



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

ANA KAROLINE ELOIDE ARAÚJO DANTAS

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO MANUAL DOS
PARÂMETROS DO MODELO SWAT PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME
DE UM AÇUDE LOCALIZADO EM UMA BACIA SEMIÁRIDA**

CAMPINA GRANDE - PB

2019

ANA KAROLINE ELOI DE ARAÚJO DANTAS

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO MANUAL DOS
PARÂMETROS DO MODELO SWAT PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME
DE UM AÇUDE LOCALIZADO EM UMA BACIA SEMIÁRIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG,
como parte dos requisitos necessários para
encerramento do componente curricular e conclusão da
graduação no curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Araújo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

ANA KAROLINE ELOI DE ARAÚJO DANTAS

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO MANUAL DOS
PARÂMETROS DO MODELO SWAT PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME
DE UM AÇUDE LOCALIZADO EM UMA BACIA SEMIÁRIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG,
como parte dos requisitos necessários para
encerramento do componente curricular e conclusão da
graduação no curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Aragão

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

Prof. Dr. Ricardo de Aragão – Orientador

Nota: _____

Prof. Dr. Eduardo Eneas de Figueiredo – Membro interno

Nota: _____

Dr. Edmilson Gomes Cavalcante Junior – Membro externo

DEDICATÓRIA

Aos meus pais porque “as raízes são como uma fonte que, das profundezas, emanam aquilo que constrói o homem e sua personalidade.” (Deliso Villa, 2002)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado saúde e força para chegar até aqui.

Aos meus pais, Célia e Manoel, pela capacidade de acreditar e investir em mim, e pelo amor incondicional.

Aos meus irmãos, Manu e Neto, pelo encorajamento e carinho.

Aos demais familiares, sem exceção, por servirem como exemplo de garra e determinação.

Aos amigos que sempre se fizeram presentes e que me deram o apoio que muito precisei.

Ao meu orientador nesta pesquisa, Professor Dr. Ricardo de Aragão, por partilhar sua experiência e sabedoria comigo, além de transmitir ensinamentos que vão além desse trabalho. Meu muito obrigada!

Ao professor Dr. Eduardo Eneas de Figueiredo, por compartilhar comigo seus conhecimentos durante o período que o auxiliei como monitora e por sempre se colocar à disposição quando o procuro me recebendo muito bem.

Ao avaliador Dr. Edmilson Gomes Cavalcante Junior pelas contribuições para melhoria deste trabalho.

E a cada pessoa que alguma vez me ajudou, encorajou, e me deu alguma palavra de conforto e colaborou com o meu sucesso.

RESUMO

Por ser uma abordagem bastante trabalhosa, a calibração manual de um modelo hidrológico aplicada em uma bacia hidrográfica de uma região semiárida requer que o modelador tenha um conhecimento prévio da bacia e, se possível, dados suficientes para obter resultados confiáveis. Sabendo do potencial do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) como ferramenta para modelagem hidrológica e considerando a carência de estudos utilizando esse modelo para a predição do volume de reservatórios inseridos em bacias hidrográficas no Brasil, buscou-se, com esse trabalho, aplicar uma metodologia para realizar a análise da sensibilidade e calibração manual dos parâmetros do modelo SWAT, visando avaliar sua eficácia na representação do volume do açude Sumé, analisando os processos hidrológicos que acontecem na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude. A bacia supracitada possui 770 km² e está localizada na região semiárida do nordeste brasileiro. A análise de sensibilidade foi feita de forma manual em 12 parâmetros diferentes do modelo, através da metodologia proposta por Haan (2002), e revelou que apenas cinco deles foram os mais influentes na predição do volume, a saber: CN2, CANMX, GWQMN, SOL_AWC e ESCO. A calibração manual do modelo foi realizada para o período de 1994 e 2008, comparando o volume modelado com o observado, e tomando o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R²) como indicadores de qualidade do ajuste. Ao final, os valores de NSE e R² foram maiores que 0,5, demonstrando o desempenho satisfatório do modelo em simular o volume do açude sob as condições da bacia hidrográfica do estudo.

Palavras-chave: Açude Sumé, Análise da sensibilidade, Calibração manual, modelo SWAT.

ABSTRACT

Because it is a very laborious approach, manual calibration of a hydrological model applied to a watershed in a semiarid region requires the modeler to have prior knowledge of the watershed and, if possible, sufficient data to obtain reliable results. Knowing the potential of the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) as a tool for hydrological modeling and considering the lack of studies using this model to predict the volume of reservoirs in watersheds in Brazil, we sought to apply this work. a methodology to perform the sensitivity analysis and manual calibration of SWAT model parameters, aiming to evaluate its effectiveness in the representation of Sumé reservoir volume, analyzing the hydrological processes that take place in the watershed upstream of the reservoir dam. The above-mentioned basin is 770 km² and is located in the semiarid region of northeastern Brazil. Sensitivity analysis was performed manually on 12 different parameters of the model, using the methodology proposed by Haan (2002), and revealed that only five of them were the most influential in volume prediction, namely: CN2, CANMX, GWQMN, SOL_AWC and ESCO. Manual calibration of the model was performed for the period 1994 and 2008, comparing the modeled volume with the observed one, and taking the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) and the determination coefficient (R²) as indicators of fit quality. At the end, the values of NSE and R² were greater than 0.5, demonstrating the model's median performance in simulating the volume of the dam under the conditions of the study watershed.

Keywords: Sumé resevoir, Sensitivity analysis, Manual calibration, SWAT model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.....	34
Figura 2 – Mapa da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.....	35
Figura 3 – Mapa de solos da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.	39
Figura 4 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de modelos hidrológicos aplicáveis em bacias hidrográficas.	21
Tabela 2 – Solos presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé....	40
Tabela 3 – Usos do solo presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.	42
Tabela 4 – Usos do solo presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.	43
Tabela 5 – Postos pluviométricos utilizados no estudo.	43
Tabela 6 – Posto meteorológico utilizados no estudo.	45
Tabela 7 – Parâmetros necessários para que o modelo simule os reservatórios.	46
Tabela 8 – Parâmetros incluídos na análise da sensibilidade.	52
Tabela 9 – Resultado da sensibilidade relativa (Sr) dos parâmetros.	54
Tabela 10 – Parâmetros utilizados.	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Volume do açude Sumé de 1994 a 2018.....	37
Gráfico 2 – Volume observado do açude Sumé e volume modelado após a calibração dos parâmetros.....	57
Gráfico 3 – Volume observado do açude Sumé e volume modelado no período de validação.	59

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação do modelo SWAT que determina a quantidade final de água no solo..	24
Equação 2 – Equação para a estimativa do escoamento superficial	25
Equação 3 – Equação para o cálculo do parâmetro S - capacidade máxima de armazenamento do solo.....	25
Equação 4 – Equação para cálculo do coeficiente de determinação (R^2).....	33
Equação 5 – Equação para cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).	33
Equação 6 – Equação para cálculo da sensibilidade relativa (S_r).	49

LISTA DE ABREVIACOES

AESA - Agência Executiva de Gestão das águas do estado da Paraíba

AGRL - Agricultura

ALPHA_BF - Constante de recessão do escoamento de base

CANMX - gua interceptada

CN - Curva Número

CN2 - Curva Número para condio de umidade do solo II

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

EPCO - Fator de compensao de absoro pelas plantas

ESCO - Coeficiente de evaporao de água do solo

FRSD - Floresta decidual

FRST - Floresta mista

GW_DELAY - Tempo de recarga do aquífero

GWQMN - Limite da profundidade de água no aquífero raso necessário para que ocorra fluxo de retorno

