



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS AGROFLORESTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE

REBECCA CAMILLY GALVÃO DOS SANTOS

**Modelagem Hidrológica e Dinâmica do Uso da Terra na Bacia do
Rio Cachoeira-Bahia, Brasil**

Dissertação de Mestrado

Itabuna - BA
2022

REBECCA CAMILLY GALVÃO DOS SANTOS

**Modelagem Hidrológica e Dinâmica do Uso da Terra na Bacia
do Rio Cachoeira- Bahia, Brasil**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biosistemas (PPGBiosistemas), da Universidade Federal do Sul da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestra em Biosistemas.

Orientador: Gerson dos Santos Lisboa

Coorientador: Vinicius de Amorim Silva

Itabuna - BA


2022

REBECCA CAMILLY GALVÃO DOS SANTOS


**Modelagem Hidrológica e Dinâmica do Uso da Terra na Bacia do Rio
Cachoeira- Bahia, Brasil**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestra em Biosistemas,
Universidade Federal do Sul da Bahia.


Aprovada em 30 de setembro de 2022.

Documento assinado digitalmente
 GERSON DOS SANTOS LISBOA
Data: 07/12/2022 09:46:24-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>


Prof. Dr. Gerson dos Santos Lisboa
(Orientador e Presidente), UFG

Documento assinado digitalmente
 VINICIUS DE AMORIM SILVA
Data: 07/12/2022 15:45:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Vinicius de Amorim Silva
(Coorientador e membro interno), UFSB

Documento assinado digitalmente
 ROBSON DA SILVA MAGALHAES
Data: 08/12/2022 16:47:54-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Robson Magalhães da Silva
(Membro interno), UFSB

Documento assinado digitalmente
 EDVALDO OLIVEIRA
Data: 08/12/2022 14:27:34-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Edvaldo Oliveira
(Membro externo), UESB

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

S237m Santos, Rebecca Camilly Galvão dos, 1992-

Modelagem hidrológica e dinâmica do uso da terra na bacia do Rio Cachoeira-Bahia, Brasil / Rebecca Camilly Galvão dos Santos. – Itabuna: UFSB, 2022. - 69f. -

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Jorge Amado, Centro de Formação em Ciências Agroflorestais, Programa de Pós-Graduação em Biosistemas, 2022.
Orientador: Dr. Gerson dos Santos Lisboa.

1. Bacias hidrográficas – Cachoeira, Rio, Bacia (BA). 2. Hidrologia - Modelos. 3. Solo – Uso. 4. Sistemas de informação geográfica. I. Título. II. Lisboa, Gerson dos Santos.

CDD – 551.48

Elaborada por Raquel da Silva Santos – CRB-5ª Região/ 1922

Dedicatória

Dedico esta pesquisa primeiramente a Deus, pois Ele sempre surpreende com coisas boas em minha vida, o choro durou várias noites, mas a alegria chegou em um belo dia, gratidão Senhor! Dedico a minha família, em especial a minha mãe Claudia, meu pai Raimundo e a minha irmã Raianne, por todo apoio durante o período de estudo. Ao meu marido Júnior por sempre apoiar e incentivar minhas escolhas. Aos meus filhos Emmanuel e Joaquim, por ser meu combustível diário de motivação e determinação. Aos meus amigos Adeid, João, Ramon e Isadora, por estarem comigo nos momentos mais difíceis e por acreditarem no meu potencial, espero sempre poder brindar a vida com vocês, gratidão!

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Gerson dos Santos Lisboa e ao meu coorientador Vinícius de Amorim Silva por todos os ensinamentos e apoio durante a realização desta pesquisa. A FAPESB pelo incentivo à pesquisa. Aos meus colegas de curso Sival e Gabriel por todas as dúvidas compartilhadas e sanadas, e pela parceria para publicações. A todos que de alguma forma contribuíram para a realização da pesquisa.

Quando tentam me desanimar, mais forte fico.
Direi do Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio,
a minha fortaleza, e nele confiarei.

Salmos 91:2

Resumo

Entre os recursos naturais essenciais, a água apresenta destaque, pois sua manutenção em condições ideais é necessária a todo tipo de vida no planeta. No entanto, diversos fatores têm ocasionado impactos negativos na oferta dos recursos hídricos. Assim, para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos é fundamental conhecer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, seus regimes de variação de vazões e, principalmente, suas relações com os agentes econômicos e socioambientais presentes na área de contribuição da bacia. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a dinâmica do uso da terra e realizar a modelagem hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC), utilizando o modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT). O SWAT é um modelo hidrológico que permite representar distintos processos físicos em uma bacia hidrográfica, tais como a evapotranspiração, a infiltração, o escoamento de água, entre outros processos. Metodologia – Para análise do uso da terra para a série temporal escolhida neste estudo, foi utilizado o r.report do GRASS no QGIS, sendo inseridos os mapas dos anos 1985 e 2020. Para as etapas de execução dentro do SWAT, utilizou-se o software ArcGis e foram inseridos mapas de tipos de solos, modelo digital de elevação (MDE) e de uso e cobertura da terra do projeto Mapbiomas, utilizou-se também, séries de dados climáticos da área em estudo. Como resultado, modelo SWAT, tendo como base o MDE da área em estudo, processou satisfatoriamente a delimitação da área de drenagem da bacia. Com relação ao uso da terra na bacia, ressalta-se o aumento da área urbanizada, da área de mineração e outras áreas não vegetadas para o período de 1985-2020. O modelo subestimou eventos com vazões de pico, ainda assim, as vazões simuladas apresentaram relação satisfatória com as vazões observadas na bacia com um R^2 de 0,5725. De acordo com a literatura no intervalo de $0,50 < R^2 \leq 0,65$ a relação entre os dados medidos e simulados seria considerada satisfatória, no entanto, seria necessário o valor de PBIAS para avaliar se o desempenho do modelo está aceitável ou se a modelagem necessita de calibração. Assim, reconhece-se a importância das etapas de sensibilidade, validação e calibração do modelo SWAT, porém estas etapas não foram possíveis nessa pesquisa devido à dificuldade em encontrar dados pedológicos relativos aos solos da região, informações confiáveis e contínuas hidrometeorológicas, séries históricas de precipitação e vazão. Assim, estas etapas foram recomendadas para trabalhos futuros. Os resultados encontrados nesse estudo mostram que o modelo SWAT é uma ferramenta eficaz na simulação de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, e, conseqüentemente, para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chaves: Modelo Hidrológico; SWAT; Sistema de Informações Geográficas; Uso da Terra.

Abstract

Among the essential natural resources, water stands out, as its maintenance in ideal conditions is necessary for all types of life on the planet. However, several factors have negatively impacted the supply of water resources. Thus, for the proper management of water resources, it is essential to know the hydrological behavior of the watersheds, their flow variation regimes and, mainly, their relationships with the energy and socio-environmental agents present in the basin's contribution area. In this context, the objective of this research was to analyze the dynamics of land use and perform a hydrological modeling for the Cachoeira River Watershed (BHRC), using the Soil & Water Assessment Tool (SWAT) model. SWAT is a hydrological model that allows representing different physical processes in a watershed, such as evapotranspiration, infiltration, water runoff, among other processes. **Methodology** – For the analysis of land use for the time series chosen in this study, the GRASS r.report in QGIS was used, with maps from the years 1985 and 2020 being inserted. For the execution steps within SWAT, the ArcGis software and maps of soil types, platform digital model (MDE) and land use and land cover from the Mapbiomas project were inserted, also using series of climatic data from the area under study. As a result, the SWAT model, based on the MDE of the area under study, satisfactorily processes the delimitation of the basin's drainage area. With regard to land use in the basin, the increase in the urbanized area, the mining area and other non-vegetated areas for the period 1985-2020 is highlighted. The model underestimated events with peak flows, yet the simulated flows had a satisfactory relationship with the observed flows in the basin with an R^2 of 0.5725. According to the literature, in the range of $0.50 < R^2 \leq 0.65$, the relationship between measured and simulated data would be considered satisfactory, however, the PBIAS value would be necessary to assess whether the model performance is acceptable or whether the modeling needs calibration. Thus, the importance of the stages of sensitivity, validation and calibration of the SWAT model is recognized, but these stages were not possible in this research due to the difficulty in finding pedological data related to the soils of the region, information provided and continuous hydrometeorological, historical series of preservation and flow. Thus, these steps were recommended for future work. The results found in this study show that the SWAT model is an effective tool for simulating hydrological processes in a watershed, and, consequently, for managing water resources.

Keywords: Hydrological Model; SWAT; Geographic Information System; Land use.

Lista de ilustrações

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira.	42
Figura 2: Fluxograma das etapas do modelo SWAT.....	45
Figura 3: Alterações nas classes de uso da terra para a BHRC no período 1985-2020.....	52
Figura 4: Classes de uso da terra na BHRC em 2020.....	53
Figura 5: Modelo Digital de Elevação BHRC.....	54
Figura 6: Mapa de declividade (%) da BHRC.....	56
Figura 7: Estações utilizadas, exutórios e sub-bacias geradas para o rio Cachoeira.	57
Figura 8: Tipos de solos na bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.	59
Figura 9: Unidades de resposta hidrológica (HRU'S).....	60
Figura 10: Simulação gerada pelo modelo SWAT para a BHRC.	61
Figura 11: Vazões observadas na BHRC e vazões simuladas pelo SWAT.....	62
Figura 12: Correlação entre vazões observadas na BHRC e vazões simuladas pelo SWAT. ...	63

Lista de tabelas

Tabela 1: Classificação dos coeficientes para validação dos resultados do modelo SWAT em escala mensal.	35
Tabela 2: Dados pedológicos inseridos no modelo SWAT.	48
Tabela 3: Descrição das estações utilizadas.	50
Tabela 4: Classes de uso da terra para a BHRC em 1985 e 2020, com suas respectivas áreas.	51
Tabela 5: Classes de solos na BHRC e suas respectivas áreas.	59
Tabela 6: Valores médios mensais da bacia.	62

Lista de quadros

Quadro 1: Grupos hidrológicos de solos, para definição do valor de CN.....	27
Quadro 2: Parâmetros mais sensíveis para bacias hidrográficas brasileiras.....	35
Quadro 3: Principais impactos no escoamento com relação às mudanças de uso e ocupação da terra.....	36
Quadro 4: Classes de usos da terra na bacia BHRC e associação com o banco de dados do SWAT.....	47

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas
ANION_EXCL	Porosidade
APP	Área de preservação permanente
ArcSWAT	Interface Swat no ArcGIS
BH	Bacias hidrográficas
BHRC	Bacia hidrográfica do rio Cachoeira
CN	Curve Number
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Food and Agriculture Organization
GPS	Global Positioning System
HRU	Unidades de Resposta Hidrológicas
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BEM	Microbacia experimental
MDE	Modelo digital de elevação
NSE	Eficiência de Nash-Sutcliffe
PCPD	Número médio de dias chuvosos (dia)
PCPSKW	Coefficiente de inclinação para precipitação diária
PCPMM	Precipitação média (mm/dia)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação diária (mm/dia)
PR_W1_	Probabilidade de dia chuvoso após dia seco
PR_W2_	Probabilidade de dia chuvoso após dia chuvoso
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 h (mm)
RAIN_YRS	Número de anos de dados usados para determinar valores para RAIN_HHMX (ano).
SOLARAV	Radiação solar média (MJ/m ² /d)
SOL_ALB	Albedo
SOL_AWC	Água disponível no solo
SOL_BD	Densidade aparente úmida
SOL_CBN	Carbono orgânico

SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
SOL_Z	Profundidade da camada
SOL_ZMX	Profundidade máxima de enraizamento do perfil do solo
SCP- Plugin	Plugin de Classificação Semiautomática
SCS	Soil Conservation Service
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
SIG	Sistema de informações geográficas
TMPM	Temperatura máxima (°C)
TMPMN	Temperatura mínima (°C)
TMPSTMN	Desvio padrão da temperatura mínima (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima (°C)
HSPF	Hydrological Simulation Program
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
USLE_K	Erodibilidade
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WINDAV	Velocidade média do vento (m/s)
WXGEN	Gerador climático do modelo SWAT

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1 Bacias hidrográficas	19
3.2 Ciclo Hidrológico e o Uso da Terra	20
3.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelos Hidrológicos.....	21
3.4 O Modelo SWAT.....	23
3.4.1 Visão Geral	23
3.4.2 Balanço Hídrico do Modelo SWAT.....	24
3.4.3 Sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT.....	31
3.5 Influência do uso da terra nas vazões dos cursos d'água.....	35
4 MATERIAL E MÉTODOS	42
4.1 Caracterização e localização da área de estudo	42
4.2 Análise do Uso da Terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira	43
4.3 Etapas de execução no SWAT	44
4.3.1 Delineamento da Bacia Hidrográfica	45
4.3.2 Definição das Unidades de Resposta Hidrológicas	46
4.3.3 Parâmetros e dados meteorológicos	49
4.3.4 Modelagem Inicial.....	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Análise do Uso da Terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira	50
5.2 Processamento de dados de entrada no SWAT.....	53
5.2.1 Delineamento da Bacia Hidrográfica	53
5.2.2 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU'S).....	57
5.2.3 Modelagem Inicial.....	60
6 CONCLUSÕES	64
8 REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Estudos hidrológicos em bacias hidrográficas têm sido amplamente realizados a partir da necessidade de compreensão dos processos que controlam o movimento da água e sedimentos, e seus impactos sobre a disponibilidade e qualidade das águas. Parte dos problemas referente aos recursos hídricos está relacionado à falta de planejamento e gestão, além da sua contaminação. Diversos fatores como o crescimento populacional, o processo intensivo de urbanização, a expansão da fronteira agrícola, o uso e ocupação da terra de forma desordenada têm ocasionado impactos negativos na oferta dos recursos hídricos.

No Brasil, desde a promulgação da Lei nº 9.433 de 1997 que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, a bacia hidrográfica passa a ser considerada como unidade de planejamento. Dessa forma, torna-se essencial que o manejo sustentável e a ordenação do emprego dos recursos hídricos se façam no contexto da bacia hidrográfica como unidade de gestão, a qual representa a base de ações e serviços necessários à prevenção e recuperação da disponibilidade de água.

O uso indiscriminado da terra e a supressão dos recursos ambientais disponíveis, como a vegetação, podem influenciar no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, na qualidade da água e no regime de nascentes. Dessa forma, torna-se fundamental o monitoramento de bacias hidrográficas visando a conservação da cobertura vegetal, posto que, a presença da mesma, contribui para o ajustamento das variáveis internas dos ecossistemas aquáticos lênticos e lóticos e a manutenção do equilíbrio do regime hidrológico da bacia (PINTO *et al.*, 2004).

Assim, para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos é fundamental conhecer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, os seus regimes de variação de vazões e, principalmente, as suas relações com os agentes econômicos e socioambientais presentes na área de contribuição da bacia. Para isso, a modelagem hidrológica integrada ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), apresenta-se como um dos principais mecanismos a ser utilizados, uma vez que propicia menores custos e economia de tempo na análise das mudanças físicas e antropogênicas em bacias hidrográficas. A modelagem hidrológica é eficaz para a realização de estudos sobre efeitos de mudanças climáticas e de uso da terra, análises de disponibilidade dos recursos hídricos e apoio à tomada de decisão, dentro da finalidade do gerenciamento e planejamento de recursos hídricos, entre outras aplicações.

Como exemplo de modelo hidrológico tem-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O SWAT permite representar distintos processos físicos em uma bacia hidrográfica tais como, a evapotranspiração, a infiltração, o escoamento de água, entre outros, com o objetivo

de analisar os impactos gerados por alterações no uso da terra sobre o escoamento (superficial e subterrâneo), produção de sedimentos e também qualidade de água (NEITSCH *et al.*, 2009). Neste sentido, estudos sobre a hidrologia de bacias hidrográficas e sua associação com a variabilidade climática e o uso da terra vêm sendo desenvolvidos (MELO NETO *et al.* (2014); VIANA (2019); SOUSA (2019), FERRAZ (2021).

O SWAT é um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo. Ele foi desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso da terra em bacias hidrográficas de diferentes escalas (ARNOLD *et al.*, 2012). Computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações em longos períodos, a sua vinculação aos ambientes SIG torna possível considerar a oscilação espacial das propriedades físicas da bacia.

Para esse estudo, foi utilizada a Bacia hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, Brasil, pois esta possui notável importância perante o desenvolvimento socioeconômico na região Sul da Bahia, onde seus corpos hídricos subsidiam atividades como pesca, irrigação e abastecimento para consumo populacional nos municípios integrantes da mesma. Entre o final dos anos 1980 e início dos anos 1990, com a crise econômica na região cacauífera, a BHRC sofreu alterações quanto ao uso da terra, algumas plantações de cacau abandonadas foram regeneradas à vegetação nativa ao longo da bacia. Contudo, o maior efeito da crise foi o crescimento da pecuária.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a dinâmica do uso da terra e realizar modelagem hidrológica para Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira-BA, utilizando o modelo SWAT

2.2 Objetivos Específicos

- Coletar informações cartográficas, de sensores orbitais e base de dados para análise preliminar da bacia;
- Utilizar o modelo SWAT para simulação das vazões que ocorreram na BHRC;
- Comparar as vazões observadas (dados reais) com as vazões simuladas pelo SWAT;
- Avaliar o desempenho do modelo em escala mensal no âmbito da BHRC;
- Analisar a dinâmica do uso da terra na BHRC, para o período 1985-2020.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Bacias hidrográficas

Uma bacia hidrográfica é um sistema que integra as configurações de relevo e drenagem. A parcela da chuva que cai sobre a área da bacia e que irá se transformar em escoamento superficial, chamada precipitação efetiva, escoar a partir das maiores elevações do terreno, formando enxurradas em direção aos vales. Esses, por sua vez, concentram esse escoamento em córregos, riachos e ribeirões, os quais confluem e formam o rio principal da bacia. Consideradas as unidades territoriais básicas para estudos hidrológicos, as bacias hidrográficas possuem diferentes conceitos na literatura, que são, porém, semelhantes entre diversos autores. O conceito de bacias hidrográficas (BH) envolve o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso hídrico e dos fluxos de sedimentos e nutrientes. Na perspectiva de conservação dos recursos naturais, o conceito tem sido ampliado, com uma abrangência além dos aspectos hidrológicos, envolvendo o conhecimento da estrutura biofísica da BH, bem como das mudanças nos padrões de uso da terra e suas implicações ambientais (PIRES *et al.*, 2002).

