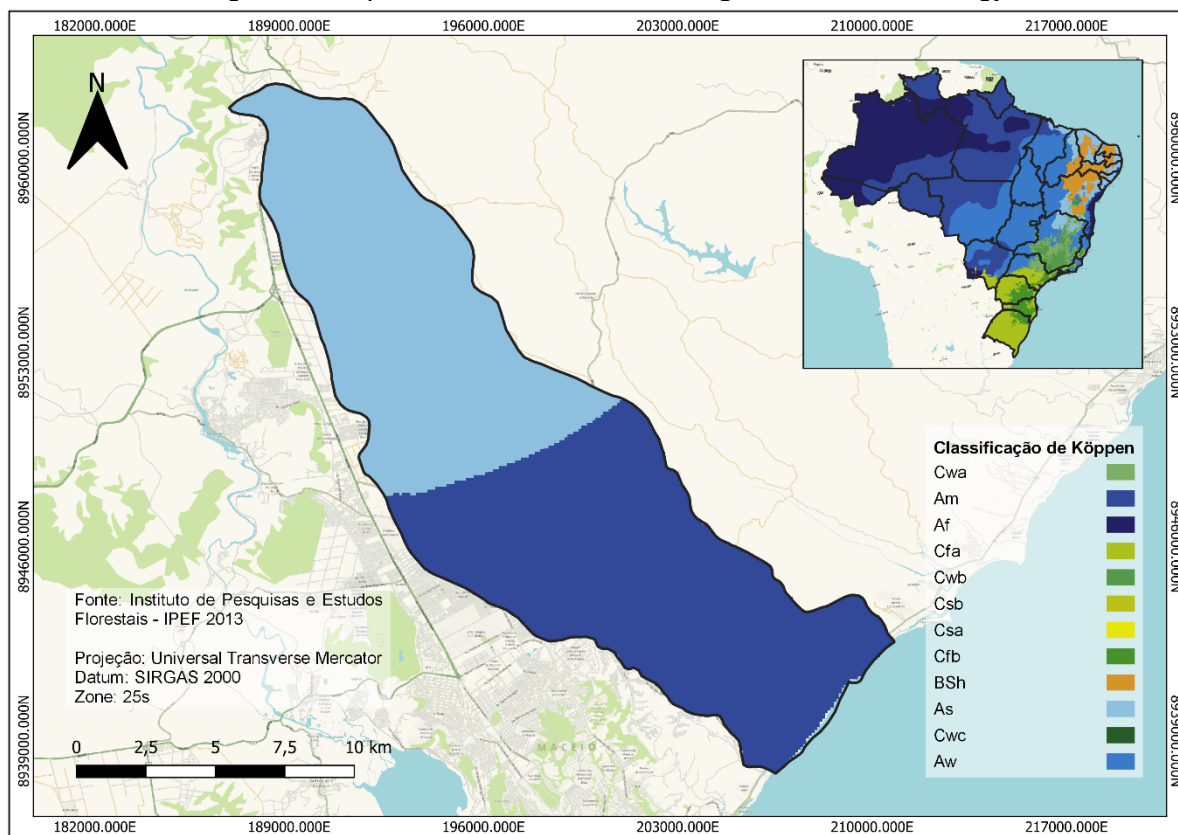
A área de estudo é definida pela Classificação Climática de Köppen como clima tropical, com subclimas As e Am, clima tropical com estação seca de verão e clima de monção, respectivamente. Ainda de acordo com Köppen, ambas as classificações se caracterizam por um limite térmico e pluviométrico de 12 meses > 18 °C e variação anual de temperatura isotermal (amplitude < 5 °C).

Considera-se a classificação As como predominante na região da BHP, uma vez que monção é um termo que descreve uma reversão sazonal na direção do vento e é o mecanismo responsável pelo transporte da umidade do oceano para o continente. Logo, a monção interfere no clima As e no ciclo anual da precipitação em grande parte do continente da América do Sul (REBOITA et al, 2021).

Como pode ser observado na figura 5, o clima Am ocorre nos tabuleiros costeiros da BHP, enquanto o clima As é hegemônico no oeste do mapa. A temperatura média do ar na região do Pratagy varia de 24 °C a 27 °C, enquanto o

período mais quente ocorre entre os meses de novembro e abril. A precipitação anual total pode chegar entre 1300 a 1900 mm, sendo de abril a agosto o período mais chuvoso (ALVARES et al, 2013).

Figura 5: Mapa de clima da Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy



Fonte: Autora (2023)

Consoante informações do Relatório Síntese do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Alagoas (2010), as massas de ar e circulação atmosférica da bacia Pratagy são provenientes dos sistemas meteorológicos frontais e zonas do leste. A evaporação anual da região é inferior à 1400mm e a evapotranspiração anual corresponde a variações menores que 1200mm, nas proximidades do oceano atlântico, e entre 1200mm a 1300mm.

4.1.2 Declividade

Foram realizadas análises prévias da declividade (quadro 1), em vista a sua importância para a modelagem hidrológica. As classes de declividade foram extraídas do *Copernicus* DEM e reclassificadas, conforme Embrapa (2018).

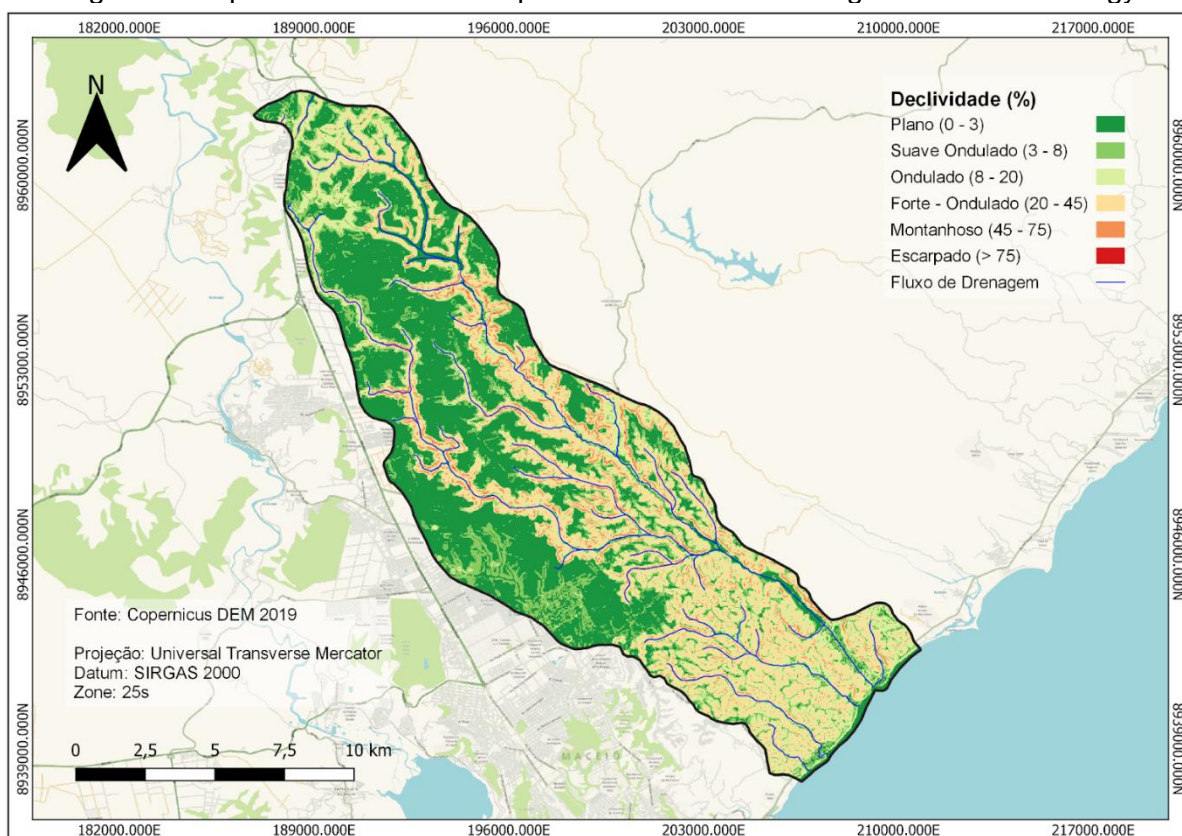
Quadro 1: Fases do relevo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy

Classes	Relevo	Declividade (%)	Área (Km²)	%
1	Plano	0 - 3	69,59	36,27
2	Suave Ondulado	3 - 8	32,48	16,93
3	Ondulado	8 - 20	35,68	18,60
4	Forte Ondulado	20 - 45	46,95	24,47
5	Montanhoso	45 - 75	7,13	3,72
6	Escarpado	> 75	0,03	0,02
Área Total			191,86	100

Fonte: Elaborado pela Autora (2023) com base em Embrapa (2018)

Buscou-se compreender as inclinações do terreno, uma vez que a inserção de parâmetros de declividade é essencial à etapa de criação das Unidades de Resposta hidrológica do modelo SWAT+, sendo essa a forma mais adequada para a escolha dos intervalos de relevo. A figura 6 representa a disposição das declividades no mapa.

Figura 6: Mapa de fases de relevo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy



Fonte: Autora (2023)

4.1.3 Hidrogeologia e Solo

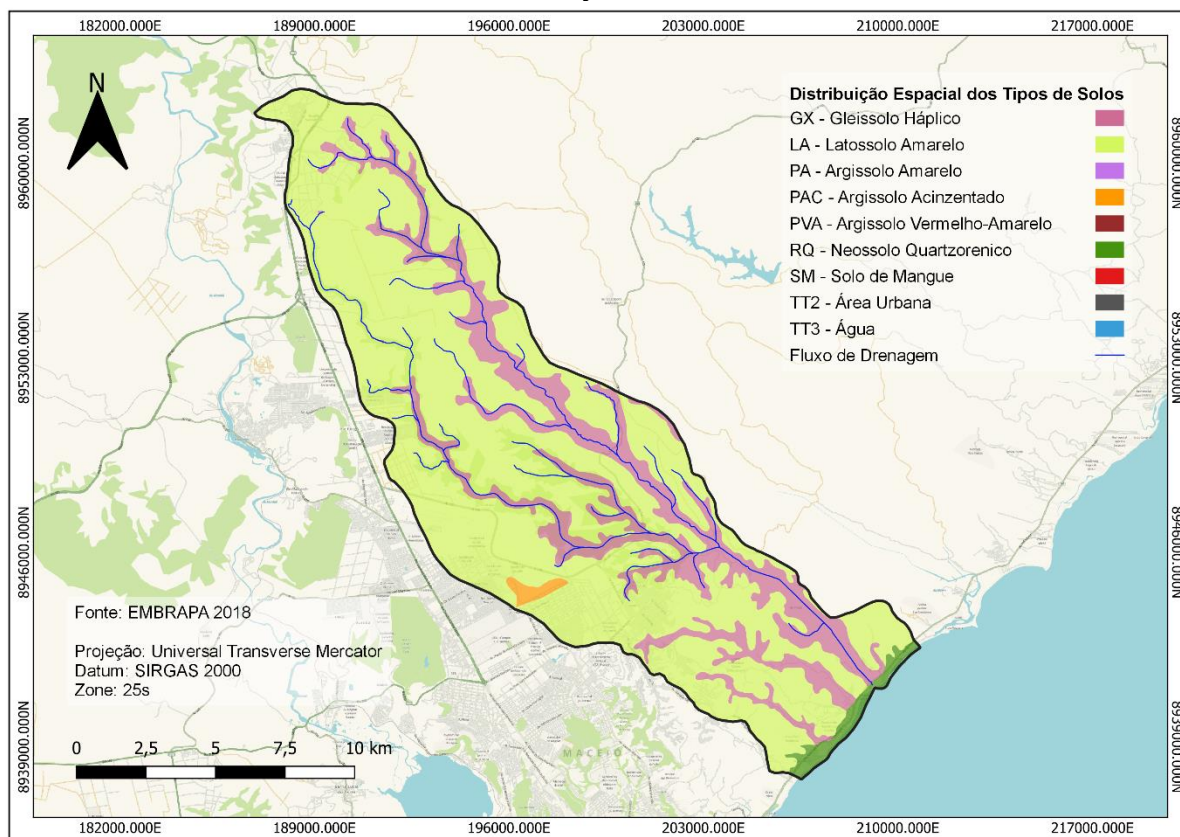
A bacia hidrográfica do rio Pratagy está inserida completamente no domínio sedimentar clássico poroso, unidade geológica Barreiras e província estrutural Cobertura Cenozoica. A presença da Formação Barreiras é expressiva no litoral do estado de Alagoas, apresentando uma considerável variação litológica com a ocorrência de camadas de areia, silte e argila, que refletem diferentes capacidades de condução hidráulica, tanto na vertical quanto na horizontal. Os níveis aquíferos de maior oferta de vazões hídricas se encontram na porção com predominância de sedimentos arenosos (ALAGOAS, 2010).

Em relação aos solos, a bacia em estudo possui nove grupamentos texturais, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). O mapa da figura 7, extraído da base cartográfica do EMBRAPA (2021), apresenta maior área do grupo latossolos amarelos, com 137,36 Km² e com um percentual de 70,52% do total.