GW_REVAP - Coeficiente de retorno da água subterrânea por evaporao

HRUs - Unidades de Resposta Hidrológica

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

KINEROS - *Kinematic Runoff and Erosion Model*

LH-OAT - *Latin Hypercube - One factor At a Time*

MDE - Modelo Digital de Elevao

NSE - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

PRMS - *Precipitation-Runoff Modeling System*

R² - Coeficientes de determinação

RCHRG_DP - Fração de percolação para o aquífero profundo

RNGE - Gramíneas variadas

REVAPMN - Limita da profundidade de água no aquífero raso para que ocorra ascensão a zona não saturada

SCS - *Soil Conservation Service*

SOL_AWC - Capacidade de armazenamento de água no solo

SPAS - Pastagens

Sr - Sensibilidade relativa

SURLAG - Coeficiente de retardo do escoamento superficial

SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*

SWRN - Culturas do Sudoeste dos EUA

USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

WEPP - *Water Erosion Prediction Project*

WESP - *Watershed Erosion Simulation Program*

WGEN - Gerador climático do modelo SWAT

WATR - Água

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1.	OBJETIVOS.....	17
1.1.1.	Objetivo geral.....	17
1.1.2.	Objetivos específicos.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	17
2.2.	A REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA.....	18
2.3.	A MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	19
2.4.	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	20
2.4.1.	O modelo SWAT.....	22
2.4.1.1.	Os componentes do modelo SWAT.....	24
2.4.1.2.	Parâmetros do modelo SWAT.....	26
2.4.1.3.	As variáveis necessárias para entrada no modelo SWAT.....	29
2.4.2.	Pós-processamento do modelo SWAT.....	29
2.4.2.1.	Análise da sensibilidade.....	30
2.4.2.2.	Calibração.....	31
2.4.2.3.	Validação.....	32
2.4.2.4.	Análise estatística.....	32
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.1.1.	Clima.....	38
3.1.2.	Vegetação.....	38
3.1.3.	Relevo.....	38
3.1.4.	Geologia.....	39
3.1.5.	Solo.....	39

3.1.6.	Uso e ocupação do solo	41
3.1.7.	Dados tabulares com características da área estudada.....	43
3.2.	A MODELAGEM	45
3.2.1.	<i>Softwares</i> utilizados	45
3.2.2.	Dados de entrada do modelo SWAT.....	45
3.2.3.	Os processos da modelagem	47
3.2.4.	Análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo	49
3.2.5.	Calibração manual e análise estatística.....	53
3.2.6.	Validação e análise estatística	53
4.	RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	53
4.1.	A MODELAGEM INICIAL.....	53
4.2.	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE	54
4.3.	CALIBRAÇÃO MANUAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	56
4.4.	VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	59
5.	CONCLUSÃO.....	60
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável à vida. Ela é amplamente utilizada em todos os segmentos da sociedade, sendo a agricultura a atividade que mais consome esse recurso no mundo. Destaca-se, ainda, o seu uso em atividades domésticas, comerciais e industriais. Depois da água, o solo é o recurso natural com maior importância para o desenvolvimento humano, especialmente por causa da agricultura, onde há a produção e o cultivo de alimentos.

Nas últimas décadas, tem sido observado um aumento da degradação do solo e uma diminuição na disponibilidade de água em diversas áreas no Brasil e no mundo (MELO NETO *et al.*, 2014). As problemáticas que envolvem estes recursos, quando aplicados em uma bacia hidrográfica, causam mudanças na disponibilidade e na qualidade dos seus recursos hídricos. Desse modo, a sociedade tem tornado a água um recurso cada vez mais escasso e com qualidade comprometida.

Dada a importância da água e planejando garanti-la com qualidade e quantidade suficiente para todos os segmentos da sociedade, foi instituída pela Lei 9.433/1997, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). De acordo com essa lei, a bacia hidrográfica é tomada como a unidade de planejamento das atividades e é considerada como sendo o local de controle, conservação e proteção dos recursos hídricos (BRASIL, 1997), portanto, ela é apontada como uma ótima unidade para o gerenciamento integrado dos recursos naturais (KOBAYAMA *et al.*, 2008).

Sob esse viés, tem-se ampliado os estudos em bacias hidrográficas com o intuito de melhor entender a dinâmica do balanço hídrico e os impactos ocasionados sobre os corpos hídricos decorrentes do uso irracional da água, das alterações na cobertura vegetal e das modificações no uso e ocupação do solo. Nesse sentido, a modelagem vem sendo muito utilizada com o objetivo de representar a dinâmica da água e do transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas. Para Yira *et al.* (2016), a modelagem surge como alternativa para a obtenção de informações sobre a dinâmica do comportamento, antecipação de eventos e previsão de possíveis impactos ambientais, entretanto, de acordo com Muleta e Nicklow (2015), analisar a qualidade dos resultados modelados é mais importante que simplesmente realizar um modelo, sendo os dados de entrada da modelagem de extrema importância para o resultado final.

Atualmente, há uma grande variedade de modelos disponíveis para a representação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido bastante utilizado para simulações de vazões e sedimentos. O SWAT é um modelo semidistribuído e contínuo no tempo, desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso do solo em bacias hidrográficas de médio e grande porte (ARNOLD *et al.*, 2012). Ele permite a simulação de cenários que já ocorrem na bacia ou que possam vir a ocorrer, associando uma série de parâmetros físicos tais como: cobertura vegetal, relevo da região em estudo e dados de uso e ocupação solo. No entanto, é importante destacar que o SWAT é composto por um conjunto de equações que refletem de forma simplificada o movimento da água e sedimentos em uma bacia hidrográfica, razão pela qual deve ser calibrado a partir de dados observados para melhor refletir os resultados da modelagem (ERCAN *et al.*, 2014).

A calibração do modelo SWAT pode ser feita de forma automática ou manual. A calibração manual é considerada mais exigente e mais trabalhosa porque pode levar mais tempo para ser concluída (BROUZIYNE *et al.*, 2017). Além disso, para uma calibração manual ser bem-sucedida, é importante que o modelador tenha realizado previamente uma análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo (GREEN e VAN GRIENSVEN, 2008) para, a partir dela, decidir quais parâmetros da modelagem ajustar no processo de calibração e, por fim, conseguir bons resultados na modelagem, verificados através de testes estatísticos (GASSMAN *et al.*, 2007).

Sabendo do potencial do SWAT como ferramenta de modelagem hidrológica e considerando a carência de estudos utilizando essa ferramenta para a determinação do volume de reservatórios inseridos em bacias hidrográficas no Brasil, buscou-se, com esse trabalho, aplicar uma metodologia para realizar a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo e calibração manual, visando avaliar sua eficácia na representação do volume do açude Sumé, analisando os processos hidrológicos que acontecem na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude.

O açude Sumé está localizado na região semiárida do nordeste brasileiro. Essa região é marcada por precipitações totais anuais baixas e irregulares, concentradas em um curto período do ano, forte insolação e elevadas temperaturas, características essas que favorecem a carência de recursos hídricos na localidade. Portanto, realizar a modelagem hidrológica da bacia onde o açude está inserido para a representação do seu volume é fundamental para conhecer a disponibilidade de água em quantidade do açude e para auxiliar na tomada de decisão da gestão

das águas, configurando assim, a modelagem como ferramenta necessária ao semiárido nordestino, para prever alternativas de uso dos recursos hídricos adequadas à realidade.