Um conceito simples e de fácil entendimento de bacia hidrográfica é o apresentado por Tucci (2002) “[...] área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório”. O autor justifica a divisão da bacia hidrográfica como unidade legal, e traz a bacia hidrográfica como a área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

Para a ciência ambiental, a bacia hidrográfica traz o conceito de integração, uma vez que, seu uso e aplicação para estudos de problemas ambientais são fundamentais, pois esta contém informações físicas, biológicas e socioeconômicas, sendo que nenhuma pode ser desconsiderada (BALDISSERA, 2005). Assim, é sabido que a bacia hidrográfica deve ser entendida como um sistema interligado, sendo que a subdivisão de grandes bacias em bacias menores (sub-bacias) facilita o diagnóstico e o monitoramento ambiental, visto que isto permite a correlação das análises da qualidade da água com a dinâmica do uso e ocupação da terra, assim como a delimitação de áreas críticas e a identificação de processos impactantes (MORAES; LORANDI, 2016).

No Brasil, a Divisão Hidrográfica Nacional, instituída pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), estabelece as doze Regiões Hidrográficas brasileiras, são elas:

Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico NE Ocidental, Parnaíba, Atlântico NE oriental, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraná, Paraguai, Uruguai, Atlântico Sul. São regiões hidrográficas bacias, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas próximas, com características naturais, sociais e econômicas similares. Esse critério de divisão das regiões visa orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em todo o país (ANA, 2022).

3.2 Ciclo Hidrológico e o Uso da Terra

A energia solar e a força da gravidade são os principais elementos associados à movimentação e ao escoamento das águas. Em perspectiva global, o ciclo hidrológico é caracterizado pela circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo alimentado pela energia solar, associado à força da gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2009).

O conceito de ciclo hidrológico está ligado ao movimento e à troca de água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na Hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Este movimento permanente deve-se ao Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), às superfícies vegetadas na forma de evapotranspiração e à gravidade, que faz com que a água condensada caia (precipitação) e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos (escoamento superficial) ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fraturas (escoamento subterrâneo), além dos fluxos associados com os escoamentos nos rios, canais e corpos hídricos. (PIMENTEL, 2015).

As noções de precipitação, escoamento (superficial e subsuperficial), evapotranspiração, e interceptação e armazenamento são imprescindíveis na análise da dinâmica de fluxos aquáticos que abastecem os corpos d'água e são liberados simultaneamente, onde o tempo desse processo obedece às condições climáticas e geográficas do ambiente estudado (SILVA, 2016). O ciclo hidrológico pode ser estudado de diversas maneiras e em várias escalas, desde uma microbacia a uma grande bacia hidrográfica até o nível global, observando outros componentes como a percolação ou a porção interceptada por árvores e prédios.

Os tipos de uso da terra em uma bacia hidrográfica interferem no ciclo hidrológico, pois as diferentes atividades humanas têm potencial para aumentar ou diminuir o quantitativo de escoamento superficial. No processo de escoamento superficial, a água é impulsionada pela gravidade para cotas mais baixas, formando pequenos filetes que tendem a se unir e formar cursos d'água, que continuam fluindo até encontrar riachos, os quais formarão rios, de porte cada vez maior, até atingirem um oceano ou lago. Este escoamento é regido por leis físicas (conservação de massa, energia e quantidade de movimento) e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade, sendo influenciado pelas características

da precipitação (intensidade e duração), pelas características do solo (textura, capacidade de infiltração e umidade) e pelo tipo de cobertura vegetal. Quanto maior for a capacidade de infiltração do solo, menor será a parcela da precipitação que irá escoar (ARAGÃO, 2000; PAIVA et al., 2010).

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e o longitudinal. O vertical é representado pelos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, enquanto que o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície. A vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação. Da parcela de precipitação que atinge o solo a mesma pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da capacidade do solo em infiltrar, a capacidade de infiltração depende do tipo e do uso da terra. O movimento descendente da água no interior do solo, de cima para baixo, é chamado de percolação (TUCCI, 2002).

3.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelos Hidrológicos

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG), de modo geral, apresenta funções comuns a sistemas para gerenciamento de banco de dados, tratamento de imagens digitais e funções estatísticas, estando intimamente relacionados com outras tecnologias, como sensoriamento remoto e Global Positioning System (GPS). Assim, o SIG se insere como uma ferramenta que tem a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo.

O uso de métodos e modelos associados ao SIG oferece a possibilidade de executar modelagem para prever padrões espaciais de processos ecológicos, com relação a possíveis cenários decorrentes do tipo de ocupação/uso dos recursos naturais, possibilitando também auxiliar os tomadores de decisão na definição de diretrizes a respeito de usos da terra em uma BH. Outra vantagem da integração de modelos hidrológicos com o SIG, é o auxílio na interpretação dos resultados do modelo, a partir da representação espacial dos resultados obtidos na modelagem, sobretudo na forma de mapas temáticos.

Entre as metodologias voltadas à gestão de BH estão aquelas que utilizam SIG e modelos hidrológicos para auxiliar na determinação de medidas de manejo ambiental. Os modelos hidrológicos são representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos. Segundo Baldissera (2005), um modelo de simulação, de um modo geral, pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas, ou seja, consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. O objetivo desta modelagem é, então, compreender melhor o sistema e prever situações futuras, algumas vezes também reproduzir o passado, para direcionar as tomadas de decisão (MACHADO, 2002).

Uma perspectiva histórica sobre o desenvolvimento e evolução da modelagem hidrológica elaborada por Singh e Woolhiser (2002), remonta, o seu início, ao desenvolvimento da engenharia civil no século 19 para a construção de rodovias, canais, pontes e sistemas de drenagem. A modelagem hidrológica envolvia, quase que exclusivamente, o desenvolvimento de conceitos e teorias acerca dos componentes do ciclo hidrológico. As primeiras tentativas modelavam cada componente do ciclo de forma isolada. Apenas na década de 60, com o advento da revolução digital, foi possível a integração de processos e, conseqüentemente, simulações completas para toda uma bacia. O modelo Stanford Watershed Model (SWM), atualmente conhecido como Hydrological Simulation Program (HSPF) foi, provavelmente, o primeiro modelo a realizar simulações nesse nível (CRAWFORD; LINSLEY, 1966).

Os modelos hidrológicos possuem inúmeras vantagens, como facilidade de execução, custo reduzido e obtenção rápida dos resultados, possibilitando o estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais que facilitam a previsão de fenômenos e processos naturais, viabilizando a elaboração, inclusive de estudos de impacto ambiental. São muitos os modelos hidrológicos desenvolvidos e disponíveis para serem utilizados, contudo, eles apresentam diferenças entre si. Tucci (2002) conceitua um modelo como a simplificação e tradução de um sistema para uma linguagem simples, buscando diferentes repostas a partir de diferentes entradas, classificando os modelos como:

- Contínuo ou discreto: contínuo, não leva em consideração a distribuição espacial de variáveis ou de parâmetros heterogêneos dentro de uma bacia hidrográfica; e discretos, os intervalos de mudanças de estados são discretos, informações pontuais (muito utilizados na hidrologia).

- Concentrado ou distribuído: no concentrado, não levam em consideração a variabilidade espacial (utiliza dados médios); já no distribuído, as variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou do tempo (varia de um ponto para outro dentro da bacia hidrográfica). Os modelos podem ser semidistribuídos, ou seja, existe homogeneidade dentro da sub-bacia, porém o conjunto de sub-bacias é heterogêneo.

- Estocástico ou determinístico: estocástico, considera a probabilidade de ocorrência das variáveis (saída estatística) e; determinísticos, são modelos matemáticos em que o comportamento de toda variável é completamente determinado pelas equações que governam o modelo, ou seja, o comportamento do ciclo hidrológico representado por relações matemáticas que descrevem as interações das suas diversas fases.

- Empírico ou conceitual: empírico, os dados simulados são ajustados aos dados observados, desprezando-se os processos físicos envolvidos; conceitual, parte-se da fundamentação, considerando os processos físicos.

Parte das aplicações com modelos hidrológicos no Brasil está interessada na eficiência do modelo para representar as bacias hidrográficas satisfatoriamente, visto que os modelos hidrológicos mais utilizados não foram desenvolvidos para as condições brasileiras (BRESSIANI *et al.*, 2015). Assim, cabe ao pesquisador de acordo com as características da área de estudo e dados disponíveis efetivar a escolha do modelo que melhor se adapte aos seus objetivos.

3.4 O Modelo SWAT

3.4.1 Visão Geral

O SWAT é um modelo hidrológico desenvolvido pelo Serviço de Pesquisas Agrícolas do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) na década de 1980. O SWAT é um modelo contínuo, semidistribuído e determinístico, que permite a simulação de processos hidrológicos, de sedimentos e qualidade da água para bacias de médio e grande porte, através de informações (dados de entrada) específicas (GARRIDO, 2003; NEITSCH *et al.*, 2009).

O SWAT é de domínio público com código aberto, e possui interfaces disponíveis para utilização. Para realizar a integração do SWAT com programas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), podem ser utilizadas a extensão ArcSWAT, que é a mais utilizada, ou QSWAT. A extensão ArcSWAT possibilita inserir os dados de entrada no modelo por meio do software ArcGIS, desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute (ESRI), sendo necessária a aquisição de licença. No QSWAT, a inserção dos dados de entrada é feita no QGIS, aplicativo profissional GIS Livre e de Código Aberto. O SWAT é um modelo com uma documentação extensiva e redes de contatos estruturadas, disponível no website <http://swatmodel.tamu.edu>. No site também são disponibilizados todos os manuais e fundamentação teórica que descrevem as equações, bem como as entradas e saídas do modelo.

O SWAT é utilizado para dados distribuídos sobre topografia, solo, cobertura e uso da terra, dinâmica da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas. Para realizar a modelagem, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias menores, que são parametrizadas por meio das Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units – HRU). Cada HRU compreende uma combinação de declividade, tipos de solo e uso da terra. A partir de 2005, a declividade foi incluída para gerar as HRU's, além de incluídas as opções de reservatórios e delimitação dos rios da bacia. Essas modificações foram importantes para simular o escoamento e processos de

erosão; o movimento da água no solo; a evapotranspiração; o crescimento e a produtividade das plantas; os nutrientes do solo e a ciclagem de carbono; os pesticidas e as bactérias; a degradação e o transporte para cada HRU e sub-bacia (NEITSCH *et al.*, 2009; CORREIA, 2016).

3.4.2 Balanço Hídrico do Modelo SWAT

Para qualquer aplicação do modelo SWAT, é importante uma quantificação consistente do balanço hídrico, pois ela é a força motriz de tudo o que ocorre na bacia hidrográfica. O SWAT realiza o cálculo dos componentes do escoamento recorrendo à equação do balanço hídrico e aos modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Estes volumes de água são seguidamente conduzidos até a rede de drenagem e ao longo desta até ao ponto mais a jusante da bacia hidrográfica no qual é contabilizado o valor total de produção de água (NEITSCH *et al.*, 2005).

O ciclo hidrológico no SWAT pode ser dividido em duas principais seções. A primeira é a fase terrestre, que controla elementos do canal principal de cada sub-bacia, como água, nutrientes, sedimentos e pesticida. A segunda é a fase equivalente à de movimentação da água e sedimentos até a rede de canais da bacia hidrográfica, bem como sua descarga. Segundo o manual do SWAT (2009), os caminhos potenciais da movimentação da água simulados pelo SWAT na HRU são:

- **ARMAZENAMENTO NA COPA DAS ÁRVORES:** O armazenamento na copa das árvores é a água interceptada por superfícies vegetativas (árvores) em que ela é retida e disponibilizada para evaporação;
- **INFILTRAÇÃO:** A infiltração se refere à entrada da água no perfil do solo. Uma vez que a infiltração permanece, o solo se torna cada vez mais úmido, fazendo com que a taxa de infiltração diminua com o tempo, até que atinja um valor estável. A quantidade de água presente no perfil do solo é calculada com a diferença entre a quantidade de precipitação e quantidade de escoamento superficial;
- **REDISTRIBUIÇÃO:** A redistribuição se refere à movimentação contínua da água pelo perfil do solo, após a interrupção de uma entrada de água (por precipitação ou irrigação) em sua superfície. O fluxo descendente ou percolação ocorre quando a capacidade de retenção de água de uma camada de solo é ultrapassada, e a camada abaixo não está saturada. A taxa de fluxo é regida pela condutividade saturada da camada do solo;
- **EVAPOTRANSPIRAÇÃO:** A evapotranspiração é um conjunto de todos os processos ocorridos na terra dos quais a água, em seu estado líquido ou sólido, presente ou próximo à superfície da terra, se torna vapor. O SWAT, calcula a evaporação potencial da água no solo por uma função da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar. A evaporação real da água existente no solo é calculada por meio de funções exponenciais da profundidade do solo e quantidade de água. A transpiração da planta é simulada como uma função linear de potencial evapotranspiração e índice de área foliar;

EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL: A evapotranspiração potencial é a taxa em que a evapotranspiração poderia ocorrer em uma grande área completa e uniformemente coberta por vegetação e que tenha acesso ao fornecimento ilimitado de água no solo. O modelo SWAT oferece três opções para estimar o potencial de evapotranspiração: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith;

- **ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL:** O escoamento subsuperficial ou subterrâneo é uma contribuição do fluxo d'água que se origina abaixo da superfície, mas acima da zona em que as pedras estão saturadas com água. O escoamento subsuperficial no perfil do solo (0-2m) é calculado simultaneamente com a redistribuição. Um modelo de acumulação cinemática é usado para prever o fluxo lateral em cada camada do solo;
- **ESCOAMENTO SUPERFICIAL:** Ocorre por via terrestre ao longo de uma superfície inclinada. Usando séries de precipitação diária ou sub-diárias, o modelo SWAT simula o volume do escoamento superficial e as taxas máximas de escoamento superficial para cada HRU;
- **CANAIS AFLUENTES:** Cada canal afluente dentro da sub-bacia leva apenas uma parte da água pertencente à sub-bacia, e não recebe intervenção de águas subterrâneas para seu fluxo. Todo fluxo nos canais afluentes é liberado e mapeado pelo canal principal da sub-bacia. O modelo SWAT usa os atributos dos canais afluentes para determinar o tempo de concentração para a sub-bacia;
- **RETORNO DO FLUXO:** O retorno do fluxo ou fluxo de base, é o volume do fluxo do curso d'água originado nas águas subterrâneas. O modelo SWAT divide as águas subterrâneas em dois sistemas de aquíferos, aquífero raso não confinado e aquífero profundo confinado.

A Hidrologia no SWAT é equacionada segundo quatro processos principais: a) escoamento superficial; b) evapotranspiração; c) umidade no solo; d) água subterrânea. Todos esses processos são contabilizados na equação de balanço hídrico do modelo. Nos itens subsequentes serão descritas as principais equações referentes a esses processos principais. Maiores detalhes sobre os caminhos potenciais da movimentação da água, simulados pelo SWAT, podem ser encontrados no manual do SWAT (NEITSCH, 2009).

A simulação do ciclo hidrológico no SWAT baseia-se na solução da equação do equilíbrio hídrico (Equação 1):

$$SW_t = SW_{0(i)} + \sum_{i=1}^t (R_{dia(i)} - Q_{sup(i)} - E_{a(i)} - W_{solo(i)} - Q_{gw(i)}) \quad (1)$$

em que:

SW_t é a lâmina final de água no solo, mm;

$SW_{0(i)}$ é a lâmina inicial de água no solo no dia i , mm;

t é o tempo em dias;

$R_{dia(i)}$ é a lâmina de chuva no dia i , mm;

$Q_{sup(i)}$ é a lâmina de escoamento superficial para o dia i , mm;

$E_{a(i)}$ é a lâmina de água evapotranspirada para o dia i , mm;

$W_{solo(i)}$ é a lâmina de água entrando nas zonas insaturada do solo no dia i , mm;

$Q_{gw(i)}$ é a parcela da vazão no canal oriunda do escoamento de base para o dia i , mm.

a) Escoamento Superficial

Além do cálculo do escoamento superficial propriamente dito, há alguns cálculos posteriores feitos pelo modelo que, de alguma forma, influenciam nesse processo. São eles: a taxa de pico do escoamento superficial, o retardo do escoamento superficial na bacia e as perdas por transmissão.

O modelo SWAT provê dois métodos para a estimativa do escoamento superficial: o procedimento do Soil Conservation Service (SCS), chamado Curve Number, que é o default do modelo, e o Método de Green & Ampt. Este último exige que sejam informados dados subsidiários de precipitação, o que restringe a sua utilização devido à falta de dados disponíveis para algumas regiões.

A equação do escoamento superficial do SCS é um modelo empírico, desenvolvido a partir de mais de 20 anos de estudos envolvendo os processos chuva-vazão em pequenas bacias rurais nos EUA (NEITSCH et al., 2005).

A equação do SCS é expressa pela Equação 2:

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (2)$$

O parâmetro S varia espacialmente, considerando mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (NEITSCH *et al.*, 2009). Sua determinação considera o fator CN, e é dado pela seguinte equação, em unidades métricas (Equação 3):

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável, e o limite superior, de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (Neitsch et al., 2009).

As tabelas com os valores tabelados de CN podem ser facilmente encontradas na literatura. Esses valores variam conforme o uso e o grupo hidrológico do solo. Grupos hidrológicos são um tipo de classificação de solos em função de seus valores de condutividade

hidráulica (mm.h^{-1}). Da classe A para a D, há aumento do potencial para geração de escoamento superficial (Quadro 1).

Quadro 1: Grupos hidrológicos de solos, para definição do valor de CN.

Grupos Hidrológicos	Características do Solo
A	Solos arenosos, com baixo teor de argila total (inferior a 8%), sem rochas, sem camada argilosa e nem mesmo densificada até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre presente uma camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos, com teor de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se, a cerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 a 40% de argila total) e com camada densificada a uns 50cm de profundidade ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Fonte: (SURVEY STAFF, 1996).