O segundo solo de maior prevalência são os gleissolos háplicos com área de 44,50 Km², ou seja 22.85% da bacia, e também é nele onde ocorrem os fluxos de drenagem do rio. Argissolo acinzentado e neossolos quartzarênicos estão presentes em quantidades de 0,55% e 1,5%, respectivamente.

As áreas urbanas são tidas por Cuccio, Lima e Giarola (2004) como antropossolos, ou seja, áreas criadas artificialmente pelo homem; e que se tornou uma classe em expansão devido ao crescimento populacional e ao desconhecimento das consequências provocadas pela ação humana sobre os solos. Por isso, há grande dificuldade em classificá-las e o sistema SiBCS ainda não as definiu. O percentual dos demais solos é muito pequeno e considerado irrelevante para o estudo.

Figura 7: Mapa de distribuição espacial dos solos de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos



Fonte: Autora (2023)

A respeito dos solos dominantes, os Gleissolos Háplicos possuem horizonte gleissólico, ou seja, acúmulo de argila. São definidos como hidromórficos, pois se encontram permanente ou periodicamente saturados por água. Sua composição contém matéria mineral com redução e solubilização do ferro, motivo pelo qual apresenta cores escuras (EMBRAPA, 2021).

Ademais, ainda de acordo com EMBRAPA (2021), os Latossolos Amarelos são caracterizados por sua cor amarela-avermelhada e são encontrados em regiões tropicais e subtropicais, com alta exposição solar e baixa umidade. Em termos hidrológicos, esse último possui baixa capacidade de retenção de água, resultando em uma maior suscetibilidade à erosão e ao escoamento superficial em áreas de declive acentuado. Além disso, eles podem apresentar camadas coesas abaixo do horizonte A, o que limita a infiltração de água.

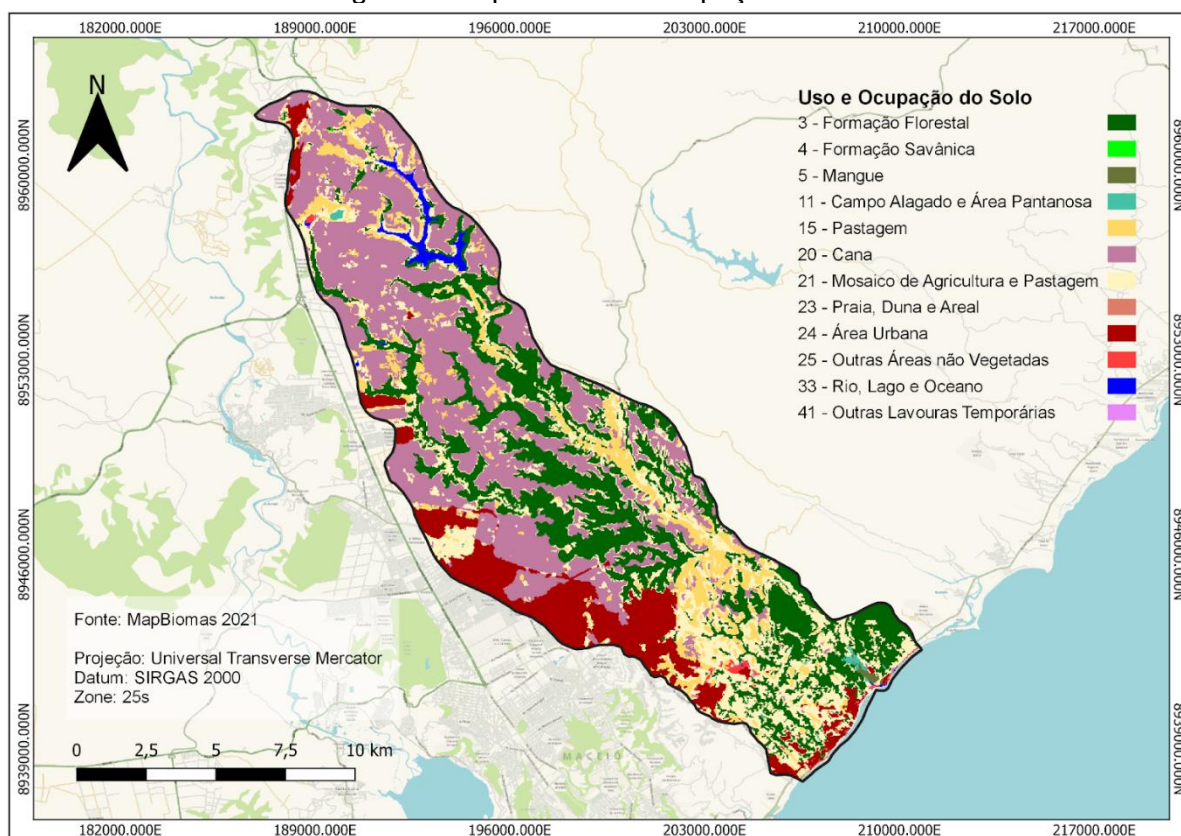
4.1.4 Uso e Ocupação do Solo

Para esse trabalho, o mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo (figura 8) foi gerado através da classificação de imagens dos satélites *Landsat* do projeto MapBiomias (2021). A Bacia Hidrográfica do rio Pratygy possui, conforme classificação pixel a pixel de imagens do projeto MapBiomias, 12 tipos de uso e ocupação do solo.

A partir da figura 8, constata-se que a maior ocupação da bacia no ano de 2021, período máximo que o projeto disponibiliza informações, foi a de cultivo de cana de açúcar, sendo essa prioritária até mesmo no ano de 1985, ano de início do projeto.

Outra observação, que pode ser verificada nos dados históricos do projeto MapBiomias, é que de 1985 a 2021 houve um grande avanço de áreas de infraestrutura urbana e um aumento considerável de pastagem e corpos d'água capturados pelo satélite.

Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo



Fonte: Autora (2023)

4.2 Elaboração dos Dados de Entrada

O SWAT requer uma grande quantidade de informações para a modelagem hidrológica e, apesar de o modelo dispor de bancos de dados padronizados para variáveis de entrada, em escala global e continental, as informações contidas neles não abrangem de forma adequada a área de estudo. Por isso, foram utilizadas informações locais disponíveis em bases públicas (quadro 2).

O modelo exige essencialmente entradas de dados físicos, tabulares e estatísticos, conforme descritos a seguir:

- Os dados espaciais são inseridos em formato *raster* e correspondem aos arquivos de modelo digital de elevação, uso e ocupação do solo e tipo de solo;
- Os dados tabulares são referentes aos dados meteorológicos e de precipitação com série histórica diária e às tabelas de associação de informações aos dados espaciais; e

- Os dados estatísticos são as variáveis meteorológicas diárias pré-processadas em planilha Macro WGEN.

Quadro 2: Fontes dos dados hidrológicos e meteorológicos utilizados na modelagem hidrológica do SWAT

Tipo	Descrição		Período	Base Oficial	Plataforma
Espacial	Modelo Digital de Elevação		2019	Programa Copernicus	<i>European Space Agency</i>
	Uso e Ocupação do Solo		2021	MapBiomias	<i>Google Earth Engine</i>
	Tipo de Solo		2023	ZAAL	Embrapa Solos
Tabular	Precipitação	Série Diária	1975 - 2020	ANA	HidroWeb (<i>plug-in ANA Data Aquisition</i>)
	Meteorológico			INMET	Portal INMET
	Tabelas de Associação	Uso e Ocupação do Solo	-	Correlação	SWAT e MapBiomias
		Tipos de Solo	-	Pedotransferência	SWAT e ZAAL
Estatísticos	Dados em WGEN com estatística mensal (CSV)		1975 - 2020	Planilha Macro	SWAT

Fonte: Autora (2023)

O SWAT+ disponibiliza, em sua pasta de programas instalados, exemplares dos formatos de dados aceitos. Por se tratar da inserção dos dados locais, precisou-se tratar e padronizar os *inputs* (dados de entrada) ao formato SWAT. No caso das séries temporais de precipitação, preencheu-se as lacunas com falhas de medição, por meio de interpolação linear, utilizando-se ainda de ferramentas disponíveis no site oficial do SWAT para tratar e gerar estatísticas climáticas com os demais dados meteorológicos.

Já em relação aos dados espaciais, foi necessário extrair seus dados e os organizar em tabelas, com formato adequado para serem inseridos no modelo e cruzados com as informações dos bancos existentes no SWAT+.

4.2.1 Dados Espaciais

Os dados espaciais possuem dimensão e projeção cartográfica representando as camadas matriciais do MDE, tipos de solo e uso e ocupação do solo, nos quais após inseridos ao projeto, por meio do QSWAT+, são cruzados e processados a fim de gerar informações físicas da área de estudo. Com base nisso, o SWAT+ somente aceita os dados com mesmas propriedades espaciais.

Nesse contexto, o MDE foi obtido do Programa *Copernicus*, com valores decimais (*flot*) e com tamanho *pixel* de 30m (resolução espacial) em sistema de coordenadas métricas na linha do Equador. A partir desses requisitos o *raster* classificado do uso e cobertura do solo foi obtido a partir da Plataforma *Google Earth Engine* (GEE) do projeto MapBiomias 2021, também com resolução espacial de 30m por *pixel*.

Já os dados de solo foram extraídos em formato de vetor da base de metadados do Embrapa junto ao Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas (ZAAL) - representando a distribuição espacial dos solos do Estado de Alagoas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2006). Logo, devido às exigências do modelo para camadas espaciais, os dados de solos, através do QGIS, foram vetorizados para *raster* com a mesma resolução dos demais dados matriciais.

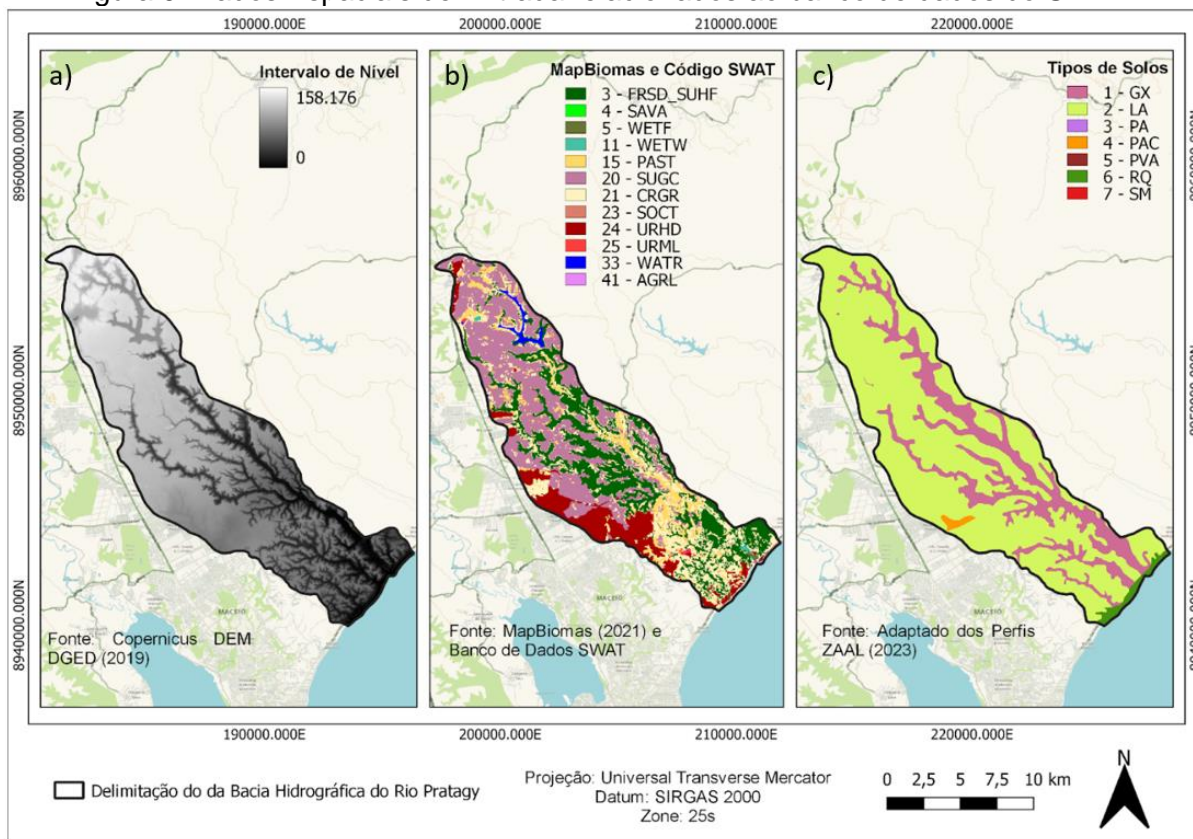
Após obtidas, as camadas foram reprojctadas por funções nativas do QGIS 3.22 junto ao módulo GRASS GIS, ambos *softwares* operados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) e de código-fonte aberto e gratuito. O sistema de Referência de Coordenadas definido foi o SIRGAS 2000/ *Universal Transverse Mercator* - UTM zone 25s (EPSG 31985), visto que condiz adequadamente à região de estudo e às configurações exigidas pelo SWAT.