Espera-se que o presente trabalho forneça uma metodologia que possa ser aplicada em uma bacia semiárida para predição do volume de açudes nela inseridos, e que a mesma possa ser seguida em outros projetos de modelagem hidrológica com objetivos semelhantes e contextos equivalentes ao desta pesquisa.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Realizar a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé, no semiárido nordestino, visando avaliar a eficácia do modelo para predição do volume do açude, cujo barramento se encontra no exutório na bacia.

1.1.2. Objetivos específicos

- Fazer a caracterização da região em estudo;
- Construir o banco de dados necessário para a modelagem da bacia hidrográfica com o modelo Swat;
- Realizar a modelagem inicial sem calibração;
- Analisar a sensibilidade dos parâmetros do modelo;
- Fazer a calibração manual do modelo visando melhor refletir os resultados observados;
- Analisar a eficiência da modelagem através de métodos estatísticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Os processos hidrológicos são, em termos gerais, os responsáveis pelo ciclo hidrológico e, portanto, pela disponibilidade hídrica (UZEIKA, 2009). Para Silveira (2009), os principais componentes do ciclo hidrológico são os processos de precipitação, evaporação, transpiração, interceptação, percolação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo.

Quando a precipitação ocorre sobre o solo, parte do volume precipitado é interceptado pela cobertura vegetal e/ou depressões, retornando a atmosfera através da evaporação. A água

que cai sobre a superfície do solo tem diferentes destinos e enquanto o solo não estiver saturado, haverá infiltração da água no mesmo. Parte do volume infiltrado será aproveitado pelos vegetais e retornará a atmosfera por meio da transpiração. A água que não é interceptada e que não infiltra no solo converge até um ponto final, chamado exutório, caracterizando o escoamento superficial (VESTENA, 2008).

Em uma bacia hidrográfica, a dinâmica dos processos hidrológicos depende de vários fatores, como por exemplo: tipo de solo, vegetação, relevo, uso do solo, entre outros. São esses fatores que determinam a relação entre o total precipitado e o total escoado (PAIVA *et al.*, 2010).

Os processos hidrológicos, além de sofrer alterações devido as ações antrópicas que modificam a vegetação e o uso do solo, sofrem também com as mudanças climáticas. Essas mudanças provocam modificações no balanço de energia, aumentando as temperaturas e as taxas de evaporação, que alteram o ciclo das chuvas, reduzem a umidade do solo e modificam o escoamento superficial e fluvial (RUFINO e SILVA, 2017). As mudanças climáticas intensificam a problemática em volta dos recursos hídricos, especialmente, em regiões semiáridas do nordeste brasileiro, que apresentam uma grande tendência a falta de água em função da alteração nos padrões pluviométricos com redução da frequência e intensidade das chuvas e, além disso, essas regiões possuem um grande potencial evaporativo da água, em razão da grande disponibilidade de energia solar, das altas temperaturas e da baixa umidade do ar (ASSIS *et al.*, 2015).

2.2. A REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

A região semiárida brasileira abrange desde o litoral norte, no Ceará e Rio Grande do Norte, até o norte de Minas Gerais, incluindo os estados da Paraíba, Pernambuco, Piauí, Bahia, Alagoas e Sergipe.

De acordo com Cáritas (2014), viver na região semiárida brasileira significa conviver com a irregularidade das chuvas mais do que com a falta delas. Essa irregularidade vai desde as fortes precipitações em tempos normais, na estação chuvosa, até os longos períodos de secas. Essa região sempre enfrentou secas climatológicas, devido a diminuição dos totais anuais de precipitação em relação à normal climatológica da região, secas hidrológicas, com rios e reservatório totalmente secos ou com volumes abaixo do normal, decorrente da péssima

distribuição espacial e temporal da precipitação, secas agrícolas, onde há a diminuição de água disponível para o suprimento das necessidades de crescimento das plantas, e secas socioeconômicas, notadas devido a redução da disponibilidade de bens e serviços por causa da diminuição dos totais anuais precipitados, ocasionando uma necessidade premente de racionalização do uso dos recursos hídricos (LIMA *et al.*, 2017), sendo a seca climatológica a principal causa para a ocorrência dos demais tipos de seca.

Como é característico das regiões semiáridas, em uma escala anual, o volume precipitado pode ser menor do que o volume evaporado, que no semiárido brasileiro pode ser superior a 2.000 mm/ano. Outra característica predominante do semiárido é a presença de solos rasos e poucos desenvolvidos, e um dos fatores que corrobora com isso é clima da região, que tem como característica a escassez das chuvas, fazendo que os processos químicos não ocorrem plenamente (ARAÚJO, 2011). Para esse mesmo autor, o período chuvoso dessa região é bem definido, e é influenciado pelas condições da dinâmica atmosférica (fluxos das massas de ar), do relevo e da exposição dos ventos. Esse período chuvoso é concentrado, em sua maioria, em quatro meses do ano, com médias anuais que não passam de 650mm.

Fica evidenciado assim, para a região, o descompasso entre a oferta e a demanda de água, que é ainda mais agravada pela má utilização e pela falta de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Uma forma de superar esse descompasso é com a tomada de decisão fundamentada na gestão dos recursos hídricos disponíveis para uso, utilizando critérios e alternativas que configurem a realidade dessas áreas. Portanto, a modelagem hidrológica tem fundamental importância para auxiliar na gestão desses recursos, visto que através dela é possível verificar estratégias de adaptação às alterações climáticas e de uso e ocupação do solo (DAGGUPATI *et al.*, 2015).

2.3. A MODELAGEM HIDROLÓGICA

Cada vez mais se torna importante entender os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, uma vez que as estratégias de gestão dos recursos hídricos estão mais dependentes do uso conjunto da água superficial e subterrânea para maximizar a eficiência de captação desse recurso. Para simular como as condições hidrológicas futuras e as estratégias de gestão da água afetarão os usuários da água e o meio ambiente, todos os processos precisam ser integrados em uma estrutura de modelagem (BROOKFIELD *et al.*, 2017).

Para Rodrigues (2011), os processos que ocorrem em bacias hidrográficas são de difícil compreensão e o seu entendimento é fundamental para o adequado manejo dos recursos naturais. Dito isto, a modelagem dos processos hidrológicos se torna um meio importante para o entendimento dos processos na bacia, permitindo a representação de cenários futuros, úteis na gestão dos recursos hídricos. A modelagem hidrológica é efetivada através de modelos hidrológicos.

2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos hidrológicos são ferramentas que possibilitam estudar, em uma bacia hidrográfica, os impactos das mudanças no uso e ocupação do solo e os impactos das mudanças climáticas, entre outros fatores (DAGGUPATI *et al.*, 2015). Na realização da modelagem hidrológica, a simplificação física dos processos envolvidos, as estimativas de parâmetros desconhecidos e até mesmo os dados observados são fontes de erros nas previsões do modelo (BEVEN, 2012a). Por isso, é importante realizar a análise estatística dos resultados do modelo para ver se este traz um grau de confiança adequado.