Buscando adequar a metodologia do SCS às condições dos solos brasileiros, Sartori et al. (2005) avaliaram e revisaram a classificação hidrológica dos solos proposta e propuseram uma classificação hidrológica para o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, levando em consideração, além da condutividade hidráulica, características como profundidade, textura, razão textural entre o horizonte superficial e subsuperficial e a permeabilidade dos solos influenciada pela sua porosidade e pela atividade da argila. No presente estudo, a classificação hidrológica dos solos da Bacia do Rio Cachoeira foi realizada com base na proposta de Sartori et al. (2005).

b) Evapotranspiração

A partir do SWAT, a evapotranspiração potencial é calculada por dois métodos diferentes, que são: métodos de Penman-Monteith e método de Priestley-Taylor. O método de Penman-Monteith foi primeiramente proposto por Penman e depois modificado por Monteith, o qual introduziu as funções de resistência aerodinâmica e resistência do dossel vegetal. Tal método foi adotado pela Food and Agriculture Organization (FAO) como equação padrão para estimativa da evapotranspiração real (Equação 4).

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \cdot [(e_s - e_a)] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (4)$$

em que:

λE é a densidade de fluxo latente, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

Δ representa a declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

H_{net} é a radiação, $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$;

G é a densidade de fluxo de calor para o solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

ρ_{ar} é a densidade do ar, kg m^{-3} ;

C_p , é o calor específico a temperatura constante, $\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$;

$(e_s - e_a)$ representa o déficit de pressão do vapor do ar, kPa ;

γ é a constante psicométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

r_c é a resistência do dossel da vegetação, s m^{-1} ;

r_a é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} .

c) Umidade no solo

Durante o processo de infiltração, o solo vai se tornando gradativamente umedecido e a taxa de infiltração decresce com o tempo até que alcance um valor estável. A taxa inicial de infiltração depende do teor de umidade do solo antes da introdução de água na superfície e a taxa final de infiltração é equivalente à condutividade hidráulica do solo saturado.

A redistribuição é considerada como o movimento contínuo da água no perfil de solo após o cessar da sua entrada pela superfície. A redistribuição é causada por diferenças no conteúdo de água ao longo do perfil do solo. Quando o conteúdo de água no perfil atinge a uniformidade, o processo de redistribuição cessa.

A redistribuição pode ser dividida em fluxo descendente (percolação) e fluxo lateral. O processo de percolação combina duas condições: a primeira através da propagação do armazenamento e a segunda pelo fluxo por fendas existentes no solo. A percolação através da propagação do armazenamento no solo é calculada para cada horizonte, uma vez que o volume de água exceda a capacidade de campo deste sob a condição de que a camada seguinte não esteja saturada (Carvalho Neto, 2011). O volume de água disponível para percolar deve obedecer à seguinte condição (Equações 5 e 6):

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} = FC_{cam} \text{ se } SW_{cam} > FC_{cam} \quad (5)$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \text{ se } SW_{cam} < FC_{cam} \quad (6)$$

onde $SW_{cam,excesso}$ representa a quantidade de água disponível para percolar no dia (mm), SW_{cam} se refere à quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm) e FC_{cam} é a quantidade de água na capacidade de campo (mm).

A quantidade de água que efetivamente se moverá para a camada de solo inferior é calculada pela Equação (7):

$$W_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (7)$$

em que:

$w_{perc,cam}$ é a quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm);

ΔT é a duração do intervalo de tempo (h); e

TT_{perc} é o tempo de percolação entre as camadas (h).

O tempo de percolação entre as camadas é dado por (Equação 8):

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (8)$$

em que:

SAT_{cam} é a quantidade de água no solo completamente saturado (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h).

Escoamento sub-superficial lateral

Calculado em paralelo com o processo de percolação para profundidade de até 2 m, o fluxo lateral é calculado através de um modelo de armazenamento cinético, desenvolvido por Sloan et al. (1983), e que se baseia na equação de continuidade de massa (Equação 9).

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 \cdot SW_{cam,excesso} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{slp}} \right) \quad (9)$$

onde:

Q_{lat} é o escoamento lateral (mm/dia);

$SW_{cam,excesso}$ é o volume de água drenável armazenada na zona saturada da encosta por unidade de área (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h);

slp é a declividade da encosta (m/m);

Φ_d é a porosidade drenável do solo (mm/mm); e

L_{slp} é o comprimento da encosta (m).

d) Água subterrânea

O volume de água que percola tende a recarregar os aquíferos, o raso e o profundo, caso não ascenda através das franjas capilares. A quantidade de água que pode recarregar os aquíferos é dada por (Equação 10):

$$W_{rec} = \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{\delta_{aq}}\right]\right) W_{seep} + \exp\left[\frac{-1}{\delta_{aq}}\right] W_{rec,i-1} \quad (10)$$

em que

W_{rec} é a quantidade de água que adentra os aquíferos no dia “i” (mm);

δ_{aq} é tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia);

W_{seep} é a quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm); e

$W_{rec,i-1}$ é a quantidade de água que entra no aquífero no dia $i-1$ (mm).

Com isso, o modelo regula a quantidade de água que recarrega o aquífero profundo, através da seguinte Equação 11:

$$W_{prf} = \beta_{prf} \cdot W_{rec} \quad (11)$$

onde W_{prf} é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo no dia i e β_{prf} é o coeficiente de percolação do aquífero. Desta forma, a quantidade de água destinada ao aquífero raso é dado por (Equação 12):

$$W_{rec,rs} = \beta_{rec} \cdot W_{prf} \quad (12)$$

em que $W_{rec,rs}$ é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero raso no dia “i”. Em conclusão, o balanço hídrico para o aquífero raso é dado por (Equação 13):

$$aq_{rs,i} = aq_{rs,i-1} + W_{rec,rs} - Q_{aq} - W_{revap} - W_{bomba,rs} \quad (13)$$

onde

$aq_{rs,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia (mm);

$aq_{rs,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia “i-1” (mm);

$W_{rec,rs}$ é a quantidade de água que recarrega o aquífero raso no dia (mm);

Q_{aq} é o escoamento subterrâneo que recarrega o canal principal (fluxo de base) (mm);

W_{revap} é a quantidade de água que ascende por franjas capilares (mm); e

$W_{bomba,rs}$ é a quantidade de água retirada através de bombas (mm).

Revap

Para considerar o volume de água que ascende através de franjas capilares, em função da demanda de evapotranspiração, o modelo SWAT incorpora o processo denominado “*Revap*” (W_{revap}). Esse processo não é contabilizado no volume evapotranspirado, sendo de fundamental importância em bacias onde a zona saturada encontra-se próxima à superfície e há raízes profundas.

A máxima quantidade de água que poderá ser retirada via *Revap* é dada por (Equação 14):

$$W_{revap,max} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (14)$$

sendo

$W_{revap,max}$ a máxima quantidade de água (mm) que ascende em resposta ao déficit hídrico;

β_{rev} é o coeficiente de *Revap*; e

E_0 é o potencial de evapotranspiração (mm) daquele dia.

A quantidade de água a qual efetivamente passa por tal processo é determinada pelas seguintes condições:

$$W_{revap} = 0 \text{ se } aq_{rs} \leq aq_{lim,rv} \quad (15)$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} - aq_{lim,rv} \text{ se } aq_{lim,rv} < aq_{rs} < (aq_{lim,rev} + W_{revap,max}) \quad (16)$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} \text{ se } aq_{lim,rv} \geq (aq_{lim,rv} + W_{revap,max}) \quad (17)$$

onde

aq_{rs} : quantidade de água armazenada no aquífero raso (mm), e

$aq_{lim,rv}$: valor limite do nível de água a ser superado para ocorrer o processo *Revap* (mm).

3.4.3 Sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT

A capacidade de um modelo hidrológico simular os processos de bacias hidrográficas é avaliada por meio de análise de sensibilidade, processo de calibração e validação do modelo. Na análise de sensibilidade, é medida a resposta de uma variável de saída a uma alteração em um parâmetro de entrada, ou seja, a análise de sensibilidade avalia como diferentes parâmetros influenciam em uma saída prevista. A análise de sensibilidade é importante sob dois pontos de

vista: primeiro, os parâmetros representam processos e a análise de sensibilidade fornece informações sobre os processos mais importantes na região de estudo. Em segundo lugar, a análise de sensibilidade ajuda a diminuir o número de parâmetros no procedimento de calibração, eliminando os parâmetros identificados como não sensíveis. A análise de sensibilidade pode ser realizada em um parâmetro por vez, ou de forma global. Na análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, mantém-se os parâmetros constantes ao alterar um, para identificar seu efeito em alguma saída do modelo ou função objetivo. Nesse caso, apenas algumas (geralmente 3 a 5) execuções do modelo são suficientes. Na análise de sensibilidade global, todos os parâmetros estão mudando, portanto, um número maior de execuções (500–1000 ou mais, dependendo do número de parâmetros) é necessário para ver o impacto de cada parâmetro na função objetivo.

Vale ressaltar, que a calibração do modelo SWAT e análise de sensibilidade podem ser realizadas de forma manual ou automática. A calibração manual exige do usuário um alto conhecimento sobre o sistema e a estrutura do modelo, bem como sobre o comportamento real da bacia hidrográfica em estudo. Para calibração e análise de sensibilidade de forma automática foi desenvolvido o programa SWAT CUP. O SWAT CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o t-stat, que fornece a medida da sensibilidade, considerando que quanto maior for o seu valor, mais sensível será o parâmetro; e (2) o p-value, que determina a significância da sensibilidade, sendo que um valor próximo à zero indica maior significância. Os parâmetros identificados na análise de sensibilidade são frequentemente utilizados para calibrar o modelo. (WHITE *et al.* 2005).

Na calibração, o SWAT-CUP possibilita a escolha entre 5 métodos ou funções objetivo (Glue, ParaSol, SUFI2, MCMC e PSO). O SUFI2 normalmente é bem utilizado, por se tratar de um método similar ao método Bayesiano inverso, na qual combina a otimização da função objetivo e análise de incerteza, além disso, permite lidar com um grande número de parâmetros na calibração de um modelo numérico. As incertezas nos parâmetros de entrada, levam às incertezas nas variáveis de saída do modelo, que são expressas com distribuições de probabilidade de 95%. O objetivo no SUFI2, é que o resultado do modelo envolva a maioria das observações medidas no sistema natural. Por esta razão, quanto mais variáveis (representando diferentes processos) são incluídas no modelo, menor a probabilidade de erros.

Segundo o manual do SWAT CUP (ABBASPOUR, 2015), matematicamente, poderíamos expressar um modelo M calibrado como:

$$M \hat{y} M (\hat{y} | p, g, w, b, v, m, \dots)$$

onde:

\ddot{y} : é um vetor de parâmetros;

p : é o procedimento de calibração;

g : é o tipo de função objetivo;

w : é um vetor de pesos na função objetivo;

b : são as condições de contorno;

v : são as variáveis utilizadas na função objetivo;

m : é o número de dados observados.

Quanto ao termo análise de incerteza, refere-se à propagação de todas as incertezas de entrada do modelo (mapeadas na distribuição de parâmetros) para as saídas do modelo. As incertezas de entrada podem resultar da falta de conhecimento das entradas do modelo físico, como clima, solo e uso da terra, para modelar parâmetros e estrutura do modelo. As soluções de modelagem aceitáveis, em face de todas as incertezas de entrada pode, portanto, fornecer a incerteza do modelo expressa no SWAT-CUP como 95% de incerteza de previsão (95PPU).

Desta forma, o SUFI2 começa assumindo uma grande faixa de incerteza para os parâmetros (dentro de uma faixa fisicamente significativa), de modo que os dados medidos inicialmente se enquadram no 95PPU. Em seguida, essa incerteza é reduzida com base no monitoramento dos fatores P e R. A cada passo, as faixas de parâmetros anteriores são atualizadas através do cálculo da matriz de sensibilidade, seguido pelo cálculo da matriz de covariância, de 95% de confiança dos intervalos dos parâmetros, e a matriz de correlação (mais detalhes em Abbaspour et al., (2004; 2007). Os parâmetros são depois atualizados de tal modo que as novas faixas de valores são sempre menores do que as faixas anteriores, e estão centradas em torno da melhor simulação (SANTOS, 2015).

As confiabilidades do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliadas pelo fator-P e fator-R. Teoricamente, o valor para o fator-P varia entre 0 e 100%, enquanto o fator-R varia entre 0 e infinito. O fator-P de 1 e o fator-R de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos. A distância desses números pode ser utilizada para avaliar a eficácia da calibração. Por isso, muitas vezes um equilíbrio entre os dois valores deve ser atingido. A eficácia da modelagem pode ser quantificada também pelos coeficientes de determinação R^2 , eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e índice PBIAS (Equações 18,19 e 20).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (19)$$

$$PBIAS = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \cdot 100 \quad (20)$$

em que:

n = número de observações durante o período simulado;

O_i = vazões observadas;

S_i = vazões simuladas pelo modelo;

\bar{O} = média de valores observados;

\bar{S} = média dos valores simulados;

\hat{S}_i = obtido pela regressão linear entre os dados observados e estimados.

O coeficiente de determinação (R^2) é definido pela Equação 18 e calcula a relação entre os dados medidos e os modelados. Este coeficiente varia entre 0 e 1. O índice NSE, proposto por Nash e Sutcliffe (1970), é definido por um menos a soma das diferenças quadradas absolutas entre os valores medidos e os modelados, normalizados pela variância dos valores medidos durante o período modelado (Equação 19). Os resultados desta avaliação estão entre $-\infty$ e 1 (perfeito), sendo que, quanto mais se afastar do 1 mais incapaz é o modelo de representar os dados observados. O índice PBIAS (Equação 20) indica a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que dados observados. O valor considerado ótimo para o PBIAS é zero. Valores com baixa magnitude indicam acurácia na simulação do modelo. Valores positivos indicam subestimação, enquanto valores negativos indicam superestimação. O índice PBIAS tem a capacidade de indicar o desempenho do modelo (OLIVEIRA, 2014; MORIASI *et al.* 2007; SOUSA, 2019).

A Tabela 1 traz as classificações de Moriasi *et al.* (2007) com relação à avaliação dos resultados do modelo em escala mensal.

Tabela 1: Classificação dos coeficientes para validação dos resultados do modelo SWAT em escala mensal.

Classificação	NSE	PBIAS (%)	R ²
Muito bom	0,75<NSE≤1,00	PBIAS<±10	0,75<R ² ≤1,00
Bom	0,65<NSE≤0,75	±10≤PBIAS<±15	0,65<R ² ≤0,75
Satisfatório	0,50<NSE≤0,65	±15≤PBIAS<±25	0,50<R ² ≤0,65
Insatisfatório	NSE≤0,5	PBIAS≥±25	R ² ≤0,50

Fonte: MORIASI et al. (2007).

Nas publicações relativas ao SWAT, podem ser identificados uma série de parâmetros normalmente mais sensíveis para bacias hidrográficas brasileiras, e previamente utilizados na calibração do modelo (Quadro 2).

Quadro 2: Parâmetros mais sensíveis para bacias hidrográficas brasileiras.

Parâmetro	Descrição	Processo	Default
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	Águas subterrâneas	0-500
ALPHA_BF	Constante de recessão de escoamento de base (dias)		0-1
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação		0,02-0,2
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para aquífero profundo	Escoamento lateral	0-1
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento lateral (m)		0
LAT_TIME	Escoamento Lateral (dias)		0
CANMX	Quantidade de água interceptada (mm)	Evapotranspiração	0
ESCO	Fator de compensação de evaporação da água do solo		0
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal (s m ^{-1/3})		0,01-0,1
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm h ⁻¹)	Escoamento superficial e tempo de concentração	0,01-500
CN2	Curva número inicial para condição de umidade do solo		55-89
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm h ⁻¹)		0,1-0,14
SOL_k1	Condutividade hidráulica do solo (mm h ⁻¹)		40-120

3.5 Influência do uso da terra nas vazões dos cursos d'água

Diferentes pesquisas vêm sendo publicadas ressaltando a influência do uso da terra no comportamento do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. Utilizando modelos de base física como o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), Anache (2017) estudou as influências no uso da terra (cerrado sensu stricto, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto) nos componentes do balanço hídrico em área de cerrado. Segundo o autor, as alterações no uso da terra podem alterar significativamente os componentes do ciclo hidrológico, em que destaca a diminuição da evapotranspiração e o aumento do escoamento superficial com a substituição da vegetação nativa do Cerrado sensu stricto por culturas agrícolas.

Uma revisão consolidada sobre os processos hidrológicos e os impactos antrópicos em bacias hidrográficas mostrou, que a ação do homem sobre o uso da terra pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres como a redução ou aumento da vazão média, máxima e mínima de uma bacia hidrográfica e alteração da qualidade da água. No Quadro 3 são apresentados os principais impactos no escoamento em relação às mudanças de uso e ocupação da terra (TUCCI, 2002).

Quadro 3: Principais impactos no escoamento com relação às mudanças de uso e ocupação da terra.

Classificação	Tipo	Principais impactos sobre o escoamento
Mudança de superfície	Desmatamento	Aumento da vazão média, aumento ou diminuição da vazão mínima
	Reflorestamento	Redução do escoamento médio, capacidade erosiva
O uso da superfície	Urbanização	Redução da infiltração no solo, aumentando o escoamento superficial, reduzindo o escoamento subterrâneo, redução da evapotranspiração. Aumento das vazões máximas e na produção de sedimentos, e a deterioração da qualidade da água
	Reflorestamento para exploração sistemática	Redução do escoamento médio, impacto da construção de estradas e a capacidade erosiva gerada pela superfície desprotegida após a extração
	Culturas agrícolas de subsistência e permanentes	Intensidade pequena ou intermediária
	Culturas anuais	Intensidade alta, pois prevê a preparação do solo (aragem) antes do período chuvoso. O plantio sem nenhum cuidado tende a aumentar a erosão e o escoamento
	Manual	Menor impacto, porém, dispendioso
Método de alteração	Equipamentos	Compactação do solo, reduzindo a infiltração de água no solo

Fonte: TUCCI, 2002.