Todos os dados espaciais foram recortados usando como máscara (referência) a delimitação da bacia hidrográfica do rio Pratagy, extraído da base de dados da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos - SEMARH, conforme a figura 9.

Enquanto isso, o dado de distribuição de solo precisou ser generalizado, devido à falta de informações dos perfis de solos disponíveis no Brasil e, conseqüentemente, no estado de Alagoas. O arquivo original possuía 9 grupamentos de solo, no qual as áreas relativas a áreas urbanas e água, foram incorporadas, de acordo com a malha

municipal do IBGE 2010 e Embrapa 2014, às áreas de latossolos amarelos, correspondendo ao mapa mostrado na figura 9.

Figura 9: Dados Espaciais de Entrada relacionados ao banco de dados do SWAT+



Fonte: Autora (2023)

4.2.2 Dados Tabulares

Os dados tabulares são convencionados no SWAT como tabelas em CSV (*Comma-separated values*) e em extensão .txt. Esses arquivos são referentes às tabelas de associação aos dados espaciais, dados meteorológicos e de precipitação das estações observadas. O SWAT, por ser um programa robusto e especializado em hidrossedimentologia, possui um grande volume de dados, de várias regiões do planeta, para associar ao formato espacial das classes de tipos de solos e uso e ocupação do solo.

Esses bancos de dados pré-existentis servem para anexar informações específicas e detalhadas, definindo a relação espacial dos objetos dentro da bacia hidrográfica. Os seguintes bancos de dados estão disponíveis no SWAT+:

- Plantas/cobertura do solo: plants.plt
- Uso do solo urbano: urban.urb;
- Cultivo: tillage.til;
- Fertilizante e esterco: fertilizer.frt;
- Pesticidas: pesticide.pes;
- Sistemas Sépticos: septic.sep

Todavia, há locais, como o Brasil, que as informações não correspondem às encontradas nas áreas de estudo. Portanto, é preciso realizar correlações e transferências de dados para serem compreendidos pelo software.

No que diz respeito ao uso e ocupação do solo, as classes adquiridas no Projeto MapBiomias foram correlacionadas (quadro 3) à base de dados do SWAT+, denominada como *plant* e *urban*, através das descrições contidas nesses bancos e nos documentos oficiais do MapBiomias de cada uma das classes. Tais informações foram tabuladas em CSV, apenas com o ID da classe, que é o mesmo definido no dado espacial de uso e ocupação do solo, e o código SWAT (coluna “*name*” para os bancos de dados).

Quadro 3: Correlação entre os dados de uso e ocupação do solo da BHP e o código SWAT

ID MapBiomias	Descrição	Código SWAT
3	Formação Florestal	FRSD_SUHF
4	Formação Savânica	SAVA
5	Mangue	WETF
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	WETW
15	Pastagem	PAST
20	Cana	SUGC
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	CRGR
23	Praia, Duna e Areal	SOCT
24	Área Urbana	URHD
25	Outras Áreas não Vegetadas	URML
33	Rio, Lago e Oceano	WATR
41	Outras Lavouras Temporárias	AGRL

Fonte: Autora (2023)

No que concerne aos tipos de solo, a quantidade de dados específicos e complexos é muito maior. No Brasil, parte desses dados não são medidos em campo,

o que corrobora a uma ausência significativa de características dos perfis de solos. Segundo Saxton e Rawls (2006), funções de pedotransferências, na falta de dados do comportamento e propriedades da água no solo e das relações entre plantas e água, são essenciais para estimar, baseadas em aspectos do solo (como matéria orgânica, profundidade e textura), o potencial hídrico e a condutividade hidráulica.

Dessa forma, realizou-se cálculos estatísticos para pedotransferência, com base nas funções de Saxton e Rawls (2006) e por meio de uma planilha Macro. Ao longo destes cálculos foram definidos, primeiro, os grupos hidrológicos dos solos, tendo como referência a classificação hidrológica de solos revisada do “*Natural Resources Conservation Service*” (NRCS, 2009) e informações fornecidas por Embrapa Solos (1975 e 2020). Os demais dados pedológicos, essenciais para a realização da pedotransferência, estão listados abaixo e foram extraídos dos documentos do ZAAL (Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas), autoria de Araújo Filho et al. (2020), Embrapa Solos.

- 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);
- 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 (t.m² .hr/m³ .t.cm).

Ao final dos processos da planilha Macro, foi gerada uma tabela em CSV com dados adicionais para cada tipo de solo e no padrão sequencial do banco de dados referente a solos do SWAT+.

Acerca dos dados meteorológicos (precipitação, vento, umidade relativa, radiação solar e temperaturas mínima e máxima), avaliou-se, inicialmente, os postos pluviométricos e fluviométricos operados pela ANA e pertencentes à bacia Pratygy (quadro 4).

Quadro 4: Postos de monitoramento nos limites de área de estudo

Código	Posto	Nome	Operador
935069	Pluviométrico	Benedito Bentes	CEMADEN
39653000	Fluviométrico	Maceió	SEMARH-AL
39762100			

Fonte: Autora (2023)

No entanto, nenhum dos 3 postos sob domínio da bacia dispõe de série de dados preenchida. Além desses, verificou-se também o catálogo de estações do INMET, sendo possível confirmar que não há posto operado pelo instituto dentro dos limites da área de estudo.

Com isso, foi necessário utilizar como referência o trabalho de Pedrosa et al. (2005), ao qual utiliza técnicas de regionalização de vazões, para transportar dados de precipitações e vazões, a fim de estimar oferta e demanda hídrica no rio Pratygy. Ao todo, o estudo avaliou 8 postos de monitoramento da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), como pode ser observado na figura 10, em rios que apresentam características fisiográficas semelhantes às da bacia do rio Pratygy e que estão inseridos na bacia do Atlântico Norte-Nordeste.

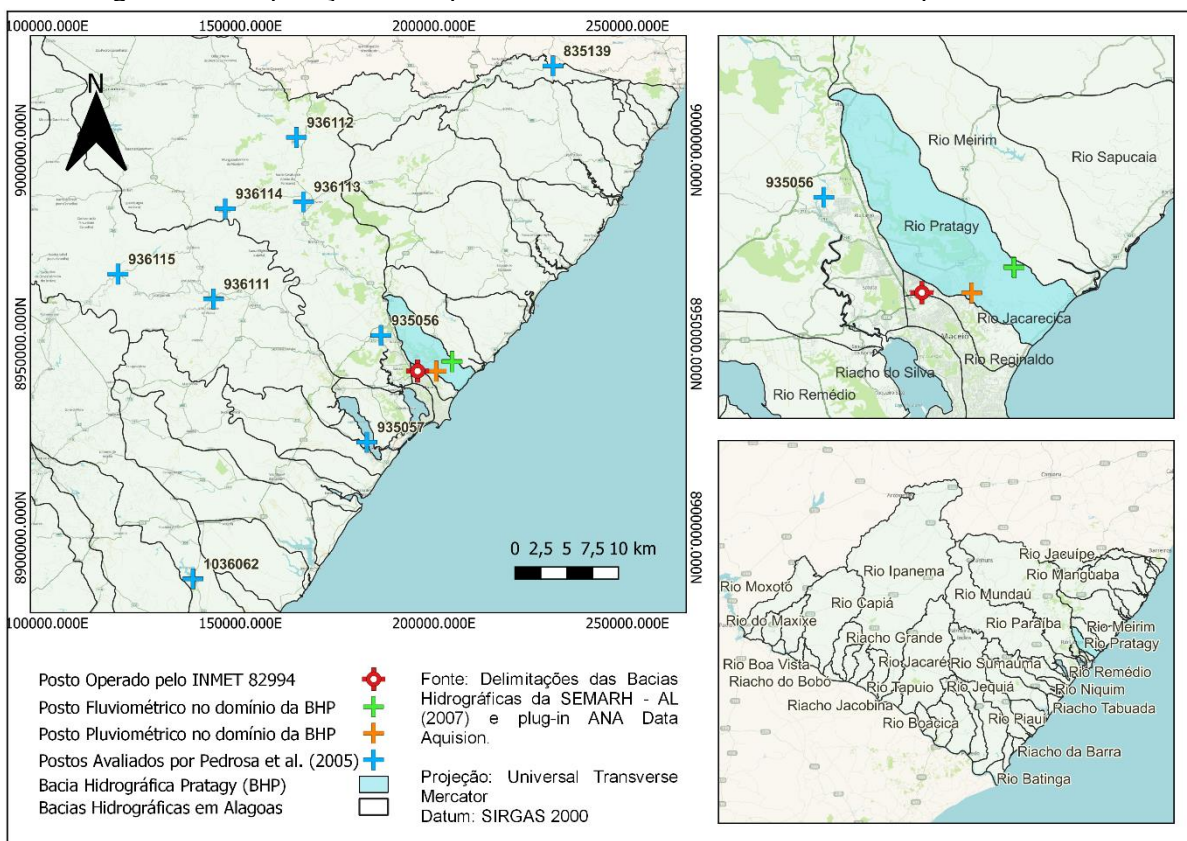
Adotou-se, portanto, como estação principal, conforme quadro 5 e figura 10, o posto convencional 82994 do INMET, visto que esta é a estação mais próxima do domínio da bacia e nele há todas as colunas de dados meteorológicos exigidas pelo SWAT, exceto ponto de orvalho, radiação solar e precipitação máxima de meia hora que precisaram ser extraídos a partir dos dados existentes.

Quadro 5: Postos vizinhos de monitoramento usados na modelagem do SWAT

Código	Posto	Município	Função
935056	Precipitação - ANA	Rio Largo	Interpolação
82994	Convencional - INMET	Maceió	Principal

Fonte: Autora (2023)

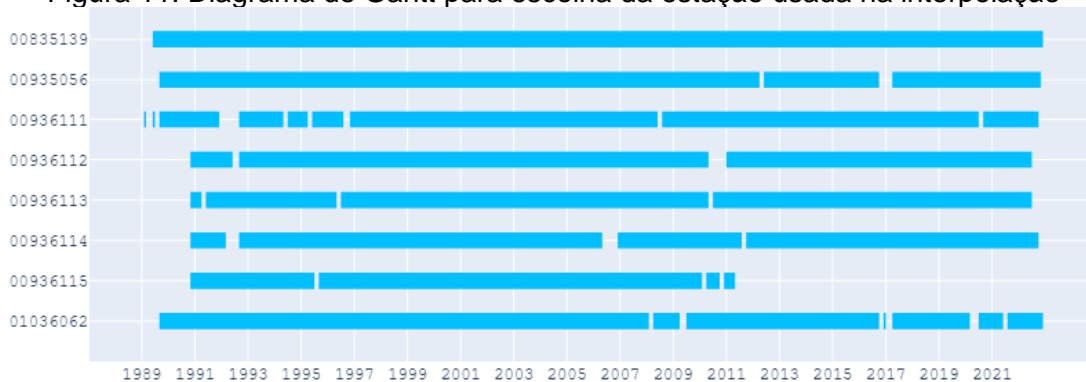
Figura 10: Disposições dos postos de monitoramento avaliados para o trabalho



Fonte: Autora (2023)

Devido à necessidade de usufruir de séries sem falhas de preenchimento, foram analisadas por diagrama de Gantt (figura 11) as estações avaliadas pelo trabalho de Pedrosa et al. (2005), a fim de preencher lacunas vazias nos dados de precipitação da estação 82994 do INMET. Isto posto, escolheu-se a estação 935056 (quadro 5), operada pela ANA, por ser um pluviômetro com dados consistentes e também próximo da área de estudo.

Figura 11: Diagrama de Gantt para escolha da estação usada na interpolação



Fonte: Autora (2023)

Para isso, foi usado como método de preenchimento de dados ausentes da estação principal a interpolação linear da estação vizinha, por meio da linguagem de programação Python - módulo *scipy.interpolate* e função *interp1d* -, assumindo que a série tem comportamento constante, foi definida a equação da reta para estimar os valores da variável desconhecida.

Vale ressaltar que essa etapa foi executada tendo em vista, também, o cálculo da série de precipitação máxima de meia hora, uma vez que os cálculos são feitos com base no total de anos da precipitação diária, superestimando o resultado caso haja muitos intervalos com falhas.

No geral, os dados da estação 82994 precisaram passar por um processo de padronização e cálculos preliminares, onde o período de análise definido corresponde ao intervalo de 1975 a 2020. Ao final, foram gerados arquivos separados de extensão .txt para cada um dos dados meteorológicos e outros arquivos com as informações de latitude, longitude e elevação referentes a esses dados.

4.2.3 Dados Estatísticos

Os dados estatísticos se referem ao arquivo de entrada do gerador meteorológico, cujos dados partem das séries diárias meteorológicas (precipitação total; precipitação máxima de meia hora; velocidade do vento; temperaturas máximas e mínimas; radiação solar; umidade e ponto de orvalho) pré-processadas a fim extrair estatísticas mensais da série diária analisadas. Esses dados são necessários para a geração de dados climáticos diários representativos para as sub-bacias, ocorrendo em duas circunstâncias: para preencher dados ausentes ou simular dados meteorológicos (ARNOLD et al., 2012).