Discussões sobre aspectos relacionados a classificação dos modelos podem ser encontrados em Tucci (1987) e Tucci (1998). Segundo esses autores, os modelos podem ser classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relação entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Para esse autor, os modelos:

- São determinísticos quando produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, isto é, para cada valor de entrada, há um único valor de saída;
- São estocásticos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem possuem um comportamento aleatório;
- São empíricos quando sua formulação não possuir nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia;

- São conceituais quando são baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético;
- São concentrados quando a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea;
- São distribuídos quando permitem que toda área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados;
- São contínuos quando simulam os processos hidrológicos num longo período, sendo feita a simulação em todo o período, de forma contínua.

É notória a quantidade de trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas relacionados a estudos hidrológicos em bacias hidrográficas. Entre os modelos hidrológicos existentes, sendo eles também capazes de prever a erosão hídrica, pode-se destacar:

Tabela 1 – Exemplos de modelos hidrológicos aplicáveis em bacias hidrográficas.

Modelo	Nome	Autor e Ano
KINEROS	<i>Kinematic Runoff and Erosion Model</i>	Woolhiser <i>et al.</i> (1990)
WESP	<i>Watershed Erosion Simulation Program</i>	Lopes (1987)
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>	Flanagan e Nearing (1995)
PRMS	<i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>	Leavesley <i>et al.</i> (1983)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Arnold <i>et al.</i> (1998)

O modelo KINEROS é um modelo distribuído, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. Ele simula a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos, o escoamento superficial e a qualidade da água para eventos individuais de precipitação. O modelo utiliza a equação da continuidade de sedimentos de Bennett (1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969).

O modelo WEPP foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado em grandes bacias hidrográficas. Esse modelo é conceitual de base física e simula a erosão com base na geração estocástica do clima, na teoria de infiltração, na física do solo, na ciência das plantas, na hidráulica e mecânica da erosão. Ele opera em passo de tempo diário para a previsão de evapotranspiração e percolação.

O modelo WESP simula as mesmas coisas que o modelo KINEROS, apenas utilizando abordagens diferentes. Ele foi elaborado para ser aplicado à pequenas bacias nas regiões semiáridas (LOPES, 1987).

O modelo PRMS foi desenvolvido no Serviço Geológico dos EUA (USGS) e é um modelo físico, de parâmetros distribuídos, criado para avaliar os efeitos de diferentes combinações de precipitação, clima e uso solo nas respostas da bacia hidrográfica. O modelo simula as respostas nas relações do balanço hídrico da bacia de maneira contínua ou de eventos específicos.

O modelo SWAT foi elaborado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para auxiliar os gestores de recursos hídricos a prever e avaliar o impacto das alterações do uso do solo em bacias hidrográficas de médio e grande porte. É um modelo semidistribuído, contínuo e de base física, (ARNOLD *et al.*, 2012).

2.4.1. O modelo SWAT

O SWAT é um modelo de domínio público (código aberto) e atualmente possui interfaces disponíveis para os softwares ArcGIS, MapWindow e QuantumGIS (DILE *et al.*, 2016).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo semidistribuído, de base física e contínuo no tempo, que foi desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso do solo em bacias hidrográficas de médio e grande porte, sendo capaz de realizar longos períodos de simulação (ARNOLD *et al.*, 2012). Ele pode descrever o comportamento de bacias diante de aplicação de técnicas de gestão, bem como alterações no uso e manejo do solo (NEITSCH *et al.*, 2011). Ele permite a simulação de cenários que já ocorrem na bacia ou que possam vir a ocorrer, associando uma série de parâmetros físicos tais como: cobertura vegetal, relevo da região em estudo e dados de uso e ocupação solo.

De acordo com Arnold *et al.* (2012), o modelo foi desenvolvido com uma estrutura de comandos capaz de dividir a área em unidades homogêneas tendo como componentes aspectos climáticos, topográficos, vegetativos e de manejo do solo, possibilitando a simulação de escoamento superficial e subsuperficial, sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas.

O modelo SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias para, depois, dividir em unidades de respostas hidrológicas (HRU - *Hydrologic Response Unit*). As HRU representam a discretização de porções de áreas das sub-bacias em que há apenas uma classe de solo e um tipo de uso e manejo (NEITSCH *et al.*, 2005). Assim, cada HRU é composta por uma única combinação de cobertura e tipo de solo (SARMENTO, 2010).

O processamento do modelo SWAT é feito nas seguintes etapas: inicialmente ele calcula os fluxos de cada HRU; em seguida os resultados de cada HRU são associados para computar o que é gerado por cada sub-bacia; por último, as respostas geradas por sub-bacias são direcionadas para as calhas dos rios de acordo com a rede de drenagem existente na bacia hidrográfica (NEITSCH *et al.*, 2005).

Esse modelo vem sendo muito utilizado no Brasil e no mundo para simular bacias de diversos tamanhos e diferentes fenômenos, como por exemplo, foi utilizado no estudo da erosão, produção e transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica (ADDIS *et al.*, 2016; YESUF *et al.*, 2016), foi empregado para analisar as consequências de mudanças climáticas e mudanças no uso do solo em bacias hidrográficas (KRYSANOVA e SRINIVASAN, 2015), foi aplicado para sugerir técnicas de práticas de manejo do solo (SHESHUKOV *et al.* 2016), e foi aproveitado na análise de vazões (BONUMÁ *et al.*, 2013; MELO NETO *et al.*, 2014).

Em 2016, Brighenti *et al.* (2016) fizeram um trabalho destacando que haviam mais de 650 artigos publicados, no mundo, utilizando o SWAT como ferramenta de simulação. No Brasil, ele conta 102 trabalhos que relatam a utilização do SWAT para simulação do fluxo hidrológico, no entanto, o autor chama atenção para o fato de existir um grande número dos trabalhos que não descreve os processos de calibração e validação do modelo. Para esse mesmo autor, a principal dificuldade para realizar a calibração e a validação do modelo é a ausência de séries de dados medidos nas bacias modeladas. O trabalho de Lubitz *et al.*, (2013) é um exemplo que mostra que a validação da simulação não foi feita, com a justificativa da ausência de uma série de dados extensa. Outros autores encontraram dificuldades na calibração do modelo, como Melo Neto *et al.* (2014) e Uzeika *et al.* (2012).

Em bacias hidrográficas de regiões semiáridas, o modelo SWAT também já foi utilizado em muitos trabalhos. Mais recentemente ele foi capaz de realizar modelagens com eficiência comprovada em uma bacia semiárida no nordeste do Brasil (NASCIMENTO *et al.*, 2018), no noroeste de Marrocos (BROUZIYNE *et al.*, 2017), na República do Níger (CHAIBOU *et al.*,

2016), no sul da Itália (GIROLAMO *et al.*, 2015), na Tunísia (ABOUABDILLAH *et al.*, 2014) e na Etiópia (SETEGN *et al.*, 2014).

2.4.1.1. Os componentes do modelo SWAT

De acordo com Arnold *et al.* (1998), os principais componentes do modelo são: clima, hidrologia (escoamento superficial, percolação, interceptação, infiltração, escoamento subsuperficial, escoamento de base e evapotranspiração), temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos, e manejo do solo.