A água de chuva que infiltra no solo, diferente da que compõe o escoamento superficial, chega de forma bastante lenta até o corpo d'água principal de uma bacia hidrográfica. Em situações de estiagem, um aquífero freático transfere volume de água para o rio, mantendo-o com um volume mínimo de água, chamado de fluxo de base, que pode diminuir conforme rebaixa-se o nível d'água do aquífero freático (TUCCI, 2009). Assim, os diversos tipos de uso da terra em uma bacia hidrográfica interferem no ciclo hidrológico, pois diferentes atividades humanas têm potencial para aumentar ou diminuir o quantitativo de escoamento superficial.

Utilizando o SWAT, diversos estudos vêm sendo publicados relacionando o uso da terra ao comportamento hidrológico e ao transporte de sedimentos em bacias hidrográficas. A seguir, várias validações tecnológicas com resultados positivos de uso do SWAT.

Baldissera (2005), foi o primeiro estudo a ser realizado no Brasil para modelagem de vazão em uma bacia hidrográfica de grande escala. Este, avaliou a aplicabilidade do modelo

SWAT para simulação de vazões líquidas mensais da Bacia do Rio Cuiabá – MT, que possui uma área de aproximadamente 900.000 km². Para tanto, o modelo foi calibrado, com base em dados observados de cinco postos fluviométricos, e avaliado com base no coeficiente de NSE, R² e desvio de regressão, para o período de 1994 a 1998. Na modelagem, o SWAT demonstrou uma aplicabilidade satisfatória para as condições heterogêneas da região de análise, com potencial para grandes bacias.

Silva *et al.* (2011), estimou a perda de solo na bacia hidrográfica do rio Colônia, na Bahia, durante o período de vinte e sete anos, utilizando o software Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Para tal, procedeu à digitalização de mapas temáticos, interpretação de fotografias aéreas de 1975; classificação supervisionada de imagens de satélites de 2002 e produção de mapas de uso da terra. O SWAT foi utilizado na obtenção de mapas temáticos digitais por sub-bacia hidrográfica do rio Colônia, quantificação das perdas de solo em cada sub-bacia e nas formas de usos obtidos por conceito teórico, simulando as inclusões de áreas de preservação permanente, bem como mata em toda a superfície das sub-bacias. Estimaram que, entre 1975 e 2002, a média de perda de solo na bacia hidrográfica do rio Colônia foi de 47 t ha⁻¹ ano⁻¹ e em 2002 a estimativa de perda de solo foi de 46,64 t ha⁻¹ ano⁻¹. Na simulação de um cenário teórico de área de preservação permanente (APP) e mata, ocorreu diminuição da média da perda de solo em toda a bacia hidrográfica do rio Colônia de, respectivamente, 9,09 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 20,91 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Correia (2016), simulou seis cenários de uso e ocupação da terra, utilizando o SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu no Espírito Santo, como resultado traz a comprovação da sensibilidade do modelo em relação às alterações de uso da terra na bacia, ressaltando a importância das florestas para manter uma maior regularidade dos cursos de água, e ainda o aumento das vazões mínimas e menores vazões máximas em cenários com mais floresta. De acordo com TUCCI (2009) o conhecimento das vazões mínimas assume um papel importante quando se trata da disponibilidade hídrica, ou seja, é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. As vazões máximas são de extrema importância para dimensionamento das obras hidráulicas e estimativa de cheias.

Passos *et al* 2021, realizaram uma análise do impacto nas vazões de uma bacia hidrográfica de pequena escala no Ribeirão José Pereira, em Itajubá, sul de Minas Gerais, devido a mudanças no uso e ocupação do solo, utilizando o modelo SWAT. Os resultados indicam que o modelo SWAT pode ser utilizado na simulação das componentes hidrológicas de bacias hidrográficas de pequeno porte, e aponta que o manejo agrícola e o reflorestamento da bacia são mais eficientes na diminuição do escoamento superficial do que a recuperação das APPs,

chegando a uma diminuição de aproximadamente 40% nas vazões máximas simuladas. Segundo Tucci (2009) o conhecimento das vazões máximas é de extrema importância para dimensionamento das obras hidráulicas e estimativa de cheias, o conhecimento das vazões mínimas assume um papel importante quando se trata da disponibilidade hídrica, ou seja, é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Castro (2013), avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para a bacia do Alto Rio Jardim, com área aproximada de 105 km², situada na porção sudeste do Distrito Federal, bacia agrícola típica do bioma cerrado, intensamente monitorada. Este apresentou algumas limitações nos resultados obtidos, principalmente na fase de validação do modelo, no entanto, após a calibração, o SWAT demonstrou ser uma ferramenta passível de utilização para a simulação de vazões diárias na bacia estudada.

Rodrigues *et al.* 2015, aplicou o modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na Bacia do Rio Pará, alto São Francisco, em Minas Gerais. Como resultado, reforçam que o tipo de uso e a cobertura vegetal exercem um papel importante como elementos responsáveis nas variações da produção de água. Nas sub-bacias do Rio Itapeçerica, Ribeirão Boa Vista, Médio e Baixo Rio Pará, a cobertura vegetal teve influência de intensidade moderada. Esse grau de influência pode ser atribuído às diferenças pedológicas ao longo da bacia, especialmente nas áreas com presença de Latossolos, pois seu maior grau de desenvolvimento, em relação às demais classes de solo, contribui com a retenção de água no solo. Além disso, há diferenças nas variáveis climáticas, com clima temperado Cwb nas cabeceiras, contribuindo para acentuar o déficit nos valores de vazão nessa região da bacia, e clima tropical Aw e inverno equatorial a jusante, em área de transição morfoclimática. A análise aponta que a magnitude dos fatores é diferenciada em virtude de características locais que podem maximizar ou atenuar os efeitos hidrológicos.

Ferraz (2021), avaliou a eficácia do modelo SWAT para representar o comportamento hidrológico na bacia do Rio Correntina, na região oeste da Bahia. Os coeficientes de desempenho estatístico atestaram a capacidade do modelo para simulações hidrológicas nesta bacia em escala mensal, com KGE, Pbias, NSE e R² apresentando valores de 0,69, 0,57, 0,5% e 0,74 na fase de calibração, e 0,73, -3,95 %, 0,64 e 0,76 na etapa de validação, respectivamente. Além disso, o SWAT também se mostrou adequado para simular as curvas de duração das vazões, caracterizando o modelo como uma boa ferramenta para auxiliar a gestão dos recursos hídricos na bacia em estudo.

Oliveira (2014) realizou um estudo com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do SWAT para a estimação de vazões em uma microbacia experimental (MBE) com área de 2,84 km², no

município de Aracruz, ES. O principal uso da terra na MBE consistia no cultivo de eucalipto. Os índices estatísticos calculados para a calibração e validação do SWAT foram de magnitude suficiente para qualificá-lo como adequado e satisfatório para a simulação das vazões na MBE. Foram simulados cenários hipotéticos de alterações no uso da terra, abrangendo o cultivo do eucalipto (três manejos distintos), além da pastagem e vegetação nativa, para avaliar o comportamento hidrológico da bacia. Realizaram-se análises das vazões médias, das vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno e das vazões mínimas de referência. Todos os cenários evidenciaram a sensibilidade do modelo às alterações da microbacia, sendo o cenário de pastagem o que proporcionou respostas mais significativas no incremento das vazões. Os resultados encontrados indicam que o SWAT é uma importante ferramenta para simular o efeito das mudanças ambientais sobre a hidrologia de bacias hidrográficas.

Com o objetivo avaliar o desempenho do modelo SWAT na predição da vazão na bacia hidrográfica do Rio Preto, compreendida na bacia do Rio Paracatu, que por sua vez, pertence à bacia do São Francisco, abrangendo parte do Distrito Federal e dos Estados de Goiás e Minas Gerais, Silva (2016) realizou simulações com o modelo SWAT, onde variou o Modelo Digital de Elevação (MDE), quantidade de unidade de resposta hidrológica (HRU), quantidade de iterações no processo de calibração, estações climatológicas e fluviométricas. Para as simulações foram utilizadas séries mensais que se estenderam de 1981 a 2000 para o período de calibração e de 2001 a 2010 para a verificação. Este relata que em praticamente todas as simulações o modelo superestimou os picos e apresentou um retardo sistêmico na fase de recessão das vazões. As variáveis do balanço hídrico (precipitação, evapotranspiração, escoamentos superficial e de base) apresentaram resultados coerentes considerando as características físicas da área de estudo (bioma Cerrado), embora, o escoamento superficial tenha sido superestimado e a evapotranspiração tenha sido subestimada em relação à trabalhos semelhantes. A partir dos resultados, concluiu que o modelo SWAT é passível de ser utilizado como ferramenta de auxílio na elaboração de políticas públicas com foco na gestão dos recursos naturais.

Serrão (2018) utilizou o modelo SWAT para simular a vazão, alguns processos hidrológicos e o risco de erosão na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, sudeste do Estado do Pará, bem como sua calibração e validação do modelo para a bacia em estudo. Os resultados demonstraram que, para a análise do risco de erosão para a bacia hidrográfica, as áreas de maior risco foram as regiões de maior altitude, com solos de fácil degradação e com uma dinâmica de uso de solo elevada, sendo estas na jusante da bacia e na porção sul do município de Marabá. Na validação da vazão obtida através do modelo SWAT, obteve-se bom desempenho com os

índices estatísticos aplicados em relação a vazão observada na estação fluviométrica da ANA. Foi validado ainda a evapotranspiração potencial simulada pelo SWAT, a partir de outros dois métodos, Linacre e Turc. Como resultado, observou que os índices estatísticos aplicados a evapotranspiração simulada com SWAT tiveram um bom desempenho. Já na comparação dos métodos, o de Linacre teve um menor desempenho, em relação ao método de Turc. De modo geral, o modelo SWAT teve um bom desempenho em simular vazões, evapotranspiração e outros processos hidrológicos para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas e pode ser uma fundamental ferramenta no monitoramento hidrológico dessa bacia, além de auxiliar os tomadores de decisões em uma boa gestão dos seus recursos.

Fernandes (2015) avaliou a viabilidade do uso do modelo SWAT para vazão e estimativa da produção de sedimento na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Para a modelagem com o SWAT dividiu-se a bacia em seis projetos: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso, Xingó e Foz. A calibração do modelo foi realizada através do SWAT-CUP por meio de uma série histórica de dados, onde o período de 1988 a 1991 foi utilizado para o *warm up* “aquecimento do modelo” e calibrado para o período de 1992 a 2012, totalizando assim 21 anos. O autor concluiu que o SWAT se mostrou um modelo robusto em simular a perda de solo e seu transporte na bacia do São Francisco. Entretanto, existe uma tendência do modelo em superestimar a produção de sedimentos. Os projetos situados após o reservatório de Sobradinho apresentaram melhores resultados estatísticos, indicando que para essa região da bacia o controle de vazão pelo reservatório contribuiu para melhores resultados do modelo. No geral o modelo apresentou bons resultados estatísticos.

Filho (2019) aplicou o modelo SWAT na modelagem hidrológica da bacia do Rio Paraíba do Sul, localizado na região Sudeste do país. Segundo o autor, o SWAT foi capaz de reproduzir com confiabilidade a vazão e a qualidade da água do rio em período mensal compreendido entre 1992 e 2015. A vazão do rio Paraíba do Sul é fortemente controlada por hidrelétricas, também pela transposição para o Rio Guandú, e em algumas sub-bacias a quantidade disponível de água é controlada pelos solos úmidos. Concomitante a modelagem de vazão, foram realizadas também modelagem de sedimentos, nitrogênio e fósforo. O nitrato modelado apresentou uma boa resposta as épocas de chuva e nas épocas de estiagem o modelo tende a subestimar a concentração de NO₃. No período modelado houve um período de seca histórica entre 2013 e 2015 e o SWAT teve sucesso na simulação, se mostrando uma ferramenta confiável.

Santos (2018) utilizou o modelo SWAT para simulação hidrológica na bacia do Rio Apeú, a qual pertence ao conjunto de sub-bacias do Rio Guamá, localizada no nordeste do estado

do Pará, na mesorregião metropolitana de Belém, no período de 2009 a 2017, para a obtenção de informações sobre a dinâmica do ciclo hidrológico, a partir das variáveis climáticas, tipo e uso da terra. Como resultado concluiu que o modelo SWAT pode auxiliar na geração de informações para um melhor planejamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Dantas (2015) utilizou o SWAT com o objetivo de estimar a produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá, localizada na região semiárida do Estado da Paraíba. Neste trabalho foram utilizados dados de precipitação, temperatura e umidade para o período de 1970 a 1993, além de mapas dos tipos de solos, uso da terra e modelo digital de elevação. Valores simulados pelo modelo SWAT foram comparados com dados de vazão medidos e de produção de sedimentos estimados. O modelo foi calibrado e validado usando dados mensais de vazão para o posto fluviométrico Poço de Pedras. Os resultados mostram um bom ajuste, com vazão média observada de $6,86 \text{ m}^3/\text{s}$ e vazão média simulada de $7,73 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a produção de sedimentos para todo o período de $2,5 \text{ t/ha/ano}$.

Dias (2017) realizou um estudo a fim de simular a vazão na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas, localizado na bacia do rio Grande no estado de Minas Gerais. A série de dados meteorológicos e hidrológicos incluída no estudo correspondeu ao período de 01/01/1998 à 31/12/2013. No desenvolvimento do modelo foram adotadas as etapas: (1) parametrização dos dados de entrada; (2) configuração do modelo; (3) aquecimento e simulação; (4) análise de sensibilidade; (5) calibração, validação e análise dos resultados. Os resultados encontrados apresentam precisão razoável em relação à literatura, estando dentro de intervalos considerados aceitáveis, caracterizando o modelo como adequado para simular vazões ao reservatório, se consideradas as incertezas de predição. A construção de modelos a partir do SWAT permite a definição de melhores práticas de gerenciamento de recursos hídricos e de reservatórios hidrelétricos.

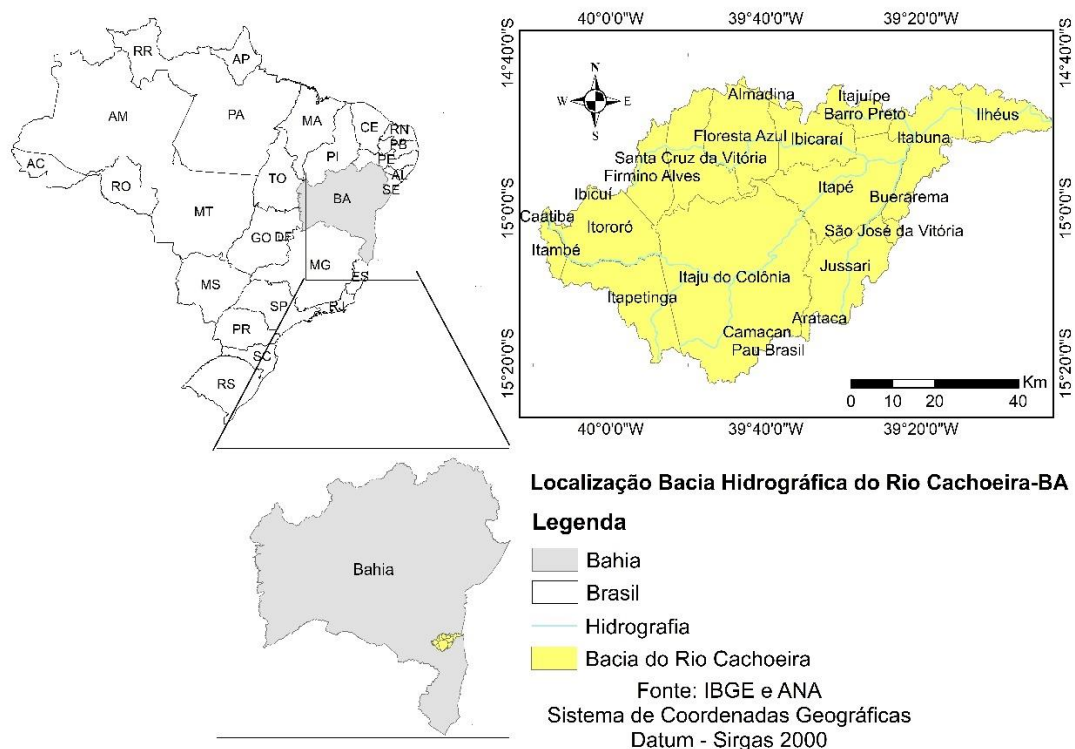
4 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir são apresentados o material e métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Inicialmente é apresentada uma caracterização da área de estudo, em seguida, são apresentados os dados necessários e utilizados para Análise do Uso da Terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e, por fim, são apresentadas as etapas de execução do processo de modelagem pelo modelo SWAT, incluindo as fases de delineamento da bacia hidrográfica, definição das unidades de respostas hidrológicas, a coleta de parâmetros e dados meteorológicos e modelagem inicial.

4.1 Caracterização e localização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira situa-se no Sul da Bahia, entre as coordenadas $14^{\circ}42'/15^{\circ}20'S$ e $39^{\circ}01'/40^{\circ}09'W$ (Figura 1). Com área de drenagem de cerca de 4600 km^2 , abrangendo treze municípios, entre eles Itabuna e Ilhéus (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA, 2017). Nestes municípios estima-se uma população de 561,5 mil pessoas em 2019, concentrando-se majoritariamente nos municípios de Itabuna, com 38% e em Ilhéus, 29% (IBGE, 2022).

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira.



Fonte: Autor.

É uma das bacias integrantes da Região de Planejamento e Gestão das Águas VII – Leste (RPGA Leste) e encontra-se limitada, ao Norte, pelas bacias do rio Gongoji e Almada; ao Sul, pelas bacias dos rios Pardo, Una e São Pedro; a Oeste, pela bacia do rio Pardo; e a Leste pelo Oceano Atlântico (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA, 2017).

A bacia origina-se nas nascentes do rio Colônia, numa altitude de 800 m, na Serra da Ouricana (município de Itororó) e atinge o seu patamar mais baixo na superfície litorânea do município de Ilhéus. O rio Colônia, após estender-se por 100 km, margeia o os municípios de Itororó, Itapetinga e Itajú do Colônia, tem sua confluência com o rio Salgado, no município de Itapé, passando então a receber o nome de rio Cachoeira. O rio Salgado tem suas nascentes no município de Firmino Alves e possui um curso de 64 km pelos municípios de Santa Cruz da Vitória, Floresta Azul, Ibicarai e Itapé, onde desemboca no rio Colônia. O rio Cachoeira, após percorrer 50 km nos municípios de Itapé, Itabuna e Ilhéus, tem a sua foz no local conhecido como Coroa Grande (município de Ilhéus), onde confunde suas águas com a dos rios Santana e Fundão (NACIF, 2000).