O arquivo de entrada do gerador meteorológico do SWAT+ *Editor* pode ser obtido por meio de uma planilha Macro, elaborada por BOIS-RAMÉ (2011), disponível no site oficial do SWAT. Por meio desta planilha, é possível extrair uma sequência de dados a serem inseridas no modelo em formato próprio, denominado WGN. Conforme Arnold et al. (2012), o ideal seria utilizar, pelo menos, 20 anos de registros de todos os dados meteorológicos para cálculo dos parâmetros.

Os dados estatísticos podem ser adicionados ao SWAT+ *Editor* por três meios: usando a base de dados padrão existente nos bancos do SWAT; em um único CSV ou em dois CSV's, ambos os últimos para estação meteorológica observada pelo usuário. Os arquivos em CSV precisam informar a latitude, longitude e altitude das estações de onde foram gerados os arquivos pré-processados em WGEN. No projeto, podem ainda ser usados dados de mais de uma estação e, inclusive, dados meteorológicos de estações diferentes.

Nesse trabalho, usou-se a mesma estação meteorológica do INMET (82994) e extraiu-se dos dados existentes nessa estação os demais dados usados para a estatística. Em relação ao ponto de orvalho, o cálculo foi realizado por linguagem *Python*, a partir das equações 2 e 3, com base em Allen et al. (1998) e Häckel (1999), respectivamente.

$$e_s = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27*T}{T+237.3}\right) * \frac{RF}{100} \quad (2)$$

$$dew = \frac{237,3 * LN\left(\frac{e_s}{0,611}\right)}{17,27 - LN\left(\frac{e_s}{0,611}\right)} \quad (3)$$

Onde:

e_s é a pressão parcial de vapor de água em hPa;

T é a temperatura do ar em graus Celsius;

RF é umidade relativa do ar em porcentagem;

dew é o ponto de orvalho em graus Celsius.

A radiação solar e a precipitação máxima de meia hora foram elaboradas de acordo com a planilha desenvolvida por Bressiani (2013), com base na planilha de Francois Delobel, e fórmulas de referência da *Food and Agriculture Organization of The United Nations* (FAO, 2009).

A tabela inserida no modelo que se refere aos dados meteorológicos após processamento estatísticos pode ser observada na tabela 1, cuja descrição da nomenclatura dos dados usados pelo SWAT pode ser vista na sequência.

Tabela 1: Dados meteorológicos estatísticos para estação convencional do INMET

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
tmp_max_ave	30.7	30.9	30.9	30.1	29.1	28.0	27.3	27.5	28.2	29.5	30.4	30.7
tmp_min_ave	22.1	22.4	22.5	22.3	21.7	21.0	20.3	20.2	20.6	21.3	21.5	21.9
tmp_max_sd	1.4	1.4	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.3	1.4	1.3	1.4
tmp_min_sd	1.4	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3
pcp_ave	78.2	93.8	128.6	225.1	290.2	304.3	284.2	177.2	117.8	72.1	46.8	46.4
pcp_sd	7.5	9.4	11.4	17.0	18.1	18.0	15.2	10.2	9.0	7.6	6.8	5.4
pcp_skew	6.2	6.3	5.5	5.0	3.8	4.3	4.1	4.4	4.9	6.9	11.4	7.5
wet_dry	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2
wet_wet	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6
pcp_days	11.7	13.0	14.9	19.1	22.6	25.2	25.8	22.6	17.5	12.2	10.2	9.3
pcp_hhr	54.2	91.3	89.3	119.4	103.8	112.7	111.4	84.9	65.6	58.4	84.2	53.5
slr_ave	22.6	22.2	20.2	18.3	16.3	14.6	14.9	17.3	19.3	22.2	23.7	22.9
dew_ave	16.2	16.3	16.8	16.8	17.8	15.8	17.1	16.1	17.2	17.4	16.9	17.5
wnd_ave	3.7	3.2	3.0	2.7	2.7	3.1	3.1	3.2	3.5	3.9	4.2	3.9

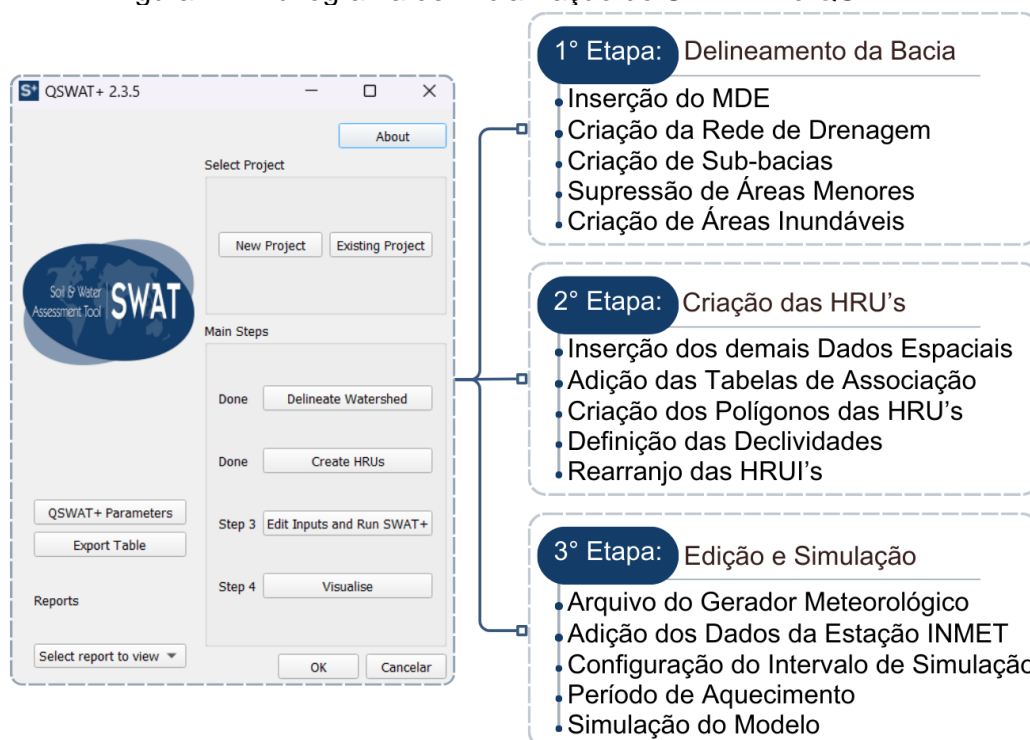
Fonte: Compilação dos dados executados pela autora (2023)

- tmp_max_ave: Temperatura média ou média diária máxima do ar para o mês;
- tmp_min_ave: Temperatura média ou média diária mínima do ar para o mês;
- tmp_max_sd: Desvio padrão da temperatura máxima diária do ar no mês;
- tmp_min_sd: Desvio padrão da temperatura mínima diária do ar no mês;
- pcp_ave: Precipitação mensal média ou média total;
- pcp_sd: Desvio padrão para precipitação diária no mês;
- pcp_skew: Coeficiente de inclinação para precipitação diária no mês;
- wet_dry: Probabilidade de um dia chuvoso após um dia seco no mês;
- wet_wet: Probabilidade de um dia com chuva após um dia com chuva no mês;
- pcp_days: Número médio de dias de precipitação no mês;
- pcp_hhr: Precipitação máxima de meia hora no mês;
- slr_ave: Radiação solar média diária por mês;
- dew_ave: Temperatura média diária do ponto de orvalho para cada mês (°C);
- wnd_ave: Velocidade média diária do vento no mês.

4.3 Inicialização do SWAT+

Após a elaboração dos dados de entrada, foi criado um novo projeto no *plug-in* QSWAT+, versão 2.4.6, cujo esquema do processo de inicialização do SWAT+ pode ser observado a partir da figura 12.

Figura 12: Fluxograma de Inicialização do SWAT+ no QSWAT+



Fonte: Autora (2023)

A primeira etapa da inicialização do SWAT+, delimitação da bacia, é iniciada com a inserção do MDE. Em seguida, há dois caminhos para delimitar a drenagem da bacia: extrair diretamente no software, a partir do MDE, ou inserir arquivos vetoriais pré-existent da rede de drenagem e de pontos de exutório, reservatório, lagos ou lagoas e outros pontos de estudo ou áreas de exceção.

Nesse trabalho, os rios principais e canais menores foram criados e seus parâmetros de área definidos por teste, de modo a se aproximar ainda mais da rede de drenagem disponível nos sites oficiais da área de estudo. Os exutórios (outlets para o modelo) foram desenhados considerando os canais principais maiores e região de menor elevação, sendo possível criar as sub-bacias para, ao final, analisá-las.

Áreas de sub-bacias inferiores a 20%, foram selecionadas e aderidas às sub-bacias adjacentes, para que todas tenham ordem de grandeza similares. A supressão de sub-bacias muito pequenas corrobora com Arnold et al. (1998), uma vez que, ao considerar na simulação sub-bacias com áreas de contribuição muito pequenas em relação à área total da bacia o modelo pode ter seus resultados mascarados, sendo seu funcionamento comprometido.

Ainda na primeira etapa, há opções de análise da paisagem; isto é; criação de áreas inundáveis separadas do restante da paisagem. Então, foi criada, por meio de

margens – originando-se da rede de drenagem -, uma nova camada apenas para áreas inundáveis, chamada de *landscape*. Outras opções disponíveis no QSWAT+, como adicionar lagos, não foram usadas.

A segunda etapa, criação das Unidades de Resposta Hidrológicas, somente é desbloqueada após a finalização da primeira e inicia com a adição dos dados espaciais de uso e ocupação dos solos e de tipos de solos. Em seguida, são atribuídos os dados tabulares, já padronizado em CSV, de correlação e adição de informações aos dados espaciais. No banco de exemplos do modelo, encontrado na pasta do programa, há tabelas com exemplares desses dados tabulares, de modo que, por convenção, nesse trabalho, também foram usadas as mesmas nomenclaturas.

É na criação das HRU's que são usadas as classes de declividade em porcentagem apresentadas no quadro 1, cujos intervalos de relevo são integrados aos demais dados, a fim de criar as HRU's. Também é nessa etapa que a camada de áreas inundáveis, criada na etapa 1, pode ser adicionada, mas é uma camada opcional.

Durante o processamento, optou-se por gerar um arquivo vetorial com os polígonos dos HRU's, de tal maneira que, ao avaliar esse arquivo, foi constatada a ocorrência de muitas áreas com apenas um pixel, que podem caracterizar falhas dos atributos espaciais e que não são significativos para o estudo. Portanto, optou por suprimir e rearranjar esses HRU's muito pequeno com a função do QSWAT específica para esse processo.

A terceira etapa, inicia pelo gerador de dados climáticos, onde são inseridos os dados meteorológicos pré-processados para geração de estatísticas. Assim, os dados foram inseridos em dois CSV's, um com os dados básicos da estação e outro com os dados estatísticos mensais.

Em seguida, na aba dos dados observados da estação, foram inseridos os dados meteorológicos propriamente ditos de cada variável climática em série diária e em arquivos texto. Ao todo foi inserido um histórico de 46 anos de dados meteorológicos.

Por fim, após as inserções básicas de dados, o modelo foi simulado com um período de aquecimento de 5 anos (1975 -1979) e com intervalo de simulação de 1975 até 2050, totalizando 61 anos de execução do modelo. Os dados tabulares possuem série histórica até o ano de 2020. No entanto, o modelo, por meio do programa *SWAT+ Editor*, realiza simulação hidrológica por método estocástico para períodos com

ausência de dados, permitindo obter valores de anos futuros conforme os dados históricos anteriores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de modelagem com o SWAT+, são produzidos diversos resultados que replicam o comportamento das variáveis hidrossedimentológicas ao longo do tempo. Esses resultados englobam dados como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, fluxo de base, ascensão capilar, percolação para o aquífero raso, recarga para o aquífero profundo, informações relacionadas ao uso do solo, práticas de manejo, pesticidas, nutrientes, sedimentos, e outros aspectos relevantes.

Os resultados das simulações realizadas no SWAT proporcionam dados que descrevem as características dos fluxos de água (vazões) nas bacias hidrográficas. Esses resultados podem ser obtidos em intervalos diários, mensais ou anuais.

Portanto, a visualização dos resultados no QSWAT+ pode ser feita através de gráficos, plotagens, comparações dos cenários, animações e processos estatísticos, por meio dos HRU's, canais, *landuses* e aquíferos.

5.1 Caracterização da Área de Estudo

Após a elaboração dos dados de entrada e inicialização do modelo, foi possível analisar os resultados obtidos pelo SWAT+. Como descrito anteriormente, o modelo realiza, por meio do MDE, uma nova delimitação da área de drenagem da bacia. De acordo com Serrão (2018), essa nova delimitação, apesar de possuir ressalvas, é eficaz para a compreensão dos processos hidrológicos. O autor afirma que os parâmetros hidrológicos extraídos de MDEs demonstram acurácia e compatibilidade com técnicas de obtenção manual, além de boa correlação entre declividade e área de contribuição, o que gera uma rede de drenagem de elevada confiança.