O funcionamento do SWAT será sempre dado em função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica, independentemente do tipo de estudo que esteja sendo desenvolvido. (NEITSCH *et al.*, 2005). O ciclo hidrológico no modelo e a determinação da produção de água da bacia tem como base a Equação 1, também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SWT = SW0 + \sum_{i=1}^t (P - Q_{sup} - ET - Wa - Q_{sub}) \quad (1)$$

Onde:

SWT é a quantidade final de água no solo (mm);

SW0 é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm);

t é a duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

P é a quantidade de precipitação no dia i (mm);

Q_{sup} é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm);

ET é a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm);

Wa é a quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia i (mm); e

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

A estimativa do escoamento superficial é realizada pelo Método da Curva Número (CN) elaborado em 1954 pelo do Soil Conservation Service (SCS), representado na Equação 2 a seguir:

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

Onde:

Q_{sup} é o total da lâmina superficial escoada (mm);

P é a quantidade de precipitação (mm);

S é a capacidade máxima de armazenamento do solo (mm).

Essa metodologia foi desenvolvida para fornecer uma estimativa da lâmina superficial escoada para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo. O parâmetro S varia em função do tipo e uso, manejo, declividade do solo e da permeabilidade, além ser temporalmente dependente das variações da quantidade de água no solo (NEITSCH *et al.*, 2005). Ele é obtido através da Equação 3 adiante:

$$S = 25,4 \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

O parâmetro CN é fundamental ao estudo do escoamento superficial, sendo dependente da relação de informações de uso e cobertura do solo, das características pedológicas e das condições de umidade antecedentes da área em estudos. Dessa forma, o CN é função da combinação dos diferentes grupos hidrológicos do solo, conforme suas características físicas e de infiltração, com os diversos usos e manejos do solo (SARTORI *et al.*, 2005).

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo 1 representando um solo totalmente permeável e 100 um solo que converterá toda a precipitação em escoamento, logo um solo impermeável (NEITSCH *et al.*, 2005).

Outro componente muito importante do modelo e que influencia diretamente nos resultados da modelagem é a evapotranspiração potencial. Os métodos utilizados pelo modelo para calcular a evapotranspiração potencial são: Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY-TAYLOR, 1972), e Hargreaves (HARGREAVES *et al.*, 1985), sendo que também é permitido inserir na modelagem os dados observados de evapotranspiração do local, e não haverá, portanto, a necessidade do modelo calculá-la através dos métodos supracitados.

2.4.1.2. Parâmetros do modelo SWAT

O modelo SWAT é sensível a mais de 100 parâmetros relacionados a vegetação, manejo e tipos de solo, clima, aquífero, canal e reservatórios (ARNOLD *et al.*, 1998). A seguir serão apresentados apenas alguns parâmetros que foram identificados como os mais utilizados em trabalhos feitos com o modelo. Todas as informações sobre eles foram retiradas de Salles (2012).

- **Fator de compensação de água pelas plantas – EPCO**

Esse parâmetro faz referência a quantidade de água utilizada pelas plantas por dia. Essa quantidade é dada em função da quantidade demandada pelas plantas e a da quantidade de água disponível ao longo do perfil do solo. Conforme o teor de umidade das camadas superficiais do perfil diminui, as plantas compensam nas camadas mais profundas. O parâmetro EPCO varia de 0,01 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam camadas mais profundas compensando. Na modelagem hidrológica, se nenhum valor for informado, será estabelecido o valor igual a 1. Esse valor pode ser determinado para unidades hidrológicas ou então um valor único para toda bacia hidrográfica.

- **Fator de compensação de evaporação do solo – ESCO**

Esse parâmetro modifica a profundidade usada para determinar a demanda evaporativa do solo, de forma a levar em consideração o efeito da capilaridade. O parâmetro ESCO varia de 0 a 1. Quanto menor esse valor, mais o modelo é capaz de extrair mais água de níveis mais baixos. Na modelagem hidrológica, se nenhum valor for dado, será estabelecido o valor igual a 0,95, e, assim como o EPCO, o valor de ESCO pode ser determinado por unidade hidrológica ou então um valor único para toda bacia hidrográfica.

- **Constante de recessão do escoamento de base (dias) – ALPHA_BF**

O ALPHA_BF é um índice que avalia a resposta da vazão subterrânea em função da recarga. Aumentando-se o valor do parâmetro será aumentada a recarga do aquífero e diminuído o fluxo de base. Os valores variam entre 0,1 e 0,3 para locais cujas repostas às recargas são lentas, e 0,9 e 1,0 em locais sensíveis à recarga.

- **Armazenamento máximo do dossel (mm H₂O) – CANMX**

O parâmetro CANMX é definido como a quantidade máxima de água que pode ser armazenada em um dossel completamente desenvolvido (mm H₂O). O dossel das árvores pode afetar nos processos de infiltração, de escoamento superficial e evapotranspiração, interceptando as gotas da chuva e armazenando parte da água que precipita. Quando o escoamento superficial é calculado, o Método SCS Curve Number agrega a interceptação do dossel para realizar as primeiras análises. Quanto maior o valor do parâmetro, menor é o volume disponível na bacia.

- **Valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II – CN2**

O SCS Curva-Número é dado em função de permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de água no solo. Esse parâmetro é importante no cálculo do volume de escoamento superficial quando é utilizado o método do SCS. Ele é um número adimensional.

- **Tempo de retardo da água subterrânea (dias) – GW_DELAY**

A água, antes de se tornar recarga de um aquífero raso, se move pela camada mais profunda do solo e entra e flui na zona vadosa. O tempo de retardo entre a saída de água do perfil do solo e a entrada em um aquífero raso dependerá do nível piezométrico e das propriedades hidráulicas das formações geológicas na zona vadosa e na zona de água subterrânea. O tempo de retardo não pode ser mensurado diretamente, entretanto, pode ser estimado simulando a recarga do aquífero usando diferentes valores. Quanto maior o valor desse parâmetro, menor é a recarga do aquífero raso.

- **Coeficiente "revap" de água subterrânea – GW_REVAP**

A ideia desse parâmetro é que a água pode se mover de um aquífero raso para uma zona insaturada logo acima, isso porque, nos períodos de estiagem, a franja capilar a qual separa a zona saturada da zona insaturada irá evaporar no sentido de baixo para cima, e assim, na medida em que a água evapora da franja capilar, o aquífero reabastece a própria franja capilar. A água também poderá ser retirada de aquíferos por plantas com raízes profundas, principalmente quando a zona saturada estiver próxima da superfície. Devido ao fato do tipo cobertura vegetal afetar o balanço hidrológico, os parâmetros que governam o REVAP podem ser alterados de acordo com o tipo de uso do solo. À medida que os valores de GW_REVAP se aproximam de 0, o movimento de água de um aquífero raso para a zona que contém raízes é restringido,

enquanto valores próximos de 1 a taxa de transferência do aquífero para a zona radicular aproxima-se as taxas de evapotranspiração potencial. Esse parâmetro deve variar de 0,02 a 0,20.

- **Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície – GWQMN**

Esse parâmetro traz a ideia que a água subterrânea só atinge a superfície se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o GWQMN. Um baixo valor desse parâmetro permite que haja mais fluxo de base.

- **Fração de água percolada para o aquífero profundo – RCHRG_DP**

Esse parâmetro representa a fração de água percolada do aquífero raso para o aquífero profundo. Os valores desse parâmetro variam de 0 a 1.

- **Profundidade de água limite no aquífero raso para que ocorra "revap" (mm H₂O) – REVAPMN**

Esse parâmetro traz a ideia de que o movimento de água de um aquífero raso para a zona insaturada é permitido apenas se o volume de água no aquífero raso é maior ou igual ao Revapmn.