Segundo a classificação de Koppen (1948), a Bacia Hidrográfica do rio Cachoeira apresenta dois tipos climáticos definidos pelos valores de pluviosidade anual: Clima Tropical de Floresta (Af) em seu baixo e médio curso, com valores pluviométricos anuais em torno de 1900 mm; Clima tropical Sub-úmido (Aw) com valores em torno de 900 mm durante o ano.

O relevo é o principal determinante das variações pluviométricas. Na bacia do rio Cachoeira, a elevação gradativa do terreno, quase em forma de degraus, no sentido leste-oeste, forja um alinhamento de cristas, que se constitui numa barreira orográfica em relação à unidade geomorfológica Depressão Itabuna-Itapetinga, favorecendo, o aparecimento de diversas zonas climáticas (NACIF, 2000).

Assim, as precipitações atingem valores de 2.000 mm anuais no litoral da bacia (Ilhéus), decrescendo até atingir valores de 800 mm nos municípios de Itapetinga e Itaju do Colônia. A temperatura média anual é de 23,3°C em Ilhéus, 22,7°C em Jussari e 23,6 °C em Itapetinga (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA, 2017).

Os tipos de solos predominantes na bacia em estudo, bem como o uso da terra na região, serão tratados de forma mais detalhada adiante.

4.2 Análise do Uso da Terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

Para a análise da dinâmica do uso e cobertura da terra na BHRC no período de 1985 a 2020, foram utilizadas imagens da coleção 6 do Mapbiomas. Lançado em 2015, o Projeto de

Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. O processamento de imagens MapBiomas é baseado na tecnologia do Google, que inclui processamento de imagem em computação em nuvem, programação com Javascript e *Python* via *Google Earth Engine* e armazenamento de dados usando *Google Cloud Storage*. A acurácia geral da coleção 6.0 foi de 90,8%. A análise de acurácia é a principal forma de avaliação da qualidade do mapeamento realizado, além de dizer qual a taxa de acerto geral, a análise de acurácia também revela estimativas das taxas de acerto e de erro para cada classe mapeada. Para utilização das imagens disponibilizadas pelo Mapbiomas, realizou-se a extração das informações em ambiente SIG para área da bacia e foram atribuídas às classes das legendas a cada tipo de uso da terra. Foram constatadas nove classes de uso e cobertura da terra definidas pelo MapBiomas para área de estudo.

Para análise do uso da terra para a série temporal escolhida neste estudo, foi utilizado o *r.report* no GRASS do QGIS, sendo inseridos os mapas dos anos 1985 e 2020. O *r.report* permite ao usuário configurar uma série de parâmetros de relatório a serem aplicados a um mapa raster e cria um relatório, sendo permitido ao usuário selecionar as unidades de medida específicas nas quais as estatísticas serão relatadas. Para este estudo, foi calculada a área de cada classe referente ao uso da terra para os anos de estudo, utilizando a unidade de medida em ha.

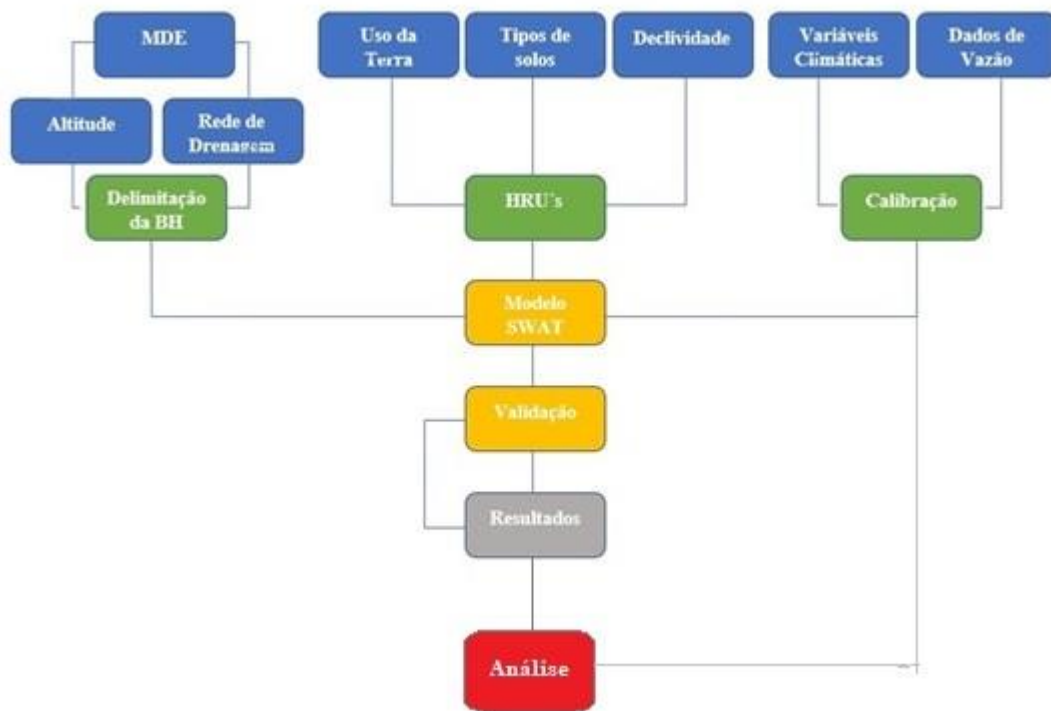
A fim de melhor visualização das alterações ocorridas no uso da terra na BHRC para o período em estudo, foi utilizado *Plugin* de Classificação Semiautomática (*SCP- Plugin*), por meio do software QGIS. O *Plugin* de Classificação Semiautomática (*SCP*) permite a classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto, fornecendo ferramentas para download, pré-processamento e pós-processamento de imagens.

4.3 Etapas de execução no SWAT

Inicialmente é indispensável saber quais dados serão necessários para a aplicação do modelo e organizar uma base com os dados que serão utilizados. As informações são inseridas no SWAT por meio de tabelas contendo as características físicas referentes à bacia e os dados espaciais por intermédio da interface ArcSWAT. O modelo SWAT por ter suas aplicações em ambiente SIG tem interface para Windows, atuando como ferramenta do *software* ArcGis *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Diferentes versões do ArcSWAT são disponibilizadas gratuitamente compatibilizando-as com as versões do ArcGis adotadas pelo usuário. Para esta pesquisa, utilizou-se o ArcGis Desktop 10.5. O primeiro passo foi a entrada dos dados (MDE, Uso da terra e tipos de solo, dentro do ambiente SIG no ArcGis.

Posteriormente utilizando as ferramentas do ArcToolbox, através da extensão *Data Management Tools – Projections e Transformations*, colocou-se todas os produtos no mesmo sistema de informação e por fim foram inseridos os parâmetros e dados meteorológicos. O modelo SWAT pode ser sintetizado através do fluxograma na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma das etapas do modelo SWAT.



Fonte: autor.

4.3.1 Delineamento da Bacia Hidrográfica

Após a criação de um novo projeto na extensão ArcSWAT do programa ArcGIS 10.5, iniciou-se a delimitação automática da bacia hidrográfica clicando na opção “*watershed delineator*”. Inicialmente, deve-se incluir na modelagem o modelo digital de elevação (MDE) da área que compreende a bacia hidrográfica. O MDE utilizado nesta pesquisa foi o NASADEM, com resolução espacial de 30 m, adquirido no site Earthdata da NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/>). O NASADEM é um reprocessamento dos dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para melhorar a precisão da altimetria e preencher os dados de elevação que estavam ausentes. Os dados foram aprimorados com o uso de algoritmos e dados que não estavam disponíveis no momento do lançamento dos dados da SRTM original. Os dados ausentes no SRTM foram refinados e completos com dados de

elevação do ASTER GDEM. Para inserção do MDE no SWAT, foi necessário definir a referência espacial (WGS 84 / UTM, zona 24S).

Baseado no MDE são calculadas pelo SWAT as direções de fluxo e acumulação da água. Ainda, podem ser gerados automaticamente, por meio do sistema, os canais e exutórios das sub-bacias. A etapa seguinte consiste na definição do exutório principal da bacia hidrográfica, procedendo então, o seu delineamento. O processo de delimitação de bacia hidrográfica por meio da interface ArcSWAT há algumas opções para o usuário. Na primeira, denominada “máscara”, é possível restringir a área máxima na qual a ferramenta buscará uma bacia a partir do MDE. A segunda, denominada de “*burn in*”, à possível a inserção de rede de drenagem, indicando linhas para formação da rede de drenagem. Só então é estabelecida a área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal (menores valores implicam em maior quantidade de sub-bacias).

A delimitação da Bacia do Rio Cachoeira, assim como das suas sub-bacias, foi realizada utilizando o MDE, e sua delimitação foi automatizada, sem a utilização de máscara ou determinação de rede de drenagem.

4.3.2 Definição das Unidades de Resposta Hidrológicas

Após o processo de delimitação da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira, os mapas de uso e cobertura da terra e tipos de solos foram inseridos e relacionados aos seus respectivos itens existentes no banco de dados (original do SWAT ou alterado pelo usuário), bem como foram definidos os intervalos de declividade, para que as HRUs fossem obtidas.

O SWAT realiza a sobreposição dos mapas de uso e cobertura da terra, de dados pedológicos e das classes de declividade da bacia, o que permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).

O mapa de uso da terra para o ano 2020 foi inserido no SWAT, e foram associadas às categorias de usos do banco de dados do SWAT, visando garantir o maior nível de semelhança conforme apresentado na Quadro 4.

Quadro 4: Classes de usos da terra na bacia BHRC e associação com o banco de dados do SWAT.

Classes de Uso da Terra na BHRC	Classificação SWAT	SIGLA SWAT
Formação Florestal	Floresta Verde	FRSE
Formação Savânica	Floresta Mista	FRST
Silvicultura	Eucalipto	EUCA
Campo Alagado e área Pantanosa	Zonas úmidas mistas	WETL
Pastagem	Pasto	PAST
Mosaico de Agricultura e Pastagem	Terreno Agrícola Genérico	AGRL
Área Urbana	Urbano	URBN
Outras áreas não vegetadas	Terras Agrícolas de Cultivo próximo	AGRC
Rio, Lago e Oceano	Água	WATR

Fonte: Autor.

Foi adotada a classe AGRC para as regiões de solo exposto por serem áreas de agricultura com fases iniciais de cultivo (ou em fase de preparação para estes) e regiões desprovidas de vegetação conforme Sartori (2019).

Os mapas de tipo de solo foram obtidos do banco de dados aberto do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o nível de observação dos dados é compatível com a escala 1:5000.000. Foram encontradas as seguintes classes de solos para a bacia hidrográfica do rio Cachoeira: Chernossolo Argilúvico Órtico, Luvisolo Crômico Pálico, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico.

Para uma correta modelagem, deve-se fazer a correspondência entre as classes de solos da área em estudo e as classes de solos presentes no banco de dados do SWAT. Caso essa relação não seja estabelecida, os seguintes dados pedológicos devem ser inseridos no modelo: grupo hidrológico do solo (HYDGRP), profundidade máxima de enraizamento do perfil do solo (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente úmida (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e porcentagem de argila, silte e areia.

A edição/inclusão de dados referentes a uso e ocupação da terra e tipos de solos no banco de dados do modelo SWAT pode ser feita previamente, antes da modelagem da bacia, diretamente no banco de dados a ser utilizado (via Microsoft Access, por exemplo), como também pode ser feito posteriormente por meio da ferramenta Edit SWAT Input, do ArcSWAT.

Com base nos trabalhos de Baldissera (2005) e Silva e Medeiros (2014), para área em estudo, os seguintes dados pedológicos foram utilizados para as classes de solos (Tabela 2).

Tabela 2: Dados pedológicos inseridos no modelo SWAT.

Parâmetros	Argissolo	Chernossolo	Latossolo	Luvissole		
Camadas	5	2	5	3		
Grupo Hidrológico	B	D	A	D		
SOL_ZMX	1500	2000	3500	1500		
ANION_EXCL	0,47	0,48	0,50	-		
C1	SOL_Z	300	700	300	40	
	SOL_BD	1,40	1,37	1,20	1,65	
	SOL_AWC	0,14	0,1	0,25	0,175	
	SOL_K	40	120	100	67	
	SOL_CBN	1,40	1,03	0,95	1,36	
	CLAY	19,40	15	42	14	
	SILT	9,50	25,50	26	33	
	SAND	71,70	59,50	32	53	
	ROCK	-	-	-	-	
	SOIL_ALB	0,15	0,1	0,15	0,17	
	USLE_K	0,05	0,12	0,13	0,15061	
	C2	SOL_Z	600	2000	550	180
		SOL_BD	1,40	1,49	1,5	1,65
SOL_AWC		0,18	0,09	0,20	0,15	
SOL_K		30	30	90	57	
SOL_CBN		0,60	0,60	0,35	0,63	
CLAY		34	50,1	40	21	
SILT		35,70	18,80	28,70	26	
SAND		30,30	31,10	31,30	53	
ROCK		-	-	-	-	
USLE_K		0,16	0,15	0,12	0,16345	
C3	SOL_Z	800	-	900	500	
	SOL_BD	1,40	-	1,70	1,65	
	SOL_AWC	0,18	-	0,20	0,175	
	SOL_K	20	-	52	27	
	SOL_CBN	0,40	-	0,40	0,35	
	CLAY	27	-	28,40	40	
	SILT	39,30	-	37,7	23	
	SAND	33,70	-	33,9	37	
	ROCK	-	-	-	-	
	USLE_K	0,11	-	0,14	0,1475	
C4	SOL_Z	1100	-	1250	-	
	SOL_BD	1,80	-	1,50	-	
	SOL_AWC	0,14	-	0,20	-	
	SOL_K	12,50	-	40	-	
	SOL_CBN	0,40	-	0,35	-	
	CLAY	26,80	-	29,80	-	
	SILT	43,70	-	13,50	-	
	SAND	29,50	-	56,70	-	
	ROCK	-	-	-	-	
	USLE_K	0,18	-	0,14	-	
C5	SOL_Z	1500	-	3500	-	
	SOL_BD	1,40	-	1,50	-	
	SOL_AWC	0,14	-	0,10	-	
	SOL_K	12	-	15	-	
	SOL_CBN	0,30	-	0,20	-	

	Parâmetros	Argissolo	Chernossolo	Latossolo	Luvissole
C5	CLAY	23,80	-	27	-
	SILT	29,8	-	39,30	-
	SAND	46,40	-	33,70	-
	ROCK	-	-	-	-
	SOIL_ALB	0,15	-	0,13	-
	USLE_K	0,16	-	0,12	-

Ainda durante as definições das HRU's, é possível escolher entre subdividi-las em HRU's dominantes da área de estudo ou HRU's múltiplas onde:

HRU dominante: Para cada sub-bacia a combinação uso da terra, tipo de solo e declividade que apresentarem maior extensão será considerado para toda a área da subbacia e assim as demais combinações não são consideradas.

HRUs Múltiplas: É criado várias combinações de uso, tipo do solo e declividade, de acordo com a sensibilidade do usuário. Ou seja, o modelo permite que o operador manipule quais classes de cada variável é mais sensível para sua área de estudo.

A opção de múltiplas HRUs foi escolhida para esse estudo, pois segundo Serrão (2018), dessa forma evita-se a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos da terra, tipos de solos e declividade para as sub-bacias. Além disso foram utilizados três intervalos de declividade para gerar o produto final de declive, sendo que o limite da última classe é automaticamente definido pelo SWAT (utilizando o valor default máximo de 9999).

4.3.3 Parâmetros e dados meteorológicos

O último passo para execução do modelo SWAT é a importação dos dados diários de precipitação, temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento. Caso haja indisponibilidade de dados diários (série completa) de algumas dessas variáveis climáticas, elas podem ser simuladas pelo gerador climático do modelo SWAT (WXGEN), com base nas médias mensais observadas (SANTOS, 2010).

Foram utilizados os dados de 3 estações pluviométricas e 2 estações fluviométricas (Tabela 3) disponibilizados pela ANA no HIDROWEB v3.2.6s, sendo estes organizados em planilhas. Os dados de clima, para a área de estudo, foram obtidos do Power Data Access Viewer, estes consistiram em valores diários de temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar para um período de 25 anos (01/01/1985 a 31/12/2010). Para preencher as falhas presentes na série histórica de dados meteorológicos, criar os arquivos meteorológicos ArcSWAT.txt de entrada e calcular as estatísticas WGEN, foi utilizada a interface SWAT Weather Database. Esta interface simula a série de dados climáticos e preenche lacunas com base nos dados registrados. Foram calculadas algumas estatísticas da

série histórica dos dados observados como TMPMX: Temperatura máxima (°C); TMPMN: Temperatura mínima (°C); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C); TMPSTMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C); PCPMM: Precipitação média (mm/dia); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação diária (mm/dia); PCPSKW: Coeficiente de inclinação para precipitação diária; PR_W1_: Probabilidade de dia chuvoso após dia seco; PR_W2_: Probabilidade de dia chuvoso após dia chuvoso; PCPD: Número médio de dias chuvosos (dia); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 h (mm); SOLARAV: Radiação solar média (MJ/m²/d); DEWPT: Temperatura média do ponto de orvalho (°C); WNDVAV: Velocidade média do vento (m/s); e RAIN_YRS: Número de anos de dados usados para determinar valores para RAIN_HHMX (ano).

Tabela 3: Descrição das estações utilizadas.