Diante disso, o modelo calculou uma área de drenagem de 148,81 km² para a bacia do rio Pratagy. Esse fluxo de drenagem criado se assemelha aos mapas do Relatório Síntese dos Estudos do PERH/AL (2010) e é satisfatório, pois representa de forma adequada a rede de drenagem da área de estudo, englobando toda a extensão e respeitando a declividade do terreno (figura 12). Outrossim, ao longo da simulação,

o QSWAT+ gerou os seguintes objetos espaciais e seus quantitativos durante a discretização dos elementos da BHP:

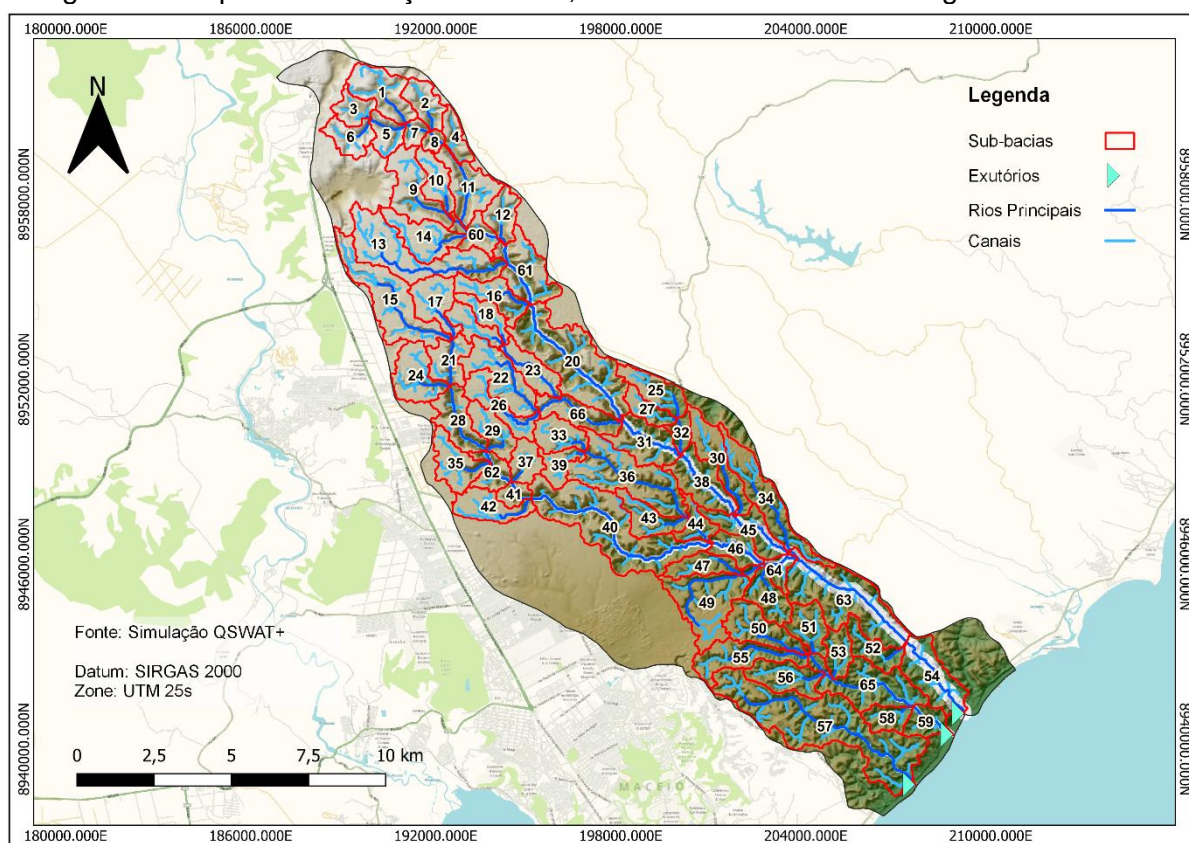
Quadro 6: Quantitativo de objetos espaciais gerados pelo modelo

Objetos Espaciais	Quantitativo
Sub-bacias	66
Canais	772
Aquíferos	135
Fonte Pontual	772

Fonte: Autora (2023)

A disposição das sub-bacias, canais, rios principais e exutórios obtidos durante a caracterização da área de estudo podem ser observados na figura 13.

Figura 13: Mapa de delimitação da bacia, sub-bacias e rede de drenagem no QSWAT+



Fonte: Autora 2023

O QSWAT+ fornece relatórios com informações estatísticas gerais e por sub-bacias de relevo, declividade, uso e ocupação do solo, tipos de solo e HRU's. Acerca do relevo do MDE, foram geradas estatísticas de elevação, em metros: mínima 0; máxima 160; média 84,41 e o desvio padrão de 39,37. As informações geradas para os demais dados podem ser observadas na tabela 2:

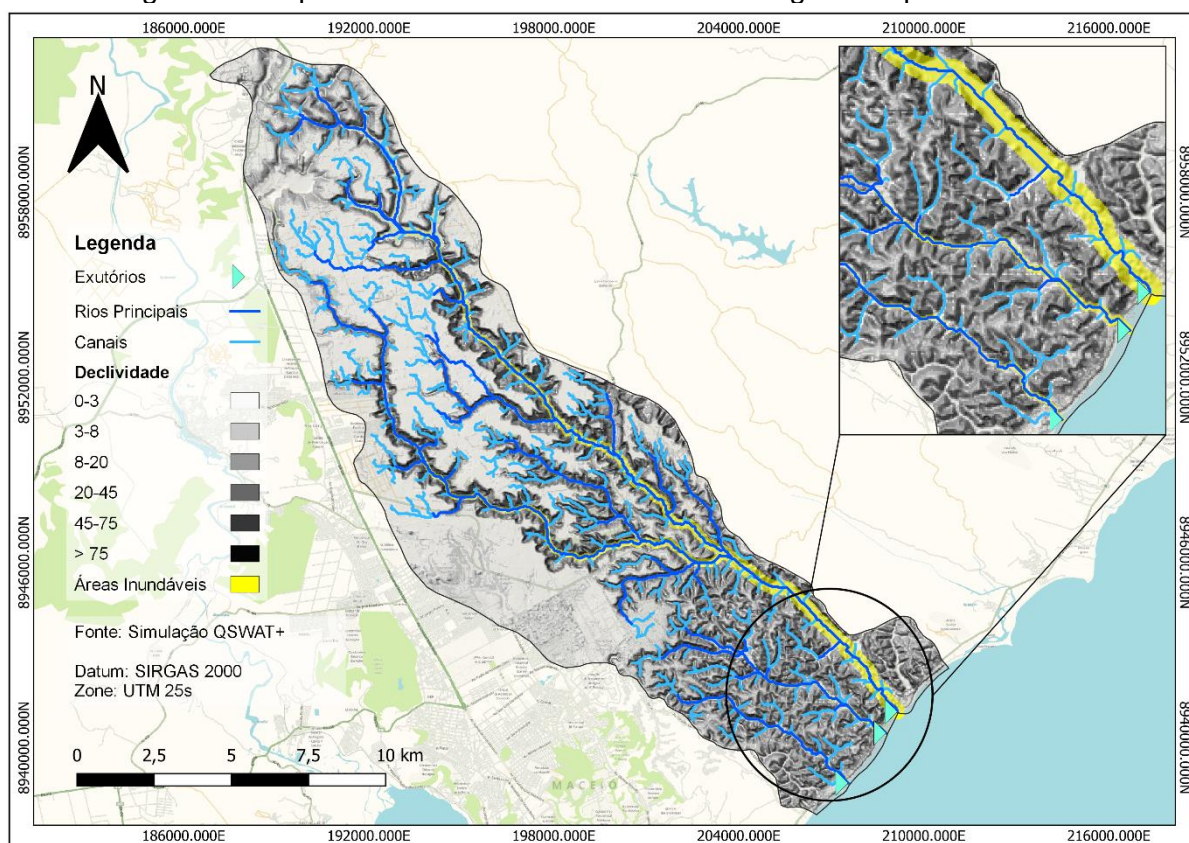
Tabela 2: Resultados dos relatórios exportados do QSWAT+

Informações	Tipos	Área (Km²)	%
Áreas Inundáveis	Vázea	19,84	13,33
	Encosta	128,97	86,67
Uso e Ocupação do Solo (<i>landuse</i>)	CRGR	29,44	19,79
	SUGC	48,73	32,75
	FRSD_SUHF	44,23	29,72
	PAST	15,72	10,56
	SAVA	0,72	0,00
	AGRL	5,85	0,04
	WETW	226,33	1,52
	URHD	777,71	5,23
	WETF	20,14	0,14
	URML	33,82	0,23
Tipos de Solo	SOCT	2,88	0,02
	LA	104,64	70,32
	GX	43,75	29,40
Declividade	RQ	41,02	0,28
	0 - 3	59,24	39,81
	3 - 8	16,13	10,84
	8 - 20	22,87	15,37
	20 - 45	38,75	26,04
	45 - 75	11,53	7,75
>75	27,64	0,19	

Fonte: Autora (2023)

As áreas inundáveis podem ser visualizadas na figura 14, onde em regiões de maior declividade, as margens de inundação, a partir da delimitação da drenagem, são mais largas. Logo, é possível verificar que isso ocorre próximo ao rio principal de maior confluência e próximo aos exutórios, de modo que são nessas regiões que as áreas de encosta são mais acentuadas e a declividade considerada pelas classes do Embrapa 2018 como forte-ondulada. Essas áreas de inundação são divididas ainda pelo modelo em vázea e encosta ascendente, sendo de maior porcentagem as encostas.

Figura 14: Mapa de áreas inundáveis e declividade geradas pelo QSWAT+

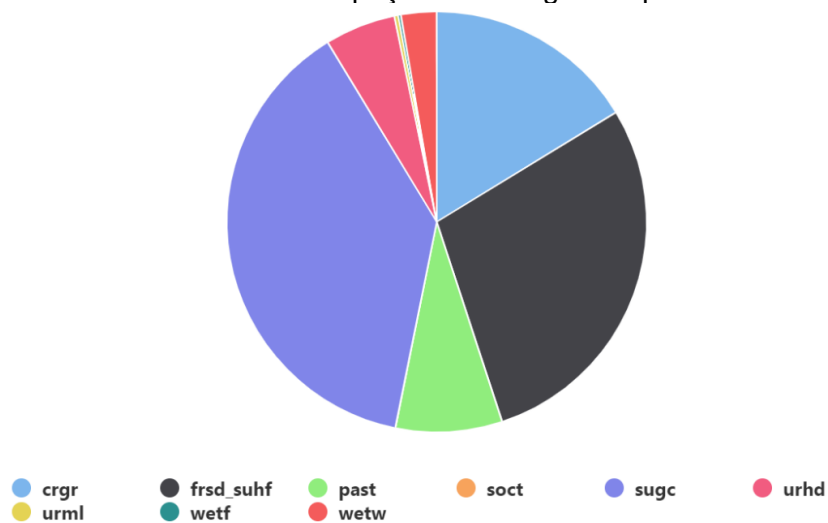


Fonte: Autora (2023)

O território, conforme gerado pelo QSWAT+, é 40% plano e 26% forte-ondulado e, no que concerne aos tipos de solos, o programa desconsiderou os de menor área e apenas foram incluídos na simulação as classes de Latossolos Amarelos, Gleissolos Háplicos e Neossolos Quartzarênicos.

Em relação ao uso e ocupação do solo, as regiões de cana de açúcar e formação florestal consistem em 32,75% e 29,72% (figura 15), respectivamente, de acordo com SWAT+, sendo desprezada a menor área, a de outras lavouras temporárias. Portanto, é observado que a bacia é bastante heterogênea com numerosos tipos de uso e ocupação do solo.