- **Teor de umidade disponível nas camadas do solo (mm H₂O · mm⁻¹ solo) – SOL_AWC**

Para esse parâmetro, o teor de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo é calculado subtraindo-se da quantidade de água na capacidade de campo, a fração de água do ponto de murcha permanente. O parâmetro SOL_AWC tem uma relação inversamente proporcional com vários componentes do balanço hídrico, isso porque quando o valor do parâmetro é aumentado, o fluxo de base e o escoamento superficial diminuem.

- **Condutividade hidráulica saturada – SOL_K**

Esse parâmetro representa a condutividade hidráulica saturada do solo. É um parâmetro necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada de solo e a quantidade de água que percola para a camada de solo inferior. Em geral, esse parâmetro não é

tão sensível quanto GWQMN, ESCO E SOL_AWC. Quanto maior o valor do SOL_K, menor o fluxo de base.

- **Coefficiente de retardo do escoamento superficial – SURLAG**

Nas bacias hidrográficas, em grandes sub-bacias que tenham tempo de concentração maior do que um dia, apenas parte do escoamento superficial irá atingir o tributário principal no dia em que ele for gerado. O SWAT incorpora parte armazenamento do escoamento superficial, de forma a retardar parte da entrada de água oriunda do escoamento superficial no canal principal. Quanto menor o valor de Surlag, mais água é mantida em estoque e quanto maior, mais água é liberada para o canal principal aumentando a geração de fluxo. Assim, o Surlag controla a fração de toda água disponível que irá abastecer diariamente o canal. Caso não seja atribuído nenhum valor, o modelo irá usar o valor igual a 4.

2.4.1.3. As variáveis necessárias para entrada no modelo SWAT

A precipitação é uma das variáveis de entrada mais importantes na modelagem hidrológica. Além dela, são necessárias variáveis climáticas, que são: precipitação diária; temperatura máxima; temperatura mínima; umidade relativa; velocidade do vento e radiação solar. Estas condições meteorológicas podem ser inseridas no modelo através de dados observados ou geradas através do gerador climático do modelo (STRAUCH *et al.*, 2012). O modelo também requer informações sobre a topografia, o solo, as características de uso e ocupação do solo e a vegetação da bacia hidrográfica (NEITSCH *et al.*, 2011).

2.4.2. Pós-processamento do modelo SWAT

Um passo importante após o processo de modelagem do modelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica de estudo, haja vista que trabalhar com muitos parâmetros pode se tornar uma tarefa dispendiosa. O usuário determina quais variáveis devem ser ajustadas de acordo com seu conhecimento sobre a bacia ou faz uma análise de sensibilidade manual ou automática. Após analisar os parâmetros mais sensíveis, o passo seguinte é realizar a calibração. Fazer a calibração do modelo consiste em encontrar a melhor faixa de valores para os parâmetros sensíveis selecionados, para que haja uma melhor parametrização do modelo com as condições locais. O último passo é a validação do componente de interesse, a qual consiste na demonstração de que o modelo é capaz de realizar simulações aceitáveis. A validação se resume em rodar o modelo com os valores de parâmetros

determinados na calibração, sendo que a série de validação não pode ser a mesma da calibração (ARNOLD *et al.*, 2012).

2.4.2.1. Análise da sensibilidade

O modelo SWAT, assim como todos os modelos hidrológicos, é extremamente sensível a qualidade dos dados de entrada, logo, a precisão do modelo depende, em grande parte, dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e do quão representativos eles são (ADRIOLO *et al.*, 2008).

Alguns autores afirmam que apenas um número reduzido de parâmetros é responsável pela maior parte das modificações causadas nas saídas dos modelos, o que quer dizer que o restante dos parâmetros pode permanecer com os valores *default*, sem causar grandes impactos nos resultados avaliados. Visto que trabalhar com tantos parâmetros pode ser desnecessário, reduzi-los a um número de real influência é importante para minimizar os trabalhos (GASSMAN *et al.*, 2015).

Para auxiliar na escolha dos parâmetros que trazem real influência na modelagem, alguns autores já apresentaram estudos apontando quais os mais sensíveis, e foi possível observar que, em sua maioria, são os parâmetros relacionados com as propriedades físicas do solo, além do número da curva, o qual se relaciona com o solo e a vegetação (CIBIN *et al.*, 2010).

Destaca-se aqui que o modelo SWAT é sensível a mais de 100 parâmetros relacionados a vegetação, manejo e tipos de solo, clima, aquífero, canal e reservatórios (ARNOLD *et al.*, 1998). Por esse motivo, identificar quais os parâmetros que mais influenciam na modelagem e sua importância nos resultados gerados é importante para minimizar o trabalho do modelador. Cada um desses parâmetros influencia o modelo de forma diferente, assim, é possível chegar a resultados similares com distintas combinações dos parâmetros, mais um motivo para destacar a importância de se trabalhar apenas com os parâmetros que mais trazem influência e significado para a região em estudo.

Os parâmetros que trazem real influência na modelagem geralmente são definidos através da análise de sensibilidade do modelo à simulação de variáveis como vazão e descarga de sedimentos. Essa análise de sensibilidade pode ser feita de forma manual ou automática e

ainda analisando um parâmetro de cada vez ou avaliando parâmetros simultaneamente (análise global) (JIANG *et al.*, 2015).

A análise da sensibilidade do modelo SWAT tem sido feita em muitos estudos hidrológicos no Brasil, como por exemplo, Aragão *et al.* (2013) realizaram, de forma automática, a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo à simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma bacia no agreste nordestino; Schultz *et al.* (2011) e Salles (2012) realizaram, também de forma automática, a análise da sensibilidade dos parâmetros em relação à simulação da vazão utilizando a metodologia *Latin Hypercube - One factor At a Time* (LH-OAT), específica para a versão SWAT 2005; e Brouziyne *et al.* (2017) realizaram, de forma manual, a análise da sensibilidade dos parâmetros em relação à simulação da vazão de uma bacia localizada na região semiárida de Marrocos, utilizando a metodologia da análise de sensibilidade relativa proposta por Haan (2002), em seu livro *Statistical methods in hydrology*.

Finalizada a análise da sensibilidade, procede-se para a calibração do modelo, tendo como foco, prioritariamente, os parâmetros identificados como os mais sensíveis. Na calibração objetiva-se reduzir o erro entre os dados observados e os modelados, estimando-se os valores dos parâmetros de forma que estes possam traduzir as características locais (ADRIOLO *et al.*, 2008).

2.4.2.2. Calibração

A calibração de um modelo consiste na procura de valores dos parâmetros que resultem em uma boa concordância entre os dados observados e os modelados, minimizando o erro.

O processo de calibração de modelos hidrológicos pode ser conduzido tanto de forma automática, utilizando algoritmos de otimização, quanto de forma manual (MORIASI *et al.*, 2007). Para calibrar o modelo, alteram-se os valores dos parâmetros mais sensíveis de modo a ajustar o modelo aos dados observados, sempre comparando as previsões do modelo com esses dados observados (DAGGUPATI *et al.*, 2015).

Na calibração manual, altera-se cada parâmetro que possa ter influência para a variável em ajuste. Nesse caso, altera-se um parâmetro por vez e executa-se o modelo para verificar as mudanças nos valores de saída, repetindo o processo até que um ajuste aceitável seja obtido (NEITSCH *et al.*, 2007). A calibração manual é considerada mais exigente e mais trabalhosa porque pode levar mais tempo para ser concluída (BROUZIYNE *et al.*, 2017).