Código	Nome	Tipo	Responsável	Latitude	Longitude
53157000	Floresta Azul	Pluviométrica	INEMA	-14,9047	-39,7186
53163000	Itaju do Colônia	Pluviométrica	INEMA	-15,1444	-39,7233
53125000	Fazenda Manaus	Pluviométrica	ANA	-15,1531	-39,7692
53130000	Itaju do Colônia	Fluviométrica	ANA	-15,1444	-39,7225
53157000	Floresta Azul	Fluviométrica	INEMA	-14,9047	-39,7186

4.3.4 Modelagem Inicial

Após as etapas aqui apresentadas, o modelo pode ser executado. É importante a utilização de um período de três anos para o aquecimento do modelo, a fim de dar provimento e estabilidade às condições iniciais do modelo para a bacia. Assim foram inseridos os dados climatológicos referente ao período 1985 a 2010, sendo os resultados apresentados a partir do ano 1988.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Uso da Terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

A expansão da atividade cacaeira na área da Bacia hidrográfica do rio Cachoeira ocorreu por volta dos anos 70, no entanto, entre o final dos anos 80 e início dos anos 90, a região cacaeira foi atingida por uma forte crise econômica. Algumas plantações de cacau abandonadas foram regeneradas à vegetação nativa ao longo da bacia, entretanto o maior efeito da crise foi o crescimento da pecuária. Utilizando o r.report, foi possível observar as seguintes mudanças no uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, para o período em estudo (1985 a 2020). Para o ano 1985 a área de Formação Florestal correspondia a 134.173,41 ha da bacia, em 2020

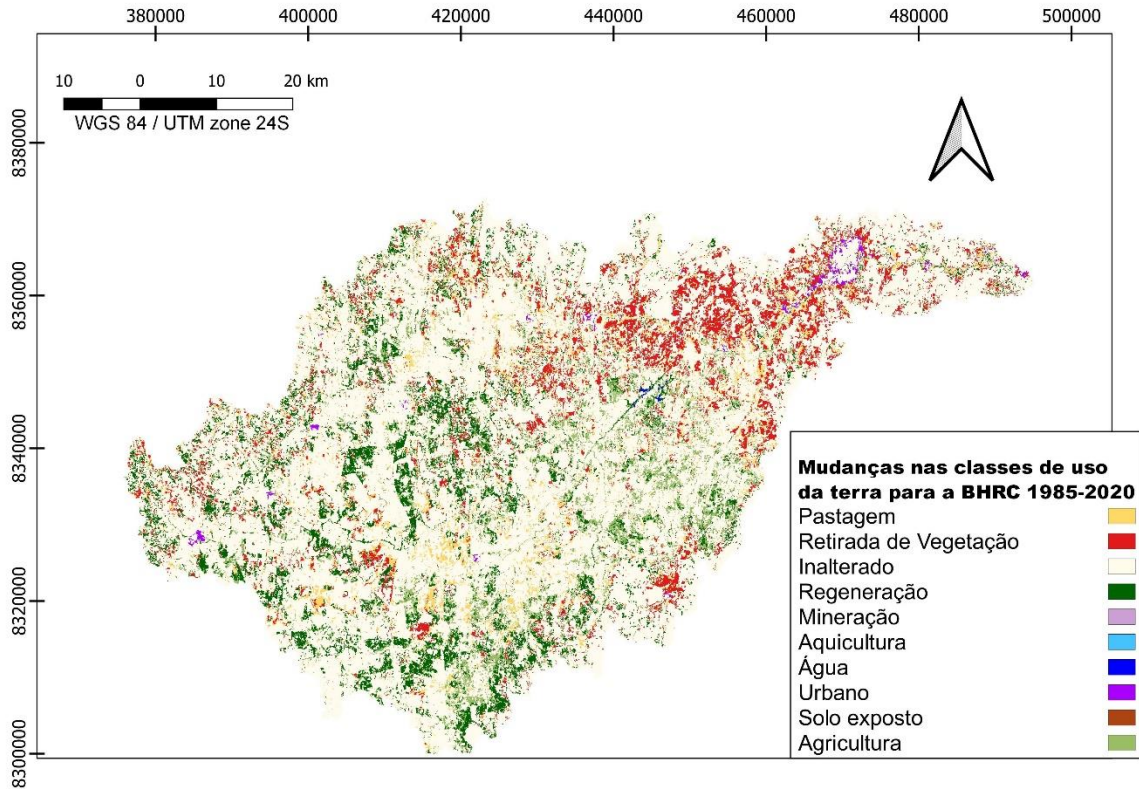
uma área de 120.024,66 ha, uma diminuição de 10,55% em 35 anos. As áreas urbanizadas apresentaram um aumento de 75,56 % para o mesmo período. A classe “outras áreas não vegetadas” apresentava uma área de 12,27 ha e 36,33 ha, para os anos de 1985 e 2020, respectivamente. As áreas de pastagem apresentaram uma diminuição de 2,95 % para o mesmo período. As classes Formação Savânica, Campo Alagado e área Pantanosa merecem destaque, para o período em estudo, houve um aumento de 244,88% e 314,29% respectivamente. As classes Mineração, Silvicultura, Aquicultura não foram identificadas em 1985 (Tabela 4).

Tabela 4: Classes de uso da terra para a BHRC em 1985 e 2020, com suas respectivas áreas.

Classe	Área em 1985 (ha)	Área em 2020 (ha)	Variação (%)
Formação Florestal	134.173,41	120.024,66	10,55
Formação Savânica	7016,19	24.197,13	244,88
Mangue	321,18	342,89	6,54
Silvicultura	-	7,08	-
Campo Alagado e área Pantanosa	6,74	28,70	314,29
Pastagem	229.395,40	222.634,91	2,95
Mosaico de Agricultura e Pastagem	54.488,59	57.158,40	4,98
Área Urbanizada	2087,66	3664,61	75,56
Outras áreas não vegetadas	12,27	36,33	196,09
Mineração	-	2,59	-
Aquicultura	-	1,04	-
Rio, lago e oceano	1040,51	443,44	57,40
Café	1,04	1,21	16,35

A formação savânica encontra-se entre as diversas fisionomias do cerrado. Essas são compostas pelo Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo, Cerrado Rupestre, Vereda, Parque Cerrado e Palmeiral. O termo “savânica” agrupa locais com árvores e arbustos, espalhados sem formação de dossel contínuo sobre o estrato graminoso (SANO, 2008). Na Figura 3, é possível visualizar as mudanças nas classes indicadas na Tabela 4.

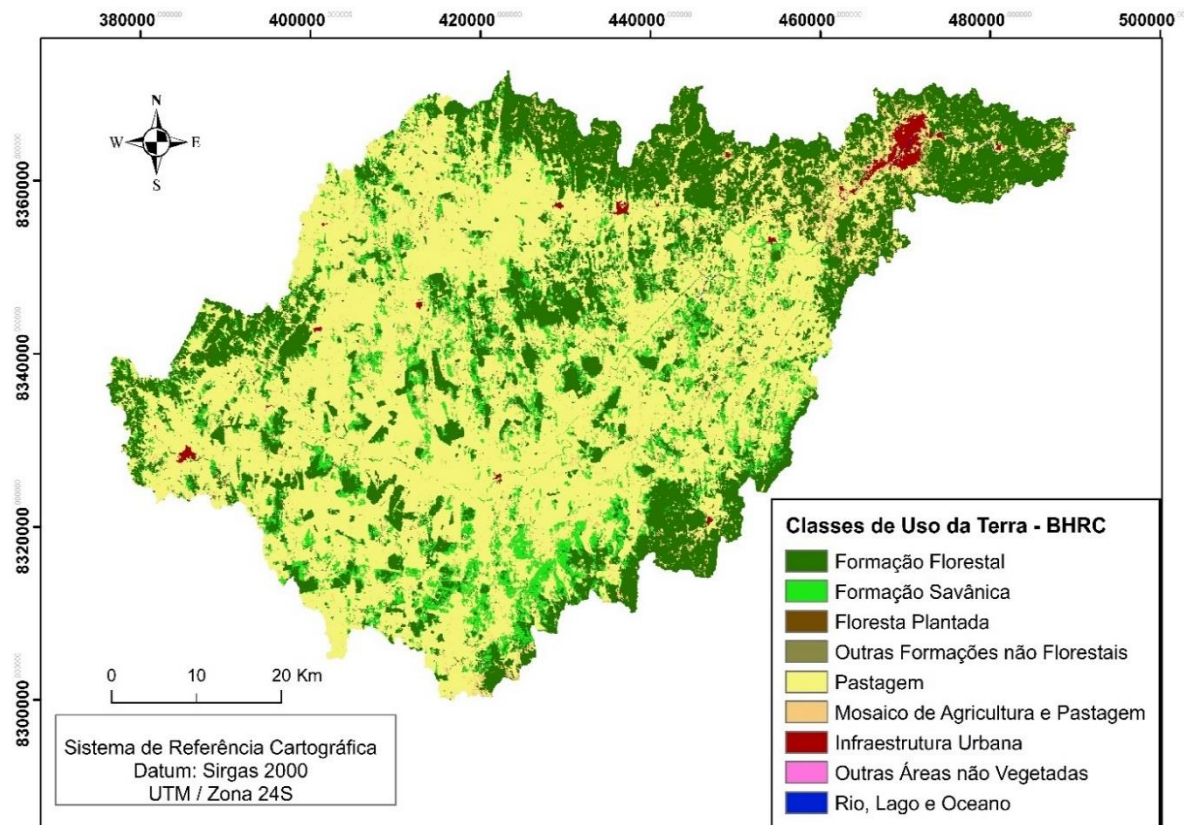
Figura 3: Alterações nas classes de uso da terra para a BHRC no período 1985-2020.



Fonte: Autor.

As classes indicadas na Figura 4, refere-se a áreas que foram alteradas no período indicado. Em vermelho é possível visualizar os locais onde ocorreram retiradas da vegetação, seja formação denominada savânica ou florestal, em amarelo áreas as quais foram transformadas em pastagem. Destaca-se também, representada pela cor rosa as áreas urbanizadas, que tiveram um aumento expressivo no período e as áreas nas quais ocorreram a regeneração da vegetação seja formação savânica ou formação florestal. Os municípios que compõe o alto (Itapetinga e Itororó) e médio curso (Itajú do Colônia e Firmino Alves) da Bacia do rio Colônia tem pautado seu escopo econômico em atividades pecuaristas na última década, o que explica os índices de desmatamento elevados nesta área da bacia. Na figura 5, é possível observar as classes de uso da terra para a bacia no ano de 2020.

Figura 4: Classes de uso da terra na BHRC em 2020.



Fonte: Adaptado do Mapbiomas.

De acordo com o mapa de uso da terra, pode-se observar que, em 2020, 53,65% da bacia encontrava-se composta por áreas de pastagem, seguido de 28,56% de formação florestal.

O compartimento norte da área em estudo, inserido nos limites da Bacia do Rio Salgado, detém grande parte das áreas vegetadas mapeadas. São basicamente zonas de serras que abrigam diversos tributários do rio Salgado, nos municípios de Floresta Azul, Ibicarai e Barro Preto. Segundo Silva (2016), do ponto de vista Hidrológico, a presença de vegetação auxilia na retenção de água no sistema hidrológico no nível de fluxo de base.

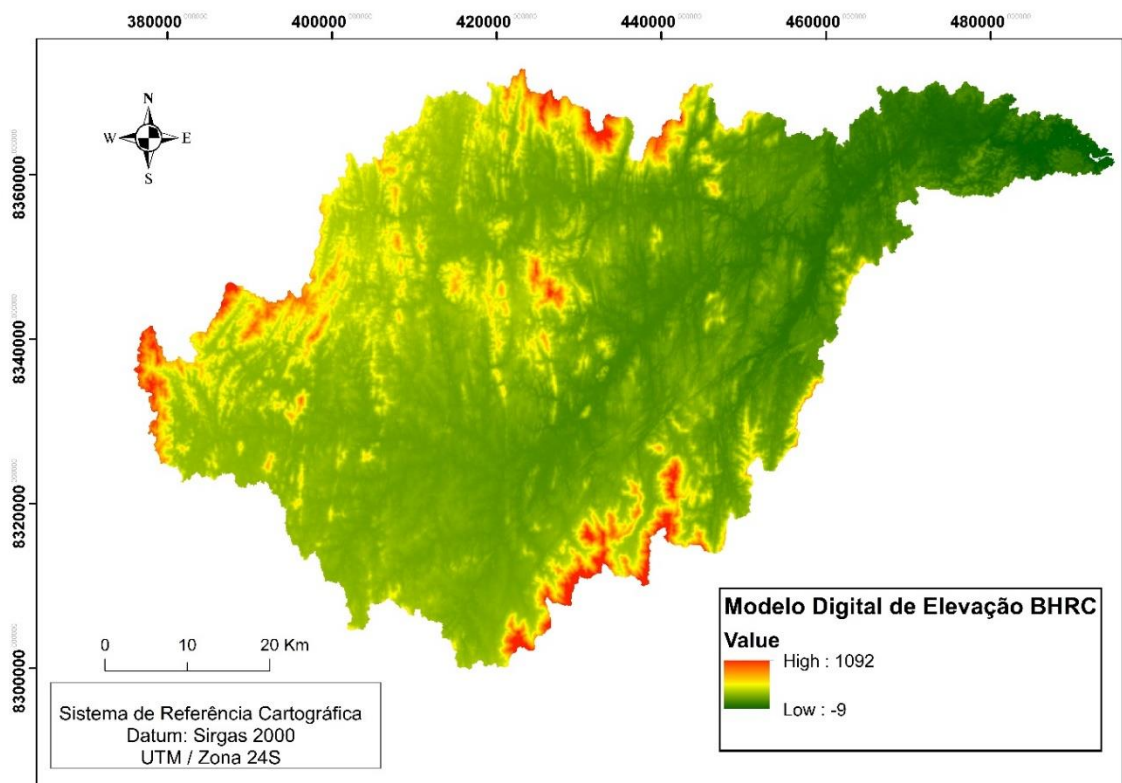
5.2 Processamento de dados de entrada no SWAT

5.2.1 Delineamento da Bacia Hidrográfica

O modelo SWAT tendo como base o MDE da área em estudo faz uma delimitação da área de drenagem da bacia, tendo em vista que uma bacia hidrográfica é uma área cercada com topografia elevada onde a drenagem tende a escoar para o ponto mais baixo. Walker e Willgoose (1999), Alves Sobrinho *et al.* (2010) descrevem que a delimitação automática da rede de drenagem obtida a partir de MDE apresenta precisão compatível àquela baseada em cartas topográficas, de modo que a rede de drenagem pode ser determinada com confiança elevada.

Analisando o Modelo Digital de Elevação para a bacia (Figura 5), é perceptível que a região ao sul da bacia e a porção central da bacia, são as áreas de maior elevação com máximo de 1092m. São predominantes as áreas de planície na porção leste da bacia, rumo ao município de Ilhéus. A BHRC apresenta elevação mínima de 2m e máxima de 1092m, sendo a elevação média 249,4m.

Figura 5: Modelo Digital de Elevação BHRC.



Fonte: Autor.

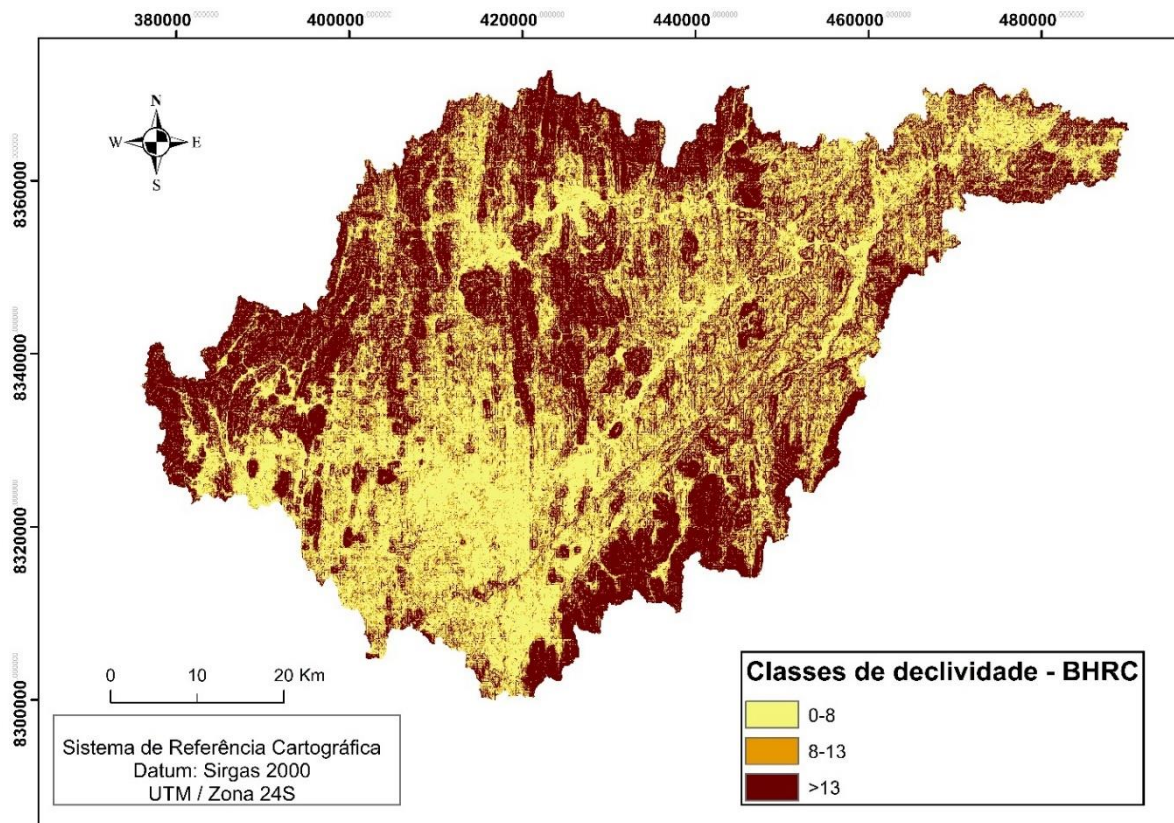
Segundo Silva (2016), a composição geomorfológica da bacia constitui-se basicamente em quatro classes: a) morros, colinas e serras, no alto e médio curso; b) vale encaixado do rio Cachoeira, no baixo curso, entre o distrito do Salobrinho e Ilhéus.