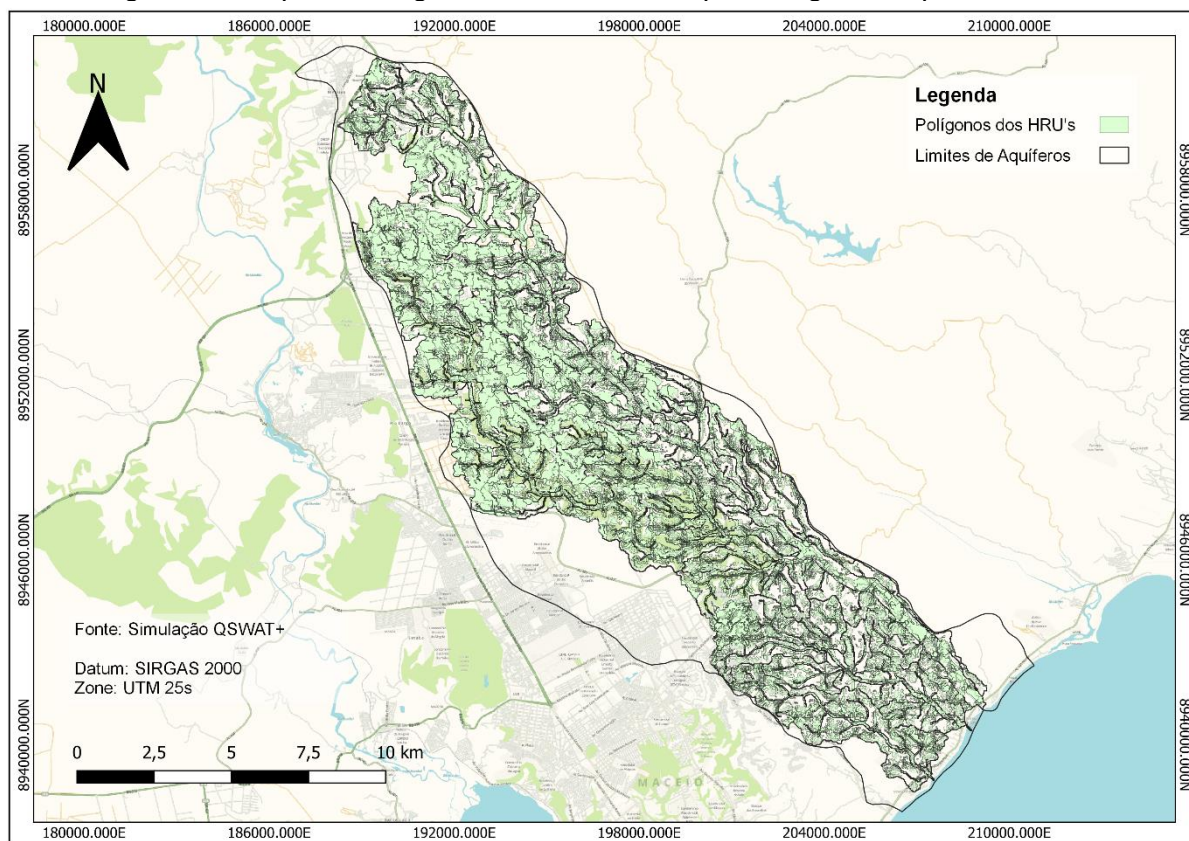
Figura 15: Gráfico do uso e ocupação do solo gerado pelo SWAT+ *Editor*



Fonte: SWAT+ *Editor* (2023)

A discretização, na segunda etapa do QSWAT+, gerou 3.212 Unidades de Resposta Hidrológica e 135 aquíferos, ao passo em que a figura 16 representa os polígonos de ambos os objetos espaciais e apresenta suas disposições no mapa. Com isso, pode-se verificar as áreas suprimidas da simulação na criação das HRU's.

Figura 16: Mapa de Polígonos dos HRU's e Aquíferos gerados pelo QSWAT+



Fonte: Autora (2023)

5.2 Hidrologia Modelada pelo SWAT+

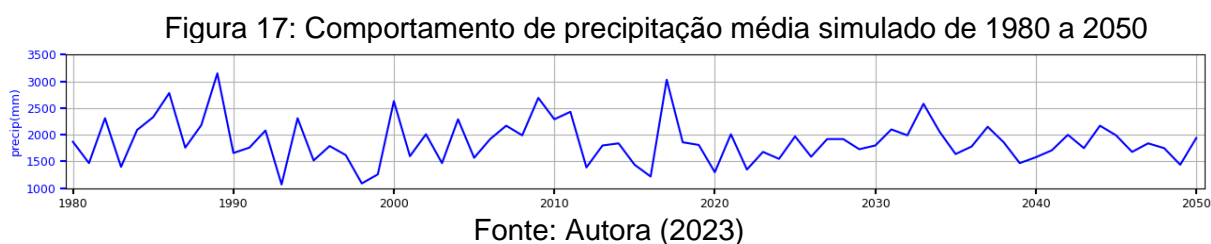
A visualização dos resultados nesse item foi focada na plotagem e comparação das informações geradas pelo modelo SWAT+, onde uma das principais saídas (*outputs*) do modelo é o balanço hídrico. Para fins de compreensão, buscou-se interpretar os resultados tendo como fundamento os enunciados de Collischonn e Dornelles (2015), ao qual simplificam o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, em intervalos de tempos longos, como sendo a soma entre escoamento e evapotranspiração (saídas) subtraídos da precipitação (entrada), todos em mm.ano^{-1} . Por conseguinte, a tabela 3 ilustra os resultados anuais, para um período de visualização dos dados de 2010 a 2030, da simulação dos processos hidrológicos da BHP, obtidos através da modelagem. Observou-se prioritariamente os dados de precipitação, escoamento superficial, fluxo lateral, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real e percolação.

Tabela 3: Resultados dos processos hidrossedimentológicos simulados pelo QSWAT+

Anos	Precipitação (precip)	Fluxo lateral (latq)	Percolação (perc)	Evapotranspiração Real (et)	Evapotranspiração Potencial (pet)	Escoamento superficial (surq_runon)
2010	2292.6	3.4	185.2	1195.6	1597.3	61.6
2011	2426.2	3.5	177.0	1130.6	1566.4	72.9
2012	1386.2	2.3	170.8	968.3	1608.7	16.6
2013	1797.4	3.0	158.0	974.3	1571.1	36.4
2014	1837.7	3.5	184.6	1123.7	1635.6	34.3
2015	1436.6	2.2	147.6	877.3	1605.0	30.5
2016	1220.2	1.4	128.1	1059.6	1600.5	3.9
2017	3034.1	3.1	153.9	996.5	1564.5	134.1
2018	1856.5	3.2	180.0	1130.6	1586.0	33.3
2019	1805.2	2.6	164.2	1133.4	1639.1	33.1
2020	1296.9	1.9	142.7	980.6	2339.6	10.6
2021	2010.7	2.7	145.1	1211.5	1997.2	40.0
2022	1352.9	1.9	146.1	1127.5	1977.4	7.8
2023	1677.6	2.2	145.2	1138.9	2020.2	23.5
2024	1546.3	1.9	146.3	1117.3	2153.2	18.4
2025	1969.6	2.8	160.0	1291.7	1934.4	33.8
2026	1588.0	2.3	145.6	1144.1	2005.6	20.0
2027	1923.9	2.7	163.4	1210.7	2042.2	35.6
2028	1916.3	2.7	153.3	1143.5	1917.5	41.7
2029	1729.3	3.1	167.5	1117.4	2086.5	26.8
2030	1801.6	2.2	159.7	1233.4	1899.2	25.6

Fonte: Autora (2023)

Por meio da tabela 3, é possível prever quantitativos de precipitação média anual, onde um exemplo foi o ano de 2024 que teve uma estimativa de precipitação média de 1.546,34 mm. Com auxílio da plotagem em gráfico (figura 17) de todos os dados históricos e estimados da precipitação, é possível realizar análises dos demais dados ao longo de todo o período simulado (1980 a 2050).

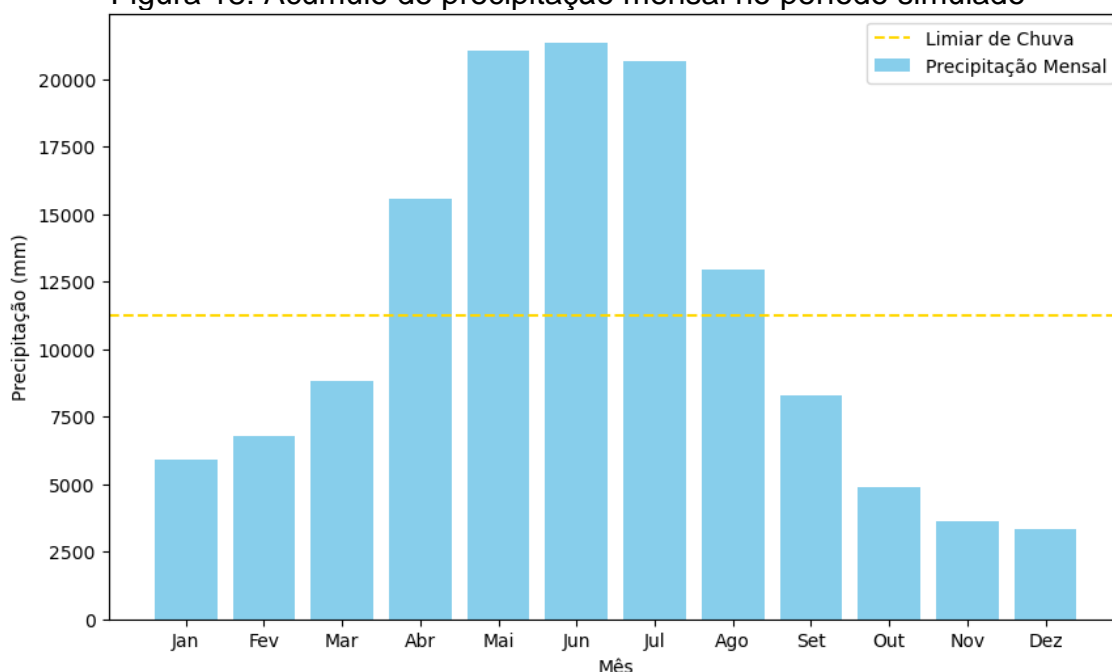


No período analisado, ocorreram precipitações anuais médias mínimas de 1.065,98 mm e máximas de 3.147,40 mm nos anos de 1993 e 1989, respectivamente. A precipitação média anual em 2024 está prevista 17,6% abaixo da média 1.876,55 mm, enquanto que no ano de 2050 a precipitação estimada é de 1.939,42 mm, valor 3,35% acima da média. Com isso, pode-se observar que o modelo demonstrou uma ausência de precipitações exorbitantes nos próximos anos, ou seja, que ultrapassem o valor máximo do ano de 1989. No entanto, há precipitações acentuadas de 2.580,83 mm em 2033, aproximadamente 37,53% acima da média geral.

De acordo com Silva (2022), a distribuição de chuva no estado de Alagoas é disposta em períodos de: estação seca (outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro); estação chuvosa (abril, maio, junho e julho) e estação de transição (março, agosto e setembro). A região leste do estado, onde está localizada a área de estudo da BHP, possui índices chuvosos elevados, se comparado a outras áreas do estado, mesmo em estações de seca.

Dessa forma, a figura 18 apresenta esse fenômeno por meio do acúmulo mensal de precipitação ao longo do período simulado pelo SWAT+, no qual é possível observar que no decorrer da simulação o modelo seguiu o regime pluviométrico da área de estudo, não ocorrendo discrepâncias nos meses chuvosas.

Figura 18: Acúmulo de precipitação mensal no período simulado



Fonte: Autora (2023)

Um outro parâmetro gerado nos resultados do SWAT+ é o número de deflúvio (do inglês, *curve-number* - CN) que depende da classificação hidrológica do solo, das condições antecedentes de escoamento e da cobertura e manejo do solo. O número de curva é um valor empírico que ilustra o percentual do solo impermeável, no qual seu valor varia de 0 a 100, com 0 representando total permeabilidade da água pluvial no solo, e 100 representando total impermeabilidade do solo (SARTORI, 2010).

A correlação obtida entre a precipitação e o CN (figura 19) é satisfatória, baseada no Coeficiente de Correlação de Pearson = 0,84, sendo ainda notório que ao decorrer dos anos de simulação o comportamento do CN será similar ao de chuva, indicando que a umidade no solo oscila com os índices de precipitação, o que pode indicar que em períodos de seca, como em 1955-1956, 1997-1998 e 2012 a 2017, ocorridos em todo o Nordeste, segundo INMET (2018), fluxos subterrâneos podem diminuir.