Já a calibração automática facilita esse processo porque utiliza técnicas numéricas e/ou computacionais de otimização (BRAVO *et al.*, 2009). Ela consegue lidar ao mesmo tempo com grande número de parâmetros, embora nem sempre o ajuste ideal (global) seja alcançado. Ela estima os valores dos parâmetros com base na técnica da modelagem inversa, que ajustam os valores modelados aos valores observados em análise (SARMENTO, 2010).

O período utilizado para a calibração deve abranger de períodos de cheias a períodos de estiagens, tendo em vista o objetivo da simulação de séries contínuas de dados, fornecendo ao modelo condições de simular adequadamente a maior amplitude possível de informações (DURÃES, 2010).

Segundo Griensven (2007), o procedimento de calibração do modelo deve seguir a ordem: processos hidrológicos, aporte de sedimentos e qualidade da água e, esse mesmo autor ainda afirma que, para calibrar o balanço hídrico e o escoamento, é necessário conhecer as condições reais que ocorrem na bacia.

Concluído o processo de calibração do modelo e alcançados bons resultados na modelagem verificados através de testes estatísticos, parte-se para a validação.

2.4.2.3. Validação

A validação é o processo de executar o modelo calibrado para um intervalo de tempo diferente do utilizado na calibração e comparar suas estimativas com dados observados. O objetivo da validação é demonstrar a capacidade do modelo em realizar simulações suficientemente acuradas para períodos não calibrados (ARNOLD *et al.*, 2012). O desempenho da validação também é verificado através de testes estatísticos.

2.4.2.4. Análise estatística

Na avaliação estatística do desempenho do modelo, os dados modelados são comparados aos dados observados. Segundo Arnold *et al.* (2012), os mais utilizadas para calibração e validação do SWAT são os coeficientes de determinação (R^2) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), os quais estão descritos nas Equações 4 e 5, respectivamente. O coeficiente R^2 varia de 0 a 1, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe assume valores entre $-\infty$ e 1.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Qobs - \bar{Q}obs)(Qsim - \bar{Q}sim)]^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs - \bar{Q}obs)^2 \sum_{i=1}^n (Qsim - \bar{Q}sim)^2} \right] \quad (4)$$

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qsim - Qobs)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs - \bar{Q}obs)^2} \right] \quad (5)$$

Onde:

Qobs é o valor observado;

Qsim é o valor simulado;

$\bar{Q}obs$ é a média do valor observado;

$\bar{Q}sim$ é a média do valor simulado;

n é a quantidade de dados da série.

O NSE varia de -∞ e 1. Valores negativos significam que a média dos dados observados prediz melhor os resultados que o valor modelado, o que indica uma performance inaceitável para o modelo. Valor igual a 1 (um) corresponde a uma perfeita aderência entre a variável modelada e a observada. Valor igual a 0 (zero) indica que a predição do modelo é tão acurada quanto a média dos dados observados. Já o R^2 varia de 0 a 1 e define a proporção da variância nos dados medidos que é explicada pelo modelo. Valores próximos de 1 indicam menor variância do erro. (MORIASI *et al.*, 2007).

Conforme Moriasi *et al.* (2007), em modelos que utilizam dados mensais para a modelagem, quando o valor de NSE resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado muito bom. Para valores de NSE entre 0,65 e 0,75, o desempenho é considerado bom, entre 0,5 e 0,65, o desempenho é considerado satisfatório e enquanto valores inferiores a 0,5 fazem com que o modelo seja julgado como insatisfatório. Segundo o mesmo autor, para o R^2 , valores acima de 0,50 são considerados aceitáveis.

Em modelos fisicamente baseados, como o SWAT, os valores associados aos parâmetros devem ser realistas e, portanto, os resultados serão representativos quando, na análise estatística, apresentarem um valor bom. Com isso, o sucesso da aplicação desse modelo, numa região em que não há estudos da análise da sensibilidade, possibilitará que os resultados, quando considerados bons, sejam extrapolados para bacias de características semelhantes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

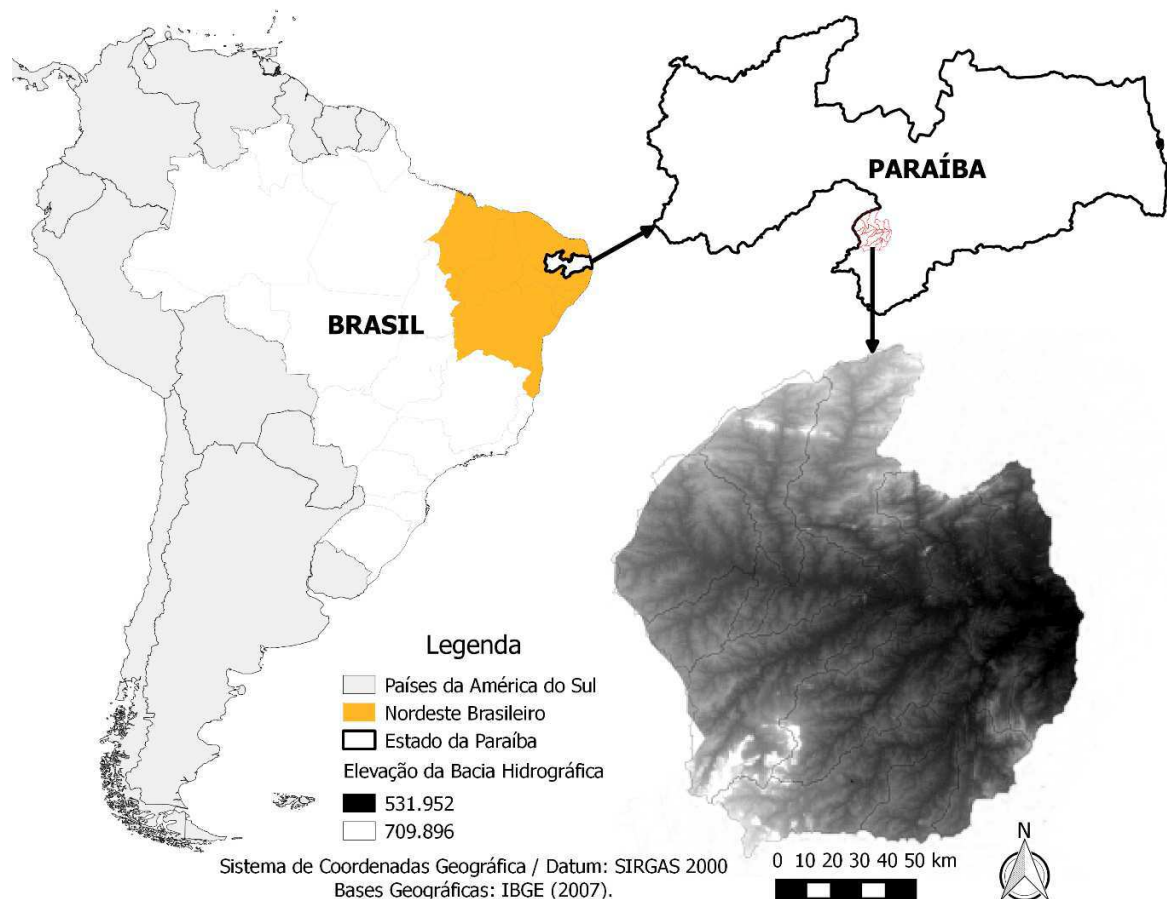
3.1. CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à porção da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé. Este açude está localizado na cidade de Sumé, em uma região denominada Cariri, no estado da Paraíba. Foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) no período de 1957 a 1962 para uma capacidade inicial de armazenamento de cerca de 45 milhões de m³ de água. O açude passou a operar no ano de 1962, com o propósito de atender aos usos múltiplos de água e de contribuir com o perímetro irrigado de Sumé.