Nas áreas mais elevadas da bacia predomina o clima úmido, com a presença de argissolos, e cobertura vegetal de Mata Atlântica remanescente, o que permite uma maior produção de água quando comparada a outras porções da bacia hidrográfica em que predominam sistemas agropecuários. A presença da cobertura vegetal de Mata Atlântica no alto curso da bacia hidrográfica congrega as principais áreas de nascentes das duas maiores sub-bacias da área, a do rio Colônia (drenagem oeste>leste) e Salgado (drenagem norte>leste). As serras do Limoeiro e Almadina ao norte, e a Serra das Lontras ao sul são os principais complexos orográficos da Bacia do rio Cachoeira (SILVA, 2016); (SILVA; AMORIM; REGO, 2018).

Os cenários do meio físico do baixo curso da bacia hidrográfica são compostos por mares de morro e planícies de acumulação. Ocorrem em toda parte central da bacia do rio Cachoeira, denotando o caminho hidrográfico dos rios principais. Essa é a porção da bacia que detém os maiores níveis de precipitação ao longo do ano, cujas isolinhas definem os valores entre 2.220 e 2.300 mm. Nessa zona, o rio Cachoeira já apresenta um leito maior com largura média de 55 metros, até seu exutório. No médio curso, o processo de dissolução dos minerais é responsável pelos elevados índices de salinidade (altas concentrações de Na⁺) das águas superficiais, sendo inclusive atribuída a essa porção do médio curso o nome de rios salgados (SILVA; AMORIM; REGO, 2018).

Quanto a declividade, segundo Silva (2016) uma das características dos Rios Colônia e Cachoeira é a diferença acentuada de declividade ao longo da bacia. Da nascente do Rio Colônia até os primeiros 20 km, a declividade é acentuada. Diante destas características, a velocidade da água nos primeiros 20 km do Rio Colônia é bastante elevada, com alto poder erosivo e de transporte de sedimentos. Da confluência com o Rio do Meio até a confluência com o Ribeirão Água Preta, a declividade do Rio Colônia é muito baixa propiciando a ocorrência de altas lâminas de água com baixa velocidade e grande potencial para deposição de sedimentos. Entre as confluências com o Ribeirão Água Preta e o Rio Salgado a declividade aumenta, voltando a decrescer acentuadamente até a foz. A aceleração das águas no trecho entre o Ribeirão Água Preta e o Rio Salgado, aliada às águas do Rio Salgado, quando encontram a planície do trecho final, contribuem para formar uma zona de inundação maior capaz de acomodar as grandes vazões, mas provocando, esporadicamente enchentes em Itabuna e Ilhéus. O mapa de declividade (%) gerado pelo SWAT para a BHRC pode ser visualizado na Figura 6.

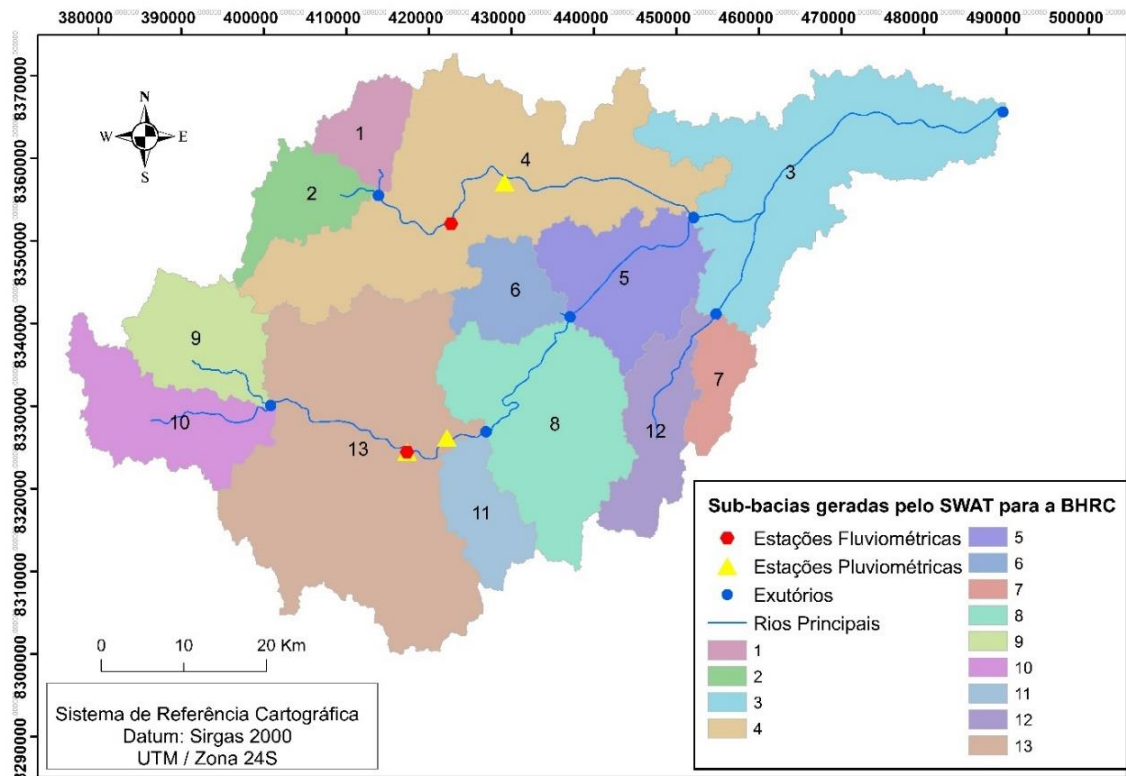
Figura 6: Mapa de declividade (%) da BHRC.



Fonte: Autor.

E finalizando esta etapa de delimitação dentro do modelo SWAT a partir da ferramenta *Watershed delineation*, foi gerada a delimitação para a bacia, as sub-bacias, rede de drenagem e exutório descritos na Figura 7.

Figura 7: Estações utilizadas, exutórios e sub-bacias geradas para o rio Cachoeira.



Fonte: Autor.

Na delimitação da BHRC, o modelo gerou treze sub-bacias e sete exutórios. Durante a delimitação da bacia foi possível inserir um arquivo *shapefile* do contorno real da bacia, utilizando-a como máscara, para que a nova delimitação da bacia fique mais próximo do real possível. Essa interação entre o SWAT e a plataforma de GIS, no caso o ArcGis, é importante para que o usuário possa tratar melhor os resultados do modelo de acordo com a sua necessidade. Com a delimitação realizada pelo SWAT, a bacia do Cachoeira apresentou uma área de drenagem de 4277 km². Ainda na Figura 7 é possível visualizar os rios principais e as estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas.

5.2.2 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU'S)

Após a finalização da delimitação da bacia, a segunda etapa dentro do SWAT é a geração das HRU'S. O SWAT realiza uma sobreposição dos tipos de solos, uso da terra e declividade para estar gerando essas HRU's. Quanto aos tipos de solos, predominam na BHRC o Chernossolo Argilúvico Órtico com 56,99% da área da bacia, seguido pelo Luvissole Crômico Pálico com 35,85%. A distribuição dos solos na paisagem tem relação direta com a sua gênese geomorfológica antiga e complexa, associada ao tipo de climático. Diferentes tipos de solos podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo. A textura do solo e o tamanho das

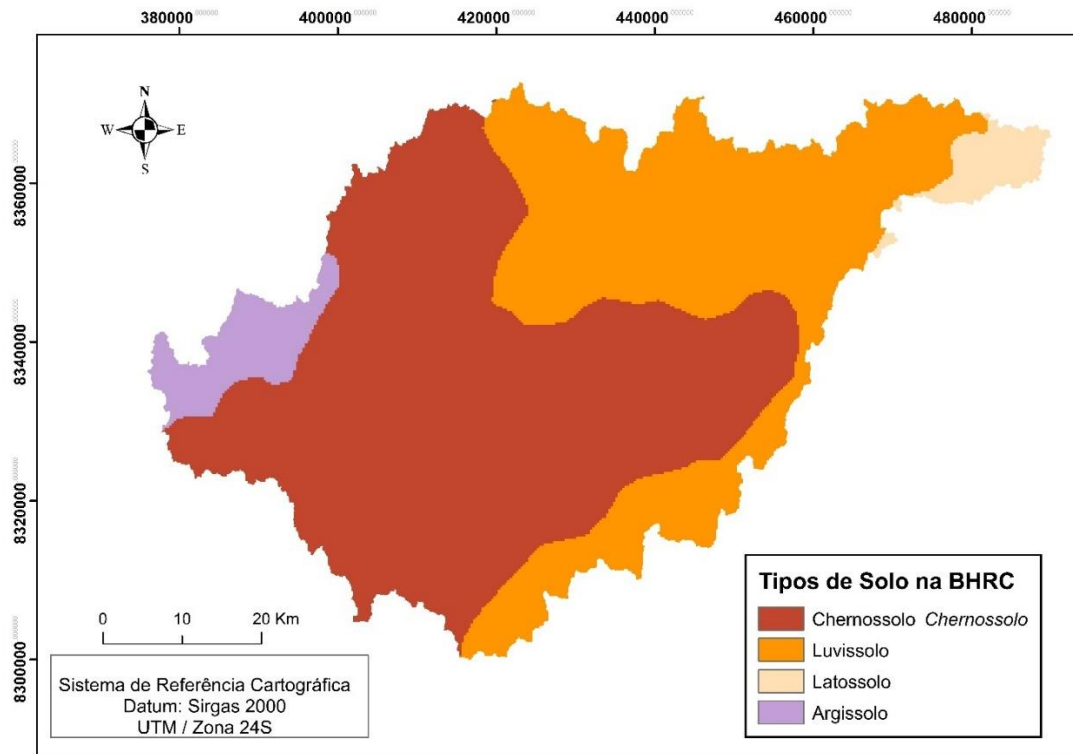
partículas são fatores que influenciam na erosão, no entanto, o desmatamento e a remoção da cobertura vegetal contribuem com os processos erosivos por deixarem o solo exposto a fatores ambientais, como a ação das chuvas por exemplo (NACIF, 2000).

Segundo a EMBRAPA (2018), os argissolos são solos profundos a muito profundos, bem estruturados e bem drenados. Há predominância do horizonte superficial A do tipo moderado e proeminente, apresentam principalmente a textura média/argilosa. Apresentam também baixa a muito baixa fertilidade natural, com reação fortemente ácida e argilas de atividade baixa. Ainda segundo a EMBRAPA, os Chernossolos Argilúvico Órtico, são solos normalmente de bem a imperfeitamente drenados e moderadamente ácidos a fortemente alcalinos, com argila de atividade alta. Embora sejam formados sob condições climáticas bastante variáveis e a partir de diferentes materiais de origem, estes solos têm desenvolvimento que depende da conjunção de condições que favoreçam a formação e persistência de um horizonte superficial rico em matéria orgânica, com alto conteúdo de cálcio e magnésio e com a presença de argilominerais 2:1, especialmente os do grupo das esmectitas.

Os Latossolos são solos em avançado estado de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas com um certo grau de gleização. São normalmente muito profundos, sendo a espessura do solo raramente inferior a 1 m (EMBRAPA, 2018). Os Luvisolos variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos. São de moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixos ou nulos.

Os Chernossolos Argilúvicos, solos predominantes na bacia, apresentam limitações de uso relacionadas ao risco de erosão, pois apesar de serem de textura argilosa ou muito argilosa, geralmente ocorrem em relevo ondulado ou fortemente ondulado, na BHRC, esses solos estão no baixo e médio curso da bacia. Quanto aos luvisolos, as limitações de uso relacionam-se à quantidade de pedras no horizonte superficial que pode dificultar o uso de mecanização agrícola e a suscetibilidade à compactação. Devido à mudança textural abrupta, são suscetíveis à erosão. Há também a limitação quanto à água disponível no solo, sendo maior em locais mais secos. As classes de solos presentes na BHRC, assim como sua distribuição podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8: Tipos de solos na bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.



Fonte: Adaptado do IBGE.

Na Tabela 5 é possível observar as classes de solos da área em estudo com suas respectivas áreas.

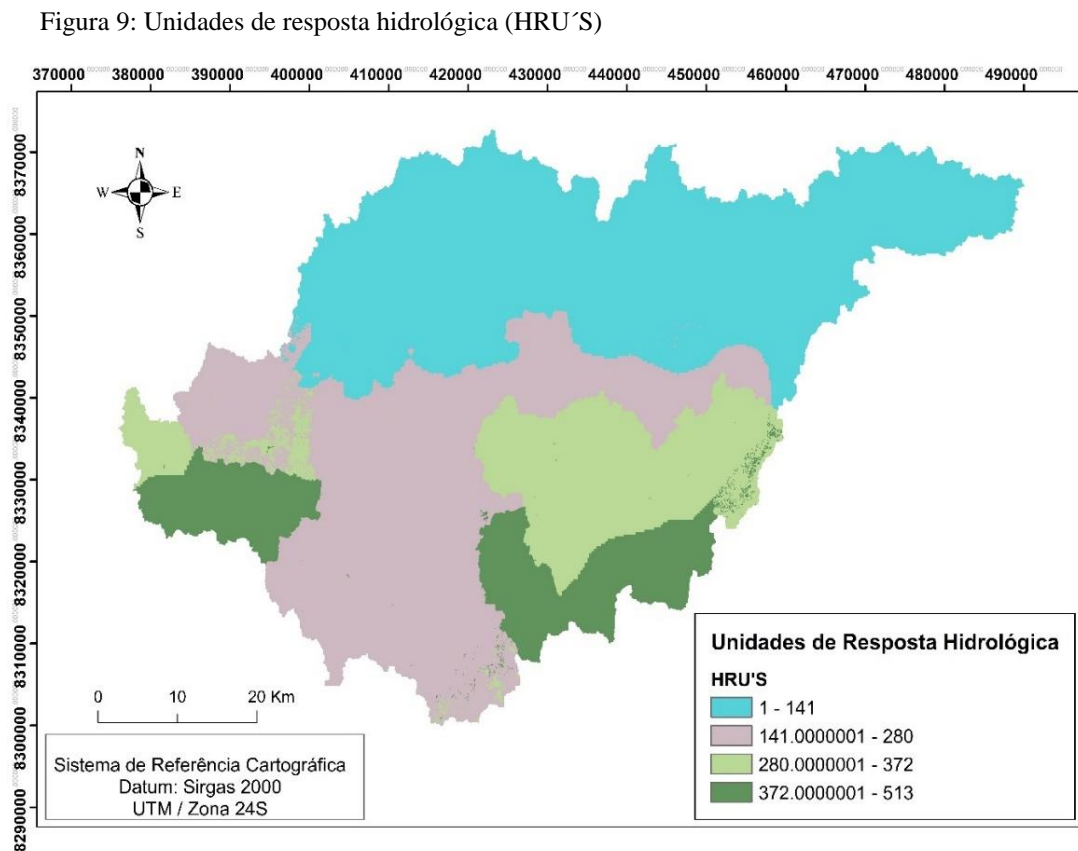
Tabela 5: Classes de solos na BHRC e suas respectivas áreas.

Classes	Área (km²)	%
Chernossolo	2393,3	56,99
Luvissole	1505,3	35,85
Latossolo	106,3	2,53
Argissolo	194,5	4,63
Total	4199,4	100

Fonte: Autor.

Após a sobreposição dos mapas pelo SWAT, foram geradas as HRUs para a BHRC. Para esta simulação, o SWAT gerou para a área de estudo quatro regiões hidrológicamente homogêneas (Figura 9). Vale ressaltar que, as múltiplas opções de definições para as HRUs, permite uma infinidade de saídas possíveis, a variação no número de exutórios também influencia no número de subbacias e, conseqüentemente, no número de HRUs. O uso de HRUs permite representar a variabilidade dos processos hidrológicos em unidades irregulares e independentes de uma região geográfica. Esta técnica reduz substancialmente o número de parâmetros do modelo a ser calibrados, uma vez que um conjunto de parâmetros precisa ser

estimado para algumas poucas HRUs, ao invés de ser estimado para cada célula ou minibacia que compõe um modelo (ARNOLD, 2012).



Fonte: Autor

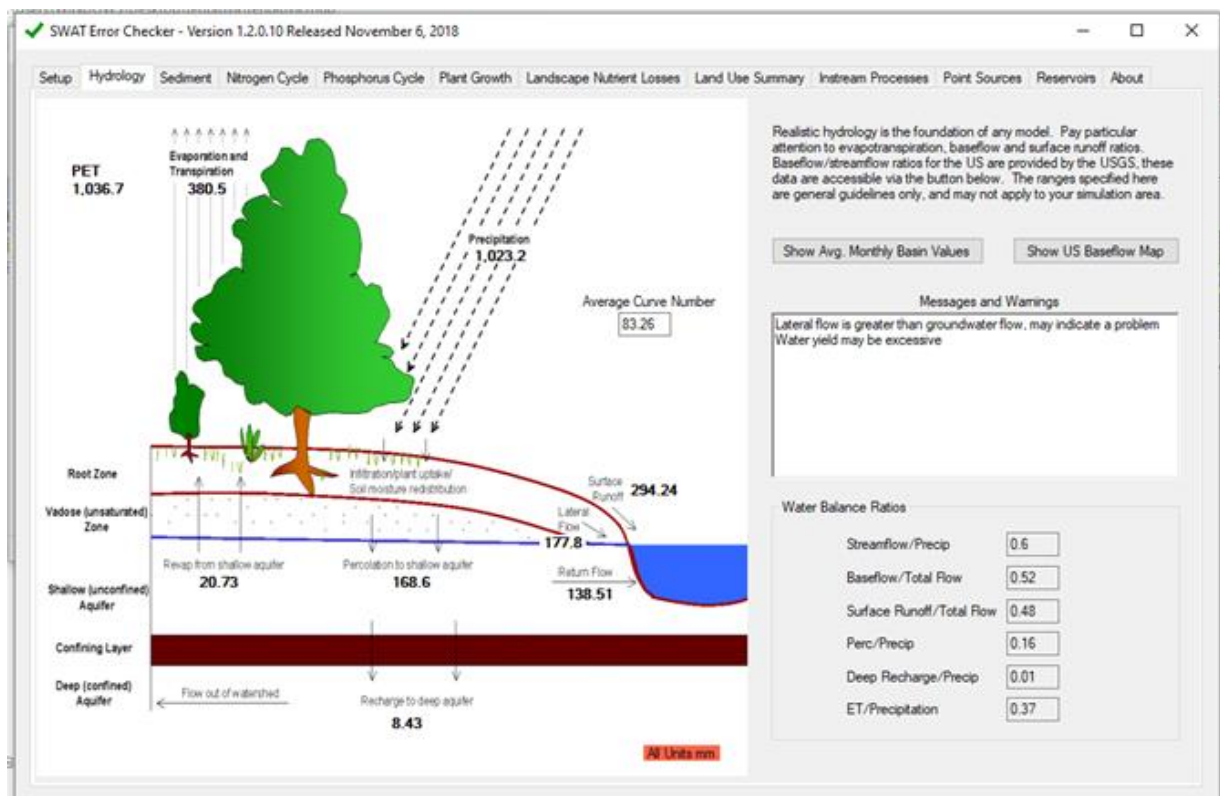
5.2.3 Modelagem Inicial

Independentemente do objetivo de estudo realizado com o SWAT, uma representação adequada dos componentes do balanço hídrico é fundamental para obtenção de resultados satisfatórios na modelagem. Em áreas com informações limitadas, a aplicação do modelo SWAT é pouco eficaz, uma vez que este requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada. Esta foi a principal limitação observada na implementação do modelo.