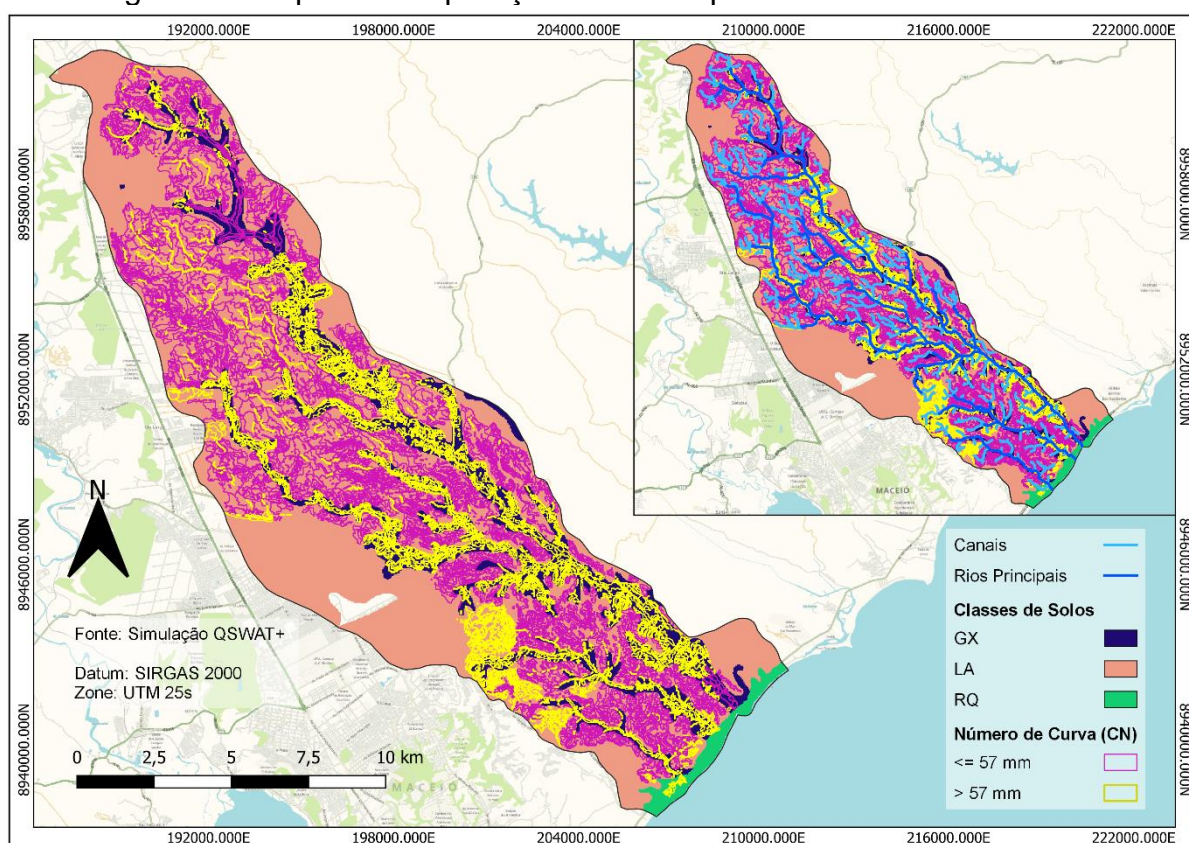
Figura 19: Correlação entre precipitação e CN



Fonte: Autora (2023)

Portanto, o valor CN médio obtido foi de aproximadamente 57,04 mm. Com esse valor, não há como concluir se os solos da região são mais propícios ou não à permeabilidade. Isto posto, usou-se da plotagem em mapa dos resultados do CN em comparação aos dados de solo e rede de drenagem, como mostrado na figura 20.

Figura 20: Mapa de comparação entre os tipos de solo e valores do CN



Fonte: Autora (2023)

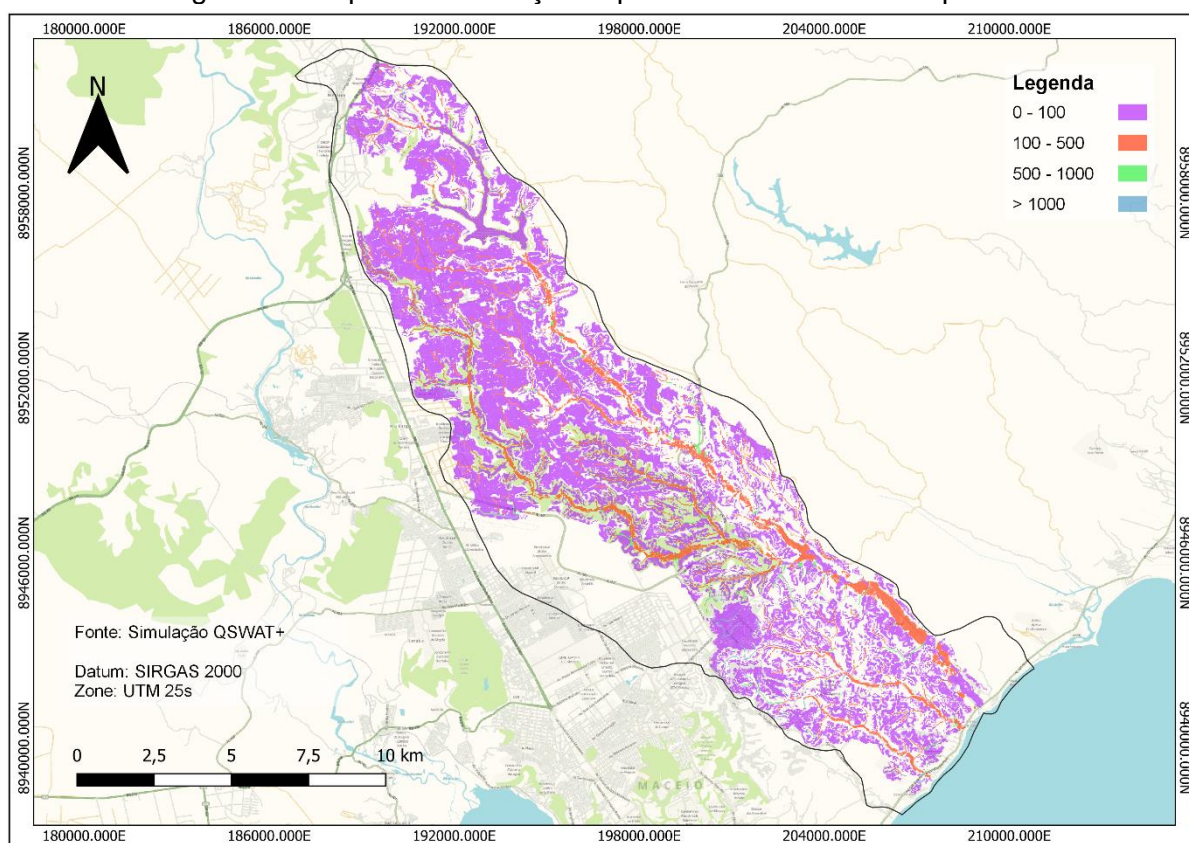
À classe de solo GX (Gleissolos Háplicos) foi atribuído grupo hidrológico D, ao qual a esse grupo corresponde solos com alto potencial de escoamento e taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, com predominância de solos atuando como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. O solo LX (Latosolos Amarelos) foi definido o grupo hidrológico A, que são solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados (SANTORI; NETO E GENOVEZ, 2005).

Com base nessas afirmações, é possível verificar na figura 20 que grande parte dos valores CN maior que a média estão localizados em regiões inerentes ou próximas da classe de solo GX, bem como em locais com maior confluência dos canais de drenagem. Logo, pode-se confirmar que nessas áreas há um bom escoamento superficial.

Em relação a isso, consoante os autores Mathias, Lupinacci e Nunes (2022), o escoamento superficial trata-se de um “agente hidrológico de grande repercussão”, em que uma parcela do fluxo infiltra no solo, constituindo o escoamento subsuperficial, também denominado de fluxo lateral, à medida que o solo satura, o fluxo passa a escoar preponderantemente na superfície. Para os autores Rennó e Borma (2017), é o conjunto desses dois fenômenos que formam o volume de água que os hidrólogos geralmente chamam de *runoff*.

A partir da análise combinada entre a figura 21 e a tabela 3, elucida-se que o escoamento superficial ocorre predominantemente em torno da média de 38,77 mm e nos domínios do solo GX acima da média, com maior escoamento superficial; já nas áreas de LA o escoamento é baixo e está de acordo, também, com a disposição do número de curva.

Figura 21: Mapa de distribuição espacial do escoamento superficial



Fonte: Autora (2023)

Nesse contexto, o regime do escoamento superficial ao longo do período da simulação ocorre de acordo com a figura 22, com máxima de 134,1 mm no ano de 2017 e mínima anual de 3,9 mm em 2016.

Figura 22: Comportamento do escoamento superficial médio simulado de 1980 a 2050

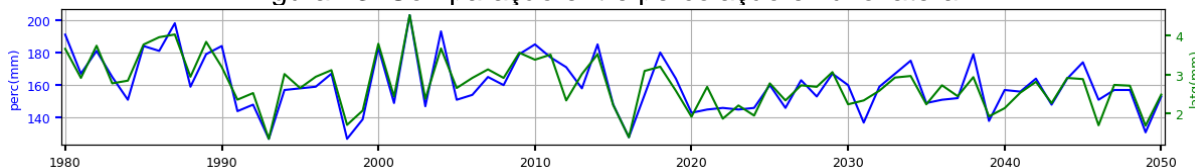


Fonte: Autora (2023)

Por um outro viés de análise, é possível constatar pelas médias percentuais o quanto de volume precipitado é convertido em escoamento, de modo que o fluxo lateral (escoamento subsuperficial) correspondeu a 0,15% da precipitação total anual e o escoamento superficial a 2,06%. Em contrapartida, a evapotranspiração real tem percentil de 96,6% da precipitação total, e o valor de 1,7% restante pode ser correspondente a um volume de água infiltrado e retido pelo solo ou escoamento de base. Por fim, foi possível observar ainda que o modelo demonstra que essa região possui pouca conservação e retenção de águas subterrâneas.

A percolação e o fluxo lateral também convergem em grandeza ao longo dos anos, ou seja, em períodos de baixa movimentação de água no solo, ambos decrescem. A figura 23 traz essa comparação com um Coeficiente de Correlação de Pearson = 0,90.

Figura 23: Comparação entre percolação e fluxo lateral



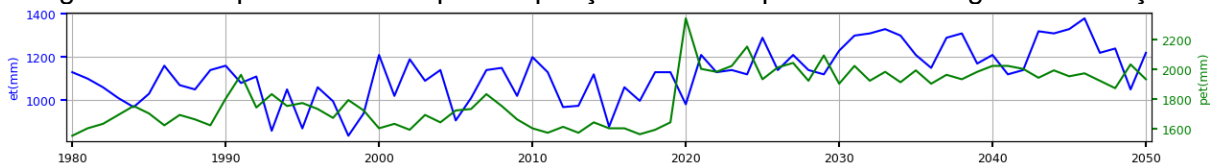
Fonte: Autora (2023)

No que tange a evapotranspiração, segundo Collischonn e Dornelles (2015), esse fenômeno é o retorno da água precipitada à atmosfera em forma de evaporação e transpiração. Seus fatores são influenciados pela radiação solar, temperatura, umidade de ar e velocidade do vento, além de depender do uso e ocupação do solo e da umidade presente no solo. Por isso, a evapotranspiração pode ser estimada em evapotranspiração real e em potencial, no qual a real é sempre igual ou inferior à potencial. A estimativa de evapotranspiração potencial demonstra a máxima perda de água possível em uma região vegetada.

Portanto, na figura 24, observa-se que a evapotranspiração potencial é maior do que a real, corroborando com as afirmações de Collischonn e Dornelles (2015). É possível notar ainda que em 2020, ano a partir do qual não há mais monitoramento

de dados da estação do INMET, as evapotranspirações aumentam, indicando uma necessidade de realizar calibração do modelo.

Figura 24: Comparativo da evapotranspiração real e da potencial ao longo da simulação



Fonte: Autora (2023)

Embora não tenha sido executada a análise de sensibilidade, a calibração e a validação do modelo para refinamento de valores simulados junto a valores reais, os resultados são satisfatórios em relação ao que o estudo se propõe a analisar e refletem hidrológicamente a BHP de acordo com suas características.

6 CONCLUSÃO

A modelagem hidrológica como suporte a gestão de recursos hídricos resulta em uma das principais e mais modernas ferramentas de análises (CALDEIRA et al., 2018). No entanto, apesar do aumento de aplicações na simulação do modelo SWAT em bacias hidrográficas brasileiras, ainda é um impasse executar o modelo como ferramenta de apoio à decisão por instituições governamentais ambientais e hidrológicas e comitês de bacias hidrográficas. Além disso, uma parcela considerável de trabalhos não realiza processos de calibração e, principalmente, validação do modelo (BRESSIANI et al., 2015).

Como já descrito, a modelagem com o uso do SWAT+ é robusta e complexa e exige uma série de dados elevada para a realidade do monitoramento e estudos de campo das bacias hidrográficas brasileiras. A utilização de dados de referência ou dos bancos de dados do SWAT são alternativas para a aplicação do modelo, em detrimento podem gerar resultados incertos para a área de estudo.

Salienta-se que resultados incertos advindos da modelagem do SWAT estão ligados à: simplificação dos conceitos; processos que ocorrem na bacia e não são incluídos no programa; processos que estão inclusos no programa, mas sua ocorrência na bacia é desconhecida pelo modelador ou não quantificada em função da limitação de dados e qualidade dos dados de entrada. Essa questão pode ser diminuída com o desenvolvimento da calibração do modelo, buscando refinar valores, por meio de parâmetros tidos como sensíveis à simulação (ABBASPOUR et al., 2015).

Os autores Silva Junior et al. (2005) afirmam que, embora o rio Pratagy e sua bacia hidrográfica tenham grande importância para os municípios contidos na área de estudo, principalmente o município de Maceió que utiliza das águas do Pratagy para aumentar a oferta de água para sua população, existem pouquíssimos dados a respeito do rio e de sua bacia hidrográfica.

Logo, nesse trabalho, por mais que a simulação no SWAT+ da BHP tenha cumprido com os objetivos propostos, vale ressaltar que não houve acesso à vazão do rio no ponto de captação para abastecimento público, isto é, há demanda a mais de água do rio principal que o modelo não considerou. Para fins de balanço hídrico e, conseqüente, gestão hídrica da bacia, o cenário avaliado subestima as saídas do período em avaliação.

Nesse interim, em relação às pressões na BHP, o Relatório Síntese - PERHAL (2010) afirma, embasado no balanço hídrico para o cenário tendencial de curto (2015), médio (2020) e longo (2030), pressões acima de 100% ao utilizar a disponibilidade hídrica da época em comparação à demanda nos diferentes horizontes de projeto. Para o ano de 2030, o relatório calculou pelo balanço uma demanda hídrica de 9,54 m³/s, em contrapartida a disponibilidade de 4,91 m³/s, derivando uma pressão de 194%.

Esses dados reafirmam a importância da gestão hídrica da bacia do rio Pratygy e a necessidade de integrá-los a modelos hidrológicos para uma visão geral do balanço da bacia, pois em vista dos valores de precipitação estimados pelo modelo serem análogos aos simulados, onde não houve aumento considerável de chuva anual ou alteração nas estações chuvosas, há possibilidade de déficit na disponibilidade hídrica do rio principal.

Os resultados da evapotranspiração e do escoamento superficial corroboram para, caso não sejam tomadas medidas de gestão, o cenário tende à redução da disponibilidade de água. Outros fenômenos que poderiam ser avaliados não foram extraídos devido a não realização da calibração do modelo, uma vez que houve problemas com versões dos softwares e falta de dados observados.

À vista disso, a fim de validar o modelo e de obter resultados consistentes com os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas e do uso e ocupação do solo na BHP, é necessário calibrar o modelo com série de dados reais e criar cenários para avaliar transformações de variáveis importantes, como alterações da precipitação. Tais aplicações podem possibilitar novas perspectivas acerca da BHP, de modo a encaminhar estudos futuros utilizando o SWAT.

Conclui-se que iniciação de pesquisas como essa têm destacado cada vez mais a importância dos dados experimentais em campo no Brasil para uma representação adequada dos processos através da modelagem hidrológica, além de poder ser uma contribuição para a metodologia do modelo em regiões brasileiras com escassez de dados e para a popularização de modelos hidrológicos complexos, como o SWAT.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional Dos Recursos Hídricos. Brasília, DF:1997.

ADRIOLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C. & CAMARGO, A.S.G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., Belo Horizonte, 2008. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: [http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_\(2008\)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf](http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_(2008)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf). Acesso em: 05 mai. 2023.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Relatório Síntese dos Estudos do PERH/AL**. 2010. Disponível em: <http://www.semarh.al.gov.br/Perh/PERH%20-%20Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20dos%20Estudos%202010.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2023.

ALVARES, C. A. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/00000022/00000006/art00008?token=004f1a11bab2a729bc7e41225f40382d2c2b4652767446624550576b34272c5f7b3d6d3f4e4b34a>. Acesso em: 28 mar. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas., 2019. **Manual de usos consuntivos da água**. ANA, Brasília. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/snirh/snirh-1/acessotematico/usos-da-agua>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Acesso em: 05 mai. 2023.

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; NICKS, A.D.; SAMMONS, N.B. 1990. **SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management**. Texas A&M University Press, Gaveta C, College Station, TX 77843. 1990. 252 p. Disponível em: <http://twri.tamu.edu/reports/2011/tr406.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BARBAROTTO JUNIOR, J. L. **Análise da disponibilidade hídrica da bacia do Rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis**. Campinas, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=465805>. Acesso em: 05 mai. 2023.

BIEGER, K.; ARNOLD, J.G.; RATHJENS, H.; WHITE, M.J.; BOSCH, D.D.; ALLEN, P.M. Representing the Connectivity of Upland Areas to Floodplains and Streams in SWAT+. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 55, p. 578-590, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330852733_Representing_the_Connectivity

_of_Upland_Areas_to_Floodplains_and_Streams_in_SWAT. Acesso em: 05 abr. 2023.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, 2015. Disponível em: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/download/1765/pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BRITO, H. C.; BRITO, Y. M. A.; ASSIS, W. D.; FERREIRA, Y. B. C.; RUFINO, I. A. A. Avaliação da Dinâmica Intranual da Caatinga a Partir de Classificações de Uso e Ocupação do Solo. In: I Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade e III Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, 2019, Campina Grande. **Anais do I CONIMAS e III CONIDIS**. Campina Grande: Realize, 2019. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/63251>. Acesso em: 29 mar. 2023.

BRUNI, J. C. A água e a vida. **Tempo Social**, v. 5, n. 1/2, p. 53-65, 1993. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/ts/article/view/84942>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CARVALHO, A. T. F. Bacia Hidrográfica como Unidade de Planejamento: Discussão Sobre os Impactos da Produção Social na Gestão de Recursos Hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 42, p. 140–161, 2020. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/6953>. Acesso em: 1 ago. 2023.

CECÍLIO, R. A.; COUTINHO, L. M.; XAVIER, A. C.; MOREIRA, M. C.; ZANETTI, S. S.; GARCIA, G. de O. Delimitação de bacia hidrográfica em região montanhosa a partir de diferentes modelos digitais de elevação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2007–2024, 2013. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/10861>. Acesso em: 10 abr. 2023.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

CORREA, N. F.; RIBEIRO, V. O.; MIOTO, C. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 1, p. 217-225, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/viewFile/18261/10942>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CREMON, Édipo H.; BETTIOL, G. M.; JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. de O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/60846>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos: proposta de ordem (1ª Aproximação)**. EMBRAPA Florestas, Colombo, 2004. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/311308/antropossolos-proposta-de-ordem-1-aproximacao>. Acesso em: 29 mar. 2023.

DE SOUZA, F. P.; PERTEL, M. Complexidades para a Aplicação dos Aspectos Normativos para a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil. **Exatas & Engenharias**, v. 10, n. 27, p. 70-82, 2020. Disponível em: https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/1747. Acesso em: 1 mai. 2023.

DEVRIES, J. J.; HROMADKA, T. V. **Computer Models for Surface Water**. Handbook of Hydrology, D. R. Maidment, McGraw Hill, 1992. Disponível em: https://dl.watereng.ir/HANDBOOK_OF_HYDROLOGY.PDF. Acesso em: 1 mai. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2021. 353 p.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography**. Sinergise. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 25 abr. 2023.

FARIAS, E.S.F.; SILVA, J.B.L.; PIRES, L.C.; BRITO, J.M.S.; QUINELATO, R.V. Influência do Uso e Ocupação do Solo na Disponibilidade Hídrica das Bacias dos Rios Peruíbe, Itanhém e Jucuruçu, Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 02, p. 1175-1193, 2021. Disponível em: <https://revistasdemo.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/248958>>. Acesso em: 05 mai. 2023.

GOUVEIA, R.G.L.; SILVA, J.D.F.; NASCIMENTO, R.E.N.; ARANHA, A. P. O. Uso de Geoprocessamento para Identificação da Declividade do Terreno em Bacias Hidrográficas. In: 16º CONGRESSO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, São Paulo, 2019. **Anais [...]**. São Paulo: UNESP, 2019. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/211206961.pdf>. Acesso em: 28 mar. de 2023.

GUERRA, A. J. T., & CUNHA, S. B. **Geologia e Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil., 2001.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 2008.**

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. ESALQ-USP. Piracicaba, p. 241, 1986.

MACHADO, R. E. **Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em Uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento**. São Paulo, 2002. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-10072002-161200/pt-br.php>. Acesso em: 12 mar. 2023.

MACIEL, S. A. **Clima, disponibilidade hídrica e pobreza na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha**. Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32519>. Acesso em: 28 mar.2023.

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 2, p. 137-151, 2009. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44844/23855>. Acesso em: 10 abr. 2023.

MONTEIRO, E. dos S. V. **Extração de Informação Altimétrica a Partir de Modelos Digitais de Elevação Globais Utilizados na Caracterização de Bacias Hidrográficas**. Rio Grande do Sul, v. 20, n. 1, p. 39-43, 2021. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/230906/001132775.pdf?sequence=1#page=39>. Acesso em: 11 mai. 2023.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool *Theoretical documentation version***. Texas, 2009. Disponível em: <http://twri.tamu.edu/reports/2011/tr406.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

OLIVEIRA, T. H.; NASCIMENTO, F. R. A.; MOREIRA, I. T. A. Modelagem de Bacia Hidrográfica como Ferramenta para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos. *In: IV Seminário Nacional Profágua. Anais [...]*. Brasília, 2022. Disponível em: <https://Www.Feis.Unesp.Br/Home/Pos-Graduacao/Profagua/Anais-Iv-Seminario-Profagua.Pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: O Valor da Água; fatos e dados**. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 10 mar. 2023.

PEDROSA, V. A. Consideração Sobre a Outorga na Bacia do Rio Pratygy. *In: II Encuentro de las Aguas*, 1999. **Anais [...]**. Montevideo, 1999. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/professor/vap/OutorgaPratygy.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2023.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. **Gestão de bacias hidrográficas**. São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/ccyh4cf7NMdbpJdhSzCRNtR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 mar. 2023.

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A.; SOUZA, FERREIRA. W.; SOUZA, C. A. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 15 n. 1, p. 200-243, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbge/article/view/251766>. Acesso em: 30 mar. 2023.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 05 mai. 2023.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. C.; SILVA, R. M. Caracterização Hidrodinâmica dos Solos da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra Utilizando o Método Beerkan. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 141-152, 2012. Disponível em:

<https://biblat.unam.mx/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursoshidricos/2012/vol17/n04/12.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SARTORI, A. **Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN.**

Campinas, 2010. Disponível em:

<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/772650>. Acesso: 05 set. 2023.

SARTORI, A; LOMBARDI NETO F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte I. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005. Disponível em:

<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=440>. Acesso: 05 set. 2023.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>>. Acesso: 05 abr 2023.

SERRÃO, E. A. DE O. **Aplicação do Modelo SWAT na Simulação Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas-PA.** Campina Grande, 2018. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/1756/EDIVALDO%20AFONSO%20DE%20OLIVEIRA%20SERR%c3%83O%20%e2%80%93%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20%28PPGMet%29%202018.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso: 05 set. 2023.

SILVA, I. J. de L. **Períodos Úmidos e Secos no Estado de Alagoas Via Índice de Seca.** Maceió, 2022. Disponível em:

<http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/9210>. Acesso: 05 set. 2023.

SILVA, M. B.; HERREROS, M. M. A. G.; BORGES, F. Q. Gestão Integrada dos Recursos Hídricos como Política de Gerenciamento das Águas no Brasil. **Revista de Administração da UFSM**, v. 10, n. 1, p. 101-115, 2017. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/2734/273450498007.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2023.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, C; FIORI, A. P.; ZAI, C. Mapeamento de declividade de vertentes: aplicação na APA de Guaratuba / Paraná. *In*: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia / Regional Conference on Geomorphology. **Anais**. Goiânia. 2006.

Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/10/432.pd>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SOUZA, A. M. B.; CRUZ, M. A. S.; ARAGÃO, R. **Análise Comparativa do Uso de Modelos Digitais de Elevação para a Caracterização Física da Bacia do Rio Japarutuba.** Maceió, 2011. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/81/24066eea1b074e703d6d6a88dd28697d_6fe70c4a6850d5b2696f598d8a91bcee.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

TUCCI, C. E. M. 2005. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 2001. 675 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed.: 2.reimpr. - Porto Alegre: Ed. Unversidade/UFRGS: ABRH, 2001. 930 p.

Tucci, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre - Brasil, 1998. 669 p.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência Cult.**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-33. São Paulo, 2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400018&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 mar. 2023.

TUNDISI, J. G. Governança da água. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 222–235, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistadaufmg/article/view/2698>. Acesso em: 2 ago. 2023.

WU, J.; YEN, H.; ARNOLD, J. G.; YE YANG, X.; CAI, M.J.; WHITE, S.; CHINNASAMY, C.; MIAO, R. Development of Reservoir Operation Functions in SWAT+ for National Avaliação ambiental. **Journal of Hydrology**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124556>. Acesso: 05 abr. 2023.

XAVIER, A.; BENTES, N. M. S. Limites, Desafios e Oportunidades de Participação na Gestão de Recursos Hídricos: Uma Análise do Marco Jurídico Internacional e Uma Revisão Integrativa da Literatura Sobre Participação nos Comitês de Bacias Hidrográficas Brasileiros. **Direito Público**, v. 17, n. 95, 2020. Disponível em: <https://www.portaldeperiodicos.idp.edu.br/direitopublico/article/view/4856>. Acesso em: 25 jun. 2023.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, v. 27, n. 2, p. 5-18, Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rap/article/view/8663>. Acesso em: 10 mar. 2023.

YOGI, F.; STANGANINI, F. N. Comparison and Evaluation of Digital Elevation Models of SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM and ALOS PALSAR sensors for digital land analysis for applications in basic sanitation. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. 138, 2023. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/39350>. Acesso em: 10 abr. 2023.