Analisando a Figura 10, observa-se que a precipitação média anual da bacia calculada pelo modelo SWAT foi de 1.023,2 mm, indicando boa representação das estações pluviométricas utilizadas na simulação, cujo valor próximo da média anual da precipitação para a região (800 mm). O escoamento superficial (294,24mm) está relacionado com o valor da Curva Número (CN) médio de 83,26 valor característico de área com pastagens e não vegetadas, o que dificulta a infiltração da água pelo solo e aumenta o escoamento superficial. Do total precipitado (1023,2mm) na bacia,

380,5 mm corresponde a evapotranspiração que, em termos percentuais, equivale a 37,2%. As contribuições estimadas do escoamento lateral foram de 177,8 mm e 138,51 mm direciona-se para o fluxo de retorno e descarrega no rio, o que contribui com a produção de água para os canais de drenagem. O armazenamento de água no solo foi de 168,6 mm; 20,73 mm da água retorna do aquífero raso para o perfil do solo pelo processo de reevaporação. A recarga para o aquífero profundo foi de 1,48 mm, que no balanço hídrico geral, em termos percentuais, corresponde a 0,15% da precipitação (1697,3 mm).

Figura 10: Simulação gerada pelo modelo SWAT para a BHRC.



Fonte: Autor.

Silva (2013) menciona que a produção de água numa bacia é alterada através de mudanças na transpiração, interceptação e evaporação, causadas pela alteração de um determinado uso da terra por outro. Ainda, de acordo com o autor, estudos do efeito da mudança da vegetação na produção de água têm focalizado primariamente na remoção de vegetação lenhosa.

Valores médios mensais da bacia para chuva, escoamento superficial, evapotranspiração real e potencial, podem ser observados na Tabela 6.

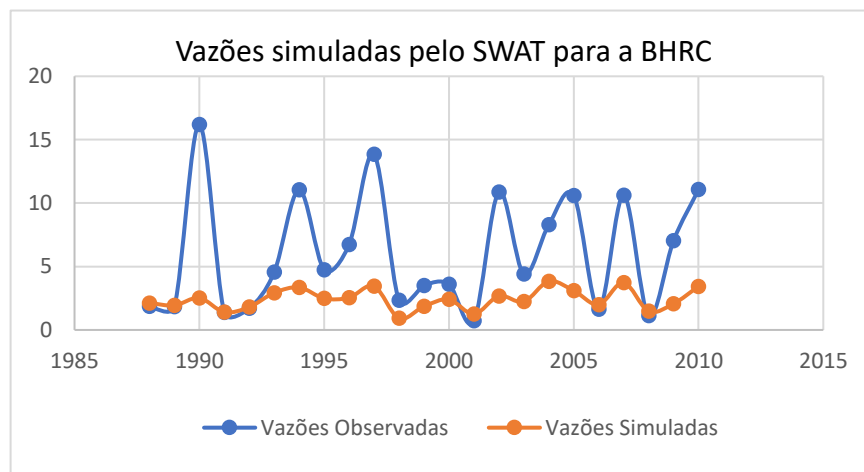
Tabela 6: Valores médios mensais da bacia.

Mês	Chuva (mm)	Escoamento superficial (mm)	Escoamento Lateral (mm)	Evapotranspiração real (mm)	Evapotranspiração potencial (mm)
Jan	94,84	35,13	18,40	15,99	99,33
Fev	87,44	29,30	15,32	33,72	99,78
Mar	119,59	40,95	16,82	53,04	104,31
Abr	85,26	18,62	13,52	52,36	90,86
Mai	74,08	16,27	11,94	45,79	78,37
Jun	67,43	11,17	11,69	38,49	65,04
Jul	64,67	9,44	11,82	38,07	67,59
Ago	54,21	7,32	10,41	33,80	76,49
Set	51,18	9,84	8,89	21,67	86,04
Out	66,08	15,66	12,21	14,93	94,17
Nov	120,96	44,40	20,80	16,15	85,72
Dez	136,66	55,87	25,85	6,20	88,07

As vazões observadas (dados reais) e as vazões simuladas pelo SWAT podem ser observadas na Figura 11. Pode-se observar a dificuldade do modelo em representar eventos com vazões de pico, simulando um volume menor nesses períodos em relação à série observada. Outro ponto a ser destacado é a magnitude das vazões observadas durante alguns anos da série, sendo indicado o uso do modelo SWAT considerando o cenário de mudanças climáticas.

Observa-se que a vazão média observada para o período foi de 6,07 m³/s, enquanto a simulada pelo modelo foi 2,41 m³/s, representando apenas 39,70% da vazão média observada.

Figura 11: Vazões observadas na BHRC e vazões simuladas pelo SWAT.

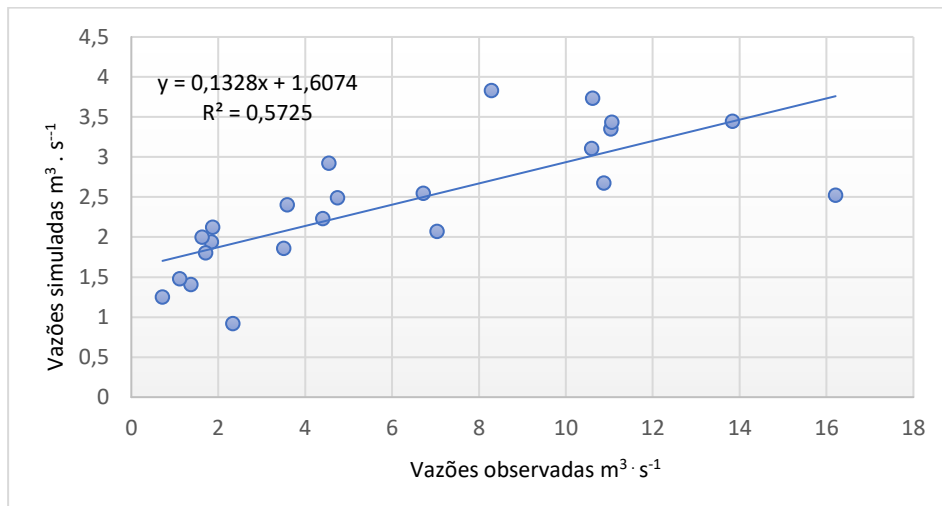


Para avaliar a relação entre os dados medidos e simulados, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2), obtendo-se um valor de 0,5725 (Figura 12). As distribuições dos dados são mais proporcionais nas vazões mínimas do que nas máximas, o que indica que parte dos dados foram subestimados pelo modelo. De acordo com Moriasi et al. (2007) no intervalo de

$0,50 < R^2 \leq 0,65$ a relação entre os dados medidos e simulados seria considerada satisfatória, no entanto, seria necessário o valor de PBIAS para avaliar se o desempenho do modelo está aceitável ou se a modelagem necessita de calibração (Moriassi *et al.*, 2007).

Desta forma, reconhece-se a importância das etapas de sensibilidade, validação e calibração do modelo, porém estas etapas não foram possíveis nessa pesquisa devido à dificuldade em encontrar dados pedológicos relativos aos solos da região, informações confiáveis e contínuas hidrometeorológicas, séries históricas de precipitação e vazão, além do dispêndio na elaboração das planilhas necessárias para alimentar o modelo. Assim, estas etapas foram recomendadas para trabalhos futuros.

Figura 12: Correlação entre vazões observadas na BHRC e vazões simuladas pelo SWAT.



6 CONCLUSÕES

Quanto à coleta de informações cartográficas, de sensores orbitais e base de dados para análise preliminar da bacia, ressalta-se a dificuldade em algumas regiões do Brasil para encontrar séries de dados hidrometeorológicos de forma contínua e para grandes períodos, dificultando assim, a utilização do modelo e/ou a realização de uma modelagem satisfatória.

Com relação a dinâmica do uso da terra na BHRC, o compartimento norte da área de estudo, inserido nos limites da Bacia do Rio Salgado, detém grande parte das áreas vegetadas mapeadas, concomitante com as áreas de maiores declividades, inviabilizando a área para atividades de pecuária e preservando a vegetação das mesmas. Com relação ao uso da terra, no período de 1985 a 2020, a classe “formação florestal” teve uma diminuição de 10,55% da área total em 35 anos. Áreas de mineração e outras áreas não vegetadas um aumento de 63,3% e 65,80%, respectivamente. As áreas urbanizadas apresentaram um aumento de 75,56 % para o mesmo período. Surgiram novas classes para o ano 2020, sendo elas Mineração, Silvicultura e Aquicultura.

Ao comparar as vazões observadas (dados reais) com as vazões simuladas pelo SWAT, pôde-se observar a dificuldade do modelo em representar eventos com vazões de pico, simulando um volume menor nesses períodos em relação à série observada. Ainda assim, as vazões simuladas apresentaram relação satisfatória com as vazões observadas para a bacia.

As simulações realizadas através do SWAT para a BHRC mostram que o modelo SWAT é uma ferramenta eficaz na simulação de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, e, conseqüentemente, para o gerenciamento dos recursos hídricos, no entanto, é necessária uma grande quantidade de dados e tempo, para organização requerida pelo modelo.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, foram dadas algumas recomendações para trabalhos subsequentes e intervenções que busquem o melhor gerenciamento dos recursos hídricos da Bacia do Rio Cachoeira, a saber:

- Ampliação da rede para coleta de dados hidrometeorológicos da bacia, para que se possa analisar com mais detalhes a variabilidade espaço-temporal de diferentes variáveis relativas ao clima;
- Disponibilização de dados sobre possíveis barramentos e reservatórios existentes na BHRC, visto que podem alterar o regime de vazão dos cursos d'água;
- Simulação de cenários futuros, levando em consideração alterações hidrometeorológicas e no uso da terra;

- Calibração e validação do modelo SWAT por diferentes métodos (manual e automático) e para diferentes finalidades (vazões, sedimentos, etc).

8 REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, 3(4), 1340-1352, 2004.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, 333: 413– 430, 2007.
- ABBASPOUR, K. C. **SWAT CUP: SWAT calibration and uncertainty programs- a user manual**. [S.l.], 2015.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno**. Brasília, 2022.
- ALVES SOBRINHO, T. *et al.* Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas Utilizando dados SRTM. **Engenharia de Água e Solo**, v. 30, n. 1, p. 1 – 12, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100005>.
- ANACHE, J. A. A. **Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado**. 162 p. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) — Universidade de São Paulo, 2017.
- ARAGÃO, R. **Estimativa dos parâmetros do modelo distribuído WESP com os dados da Bacia Experimental de Sumé - PB**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 147p, 2000.
- ARNOLD, J.; MORIASI, D.; GASSMAN, P.; ABBASPOUR, K.; WHITE, M.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M.; KANNAN, N.; JHA, M. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, 55 (4), 1491–1508, 2012.
- BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 151 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Física e Meio Ambiente) — Universidade Federal do Mato Grosso, 2005.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Lei nº 9.433**, Brasília, p. 1 – 14, 1997.
- BRESSIANI, D. de A. *et al.* A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 15, p. 1 – 27, 2015.
- CARVALHO NETO, J.G. **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 194p, 2011.

CASTRO, K.B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 117p, 2013.

CORREIA, T. P. **Aplicação do Modelo SWAT para Simulação de Cenários de uso da Terra na Bacia Hidrográfica do Rio Jucu**. 91 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model. **Technical Report nº 39**, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, 1966.

DANTAS, J. C. *et al*; Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da paraíba. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 34, n. 4, p.816-827, 2015.

DIAS, V. S. de. **Simulação de vazão aplicada ao reservatório da UHE Furnas utilizando modelo SWAT**. Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5º edição. ed. Brasília-DF, 2018.

FERNANDES, J. G.; **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 185 p. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2015.

FILHO, M.M; **Aplicação do SWAT na modelagem hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul**. 76p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

GARRIDO, J.M. **Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à bacia do rio Jiquiriçá – Bahia**. 198 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010: Características da população e dos domicílios**. 2010. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: Junho, 2020.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, 2002. Acesso em: 05/2021.

MELO NETO, J. D. O. *et al*. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177 – 188, 2014. Disponível em: 10:21168/rbrh.v19n1.p177-188. Acesso em: 11/2020.

MORAES, M. E. B. de; LORANDI, R. (org.). Métodos e Técnicas de Pesquisa em Bacias Hidrográficas. Ilhéus- Bahia: **Editus**. 289 p. 2016.

NACIF, P. G. S. **Ambientes Naturais da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, com Ênfase aos Domínios Pedológicos**. 134 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas) — Universidade Federal de Viçosa, 2000.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2005. **Agricultural Research Service**. Texas. 476p. 2005.

NEITSCH, S. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. 2009. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/docs/>. Acesso em: 11/2020.

Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff - NRCS. **National soil survey handbook**, title 430-VL. U.S. Government Printing Office, Washington, 1966.

OLIVEIRA, L, T.; **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2014.

MORIASI, D., ARNOLD, J., VAN LIEW, M., BINGNER, R., HARMEL, R., VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **ASABE**, 50 (3), 885–900, 2007.

PAIVA, A.L.R.; CABRAL, J.J.S.P.; AZEVEDO, J.R.G.; QUEIROZ, K.C.; PINHEIRO, R.B. Noções básicas de hidrologia e hidrometria. In: AZEVEDO, J.R.G. Hidrometria aplicada à gestão dos recursos hídricos. **Ed. Universitária**. Recife – PE, pp. 15-64, 2010.

PASSOS, F. O; SILVA, B. C. da; SILVA, F. G. B. da. Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.02, p. 619-633, 2021.

PIMENTEL, L. **Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente**. [S.l.]: Elsevier, 2015.

PINTO, L. V. A. *et al.* Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 102, n.65, p. 197 – 206, Junho 2004. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/>. Acesso em: 11/2020.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E. dos; DEL PRETTE, M. E. A Utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. **Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilheus-BA, Editus, 2002.

RODRIGUES, L. R. *et al.* Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 27 (3): 485-500, set-dez 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320150309>.

SANTOS, E. A. dos. **Influência do uso do solo no regime hidrológico da bacia do rio Lontra**. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Viçosa, 2010. Acesso em: 11/2020.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G; SILVA, A.M. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: a case study of Tapacurá River basin, Brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, 371: 189–193, 2015.

SANTOS, J. T. S. dos. *et al.*; O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA. **REGA**, Porto Alegre, v. 15, 3 ed., 2018. DOI: 10.21168/rega.v15e3.

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 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 10(4): 5-18, 2005.

SARTORI, A. P. **Aplicação do Modelo SWAT na Modelagem do Escoamento Superficial e Perda do Solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis em Itabira-MG**. 109 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Viçosa, 2019.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA. **Projeto Cachoeira**. Salvador, 2017. Disponível em: <http://www.meioambiente.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=433>. Acesso em: 11/2020.

SERRÃO, E. A. de O. **Aplicação do Modelo SWAT na Simulação Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas-PA**. 105 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia) — Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

SILVA, F. D. DI.; **Aplicabilidade do modelo Swat na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia da Universidade de Brasília- UNB, 2016.

SILVA, J. M. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. 2013. 100f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, K. B. **Caracterização das Bacias dos Rios Colônia, Salgado e Cachoeira e suas contribuições para estudos de confluências**. 76 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) — Universidade Estadual de Santa Cruz, 2016.

SILVA, K. B.; AMORIM, R. R. de; REGO, N. A. C. A Representação dos Geossistemas com Ênfase no Estudo dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Brasil. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia - MG, v. 19, n. 67, p. 53 – 67, Setembro 2018. ISSN 1678-6343.

SILVA, R. M. da; MEDEIROS, I. de C. Análise Hidrossedimentológica em Ambiente SIG usando o SWAT. **Revista Internacional de Ciência e Tecnologia da Informação Geográfica**, v. 1, n. 14, p. 211 – 231, 2014. ISSN 1578-5157.

SILVA, V. de A. *et al.* Uso da terra e perda de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Colônia, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, março 2011. Disponível em: <https://doi.org/10:1590/S1415-43662011000300013>.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of hydrological engineering**, v.7, n.4, p. 270-292. 2002

SOUSA, L. F. de. **Modelagem hidrológica da vazão sob diferentes cenários de uso do solo na bacia do rio cachoeira**. 88 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) — Universidade Estadual de Santa Cruz, 2019.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - ABRH, 943 p, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da Variabilidade Climática e Uso do Solo sobre os Recursos Hídricos**. [S.l.], 2002.

FERRAZ, LL; SOUSA, LF; SILVA, L.; SILVA, JO; TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, CA; ROCHA, F. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia do Oeste da Bahia. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.1, p.276-285, 2021.

VIANA, J. F. de S. **Impactos das mudanças do uso da terra sobre o balanço hidrossedimentológico: bases para gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia do Rio Pirapama**. 193 p. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências) — Universidade Federal de Pernambuco, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/35117>. Acesso em: 11/2020.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. On the Effect of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrology and Geomorphology. **Water Resource Research**, Washington, v. 357, n. 7, p.2.259 – 2.268, November 1999. Disponível em: DOI:10:1029/1999WR900034.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of The American Water Resources Association**, v. 41, p. 1077 – 1089, Outubro 2005.