A bacia hidrográfica a montante da barragem do açude possui uma área de 770 km². Ela abrange os municípios Prata, Ouro Velho e uma parcela dos municípios Amparo, Sumé e Monteiro.

Na Figura 1 a seguir é possível ver a localização da bacia no estado da Paraíba:

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.

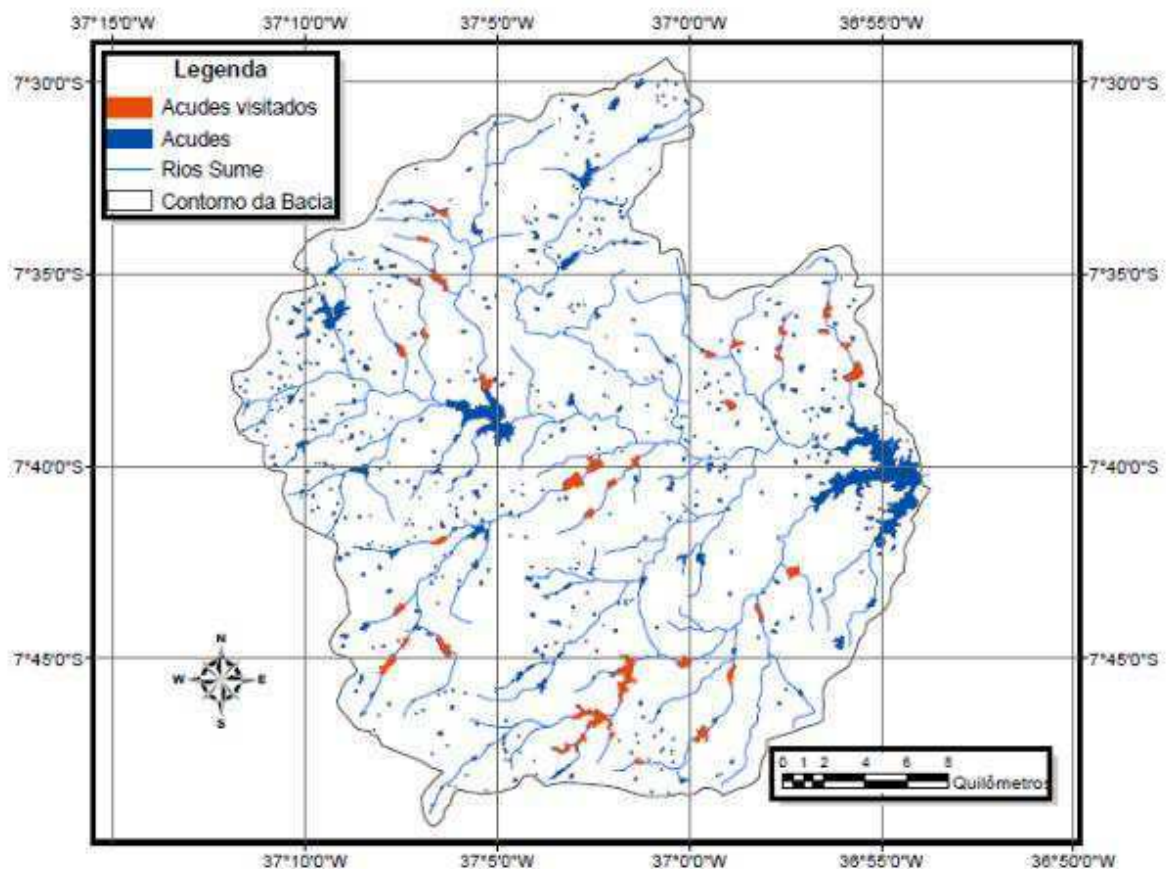


Os recursos hídricos dessa bacia hidrográfica são afetados pelas características climáticas da região e pelo elevado número de açudes a montante da barragem do açude Sumé. Esse elevado número de açudes se justifica pela política de construção de reservatórios com o objetivo de sanar a carência de água nas épocas de seca, muito promovida na região semiárida, mas que é feita de forma indiscriminada.

A bacia hidrográfica a montante da barragem do açude de Sumé possui 631 pequenos açudes que estão espalhados entre os 770 km² da bacia. Desses, 620 são pequenos açudes com área inferior a 20 ha. De acordo com a ATECEL (1993), entre os anos 1984 e 1990 foram construídos 75 reservatórios de pequeno porte na bacia, 1 açude público de médio porte (Cinco Vacas) e 1 açude particular de grande porte (São Paulo). Anos depois, em 2008, em um levantamento feito através de imagens do satélite LANDSAT5, foram encontrados nesta mesma bacia, 631 espelhos de água (SILVA *et al.*, 2009).

Na Figura 2 a seguir é possível visualizar a bacia hidrográfica e os açudes nela inseridos.

Figura 2 – Mapa da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.



Fonte: Silva *et al.* (2009).

Nessa bacia, o volume de água superficial escoado é armazenado em açudes de pequeno, médio e grande porte, distribuídos nas barragens à montante do açude principal, provocando a redução de afluentes que deságuam no corpo hídrico principal, o açude Sumé (COLLISCHONN *et al.*, 2011). O açude particular São Paulo, construído com capacidade de armazenamento de 20 milhões de metros cúbicos de água, juntamente com os açudes Prata II e Ouro Velho, com capacidade de 1,3 e 1,7 milhões de metros cúbicos de água, respectivamente, e com os outros reservatórios de menor porte, todos a montante, barram as águas que deveriam encher o açude Sumé. Conforme Santos *et al.* (2011), o número de açudes existentes nesta área é muito elevado, os quais controlam cerca de 30 a 50% da superfície da bacia de alimentação e possuem volume total de armazenamento entre 25 e 50% do volume natural médio escoado. Para esses mesmos autores, a porcentagem de contribuição de água da precipitação na bacia hidrográfica para a recarga do açude Sumé é de 5%.

Os açudes da bacia a montante da barragem do açude público Sumé estão distribuídos com uma densidade de aproximadamente um açude por km², superior à densidade que Molle & Cadier (1992) consideram aceitável, que é de um açude para 1,5 km². De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), em bacias que possuem solos rasos e com rochas menos porosas e de baixa permeabilidade, a densidade de drenagem é mais elevada, e essas características realmente são verificadas na bacia.

A importância de analisar a densidade de açudes na bacia se justifica porque, quanto maior o número de açudes na bacia, maior a irregularidade de escoamento nela, isso porque a drenagem da bacia será interceptada por reservatórios, promovendo a diminuição do volume escoado até o exutório da bacia, e quanto maior a capacidade de armazenamento de água dos açudes, mais eles interceptarão a água escoada.

Segundo Silva (2010), o açude Sumé, além de ter seus recursos hídricos influenciados pelo elevado número de açudes a montante da sua barragem, ainda sofre com problemas socioambientais como lançamentos de lixo a montante deste reservatório.

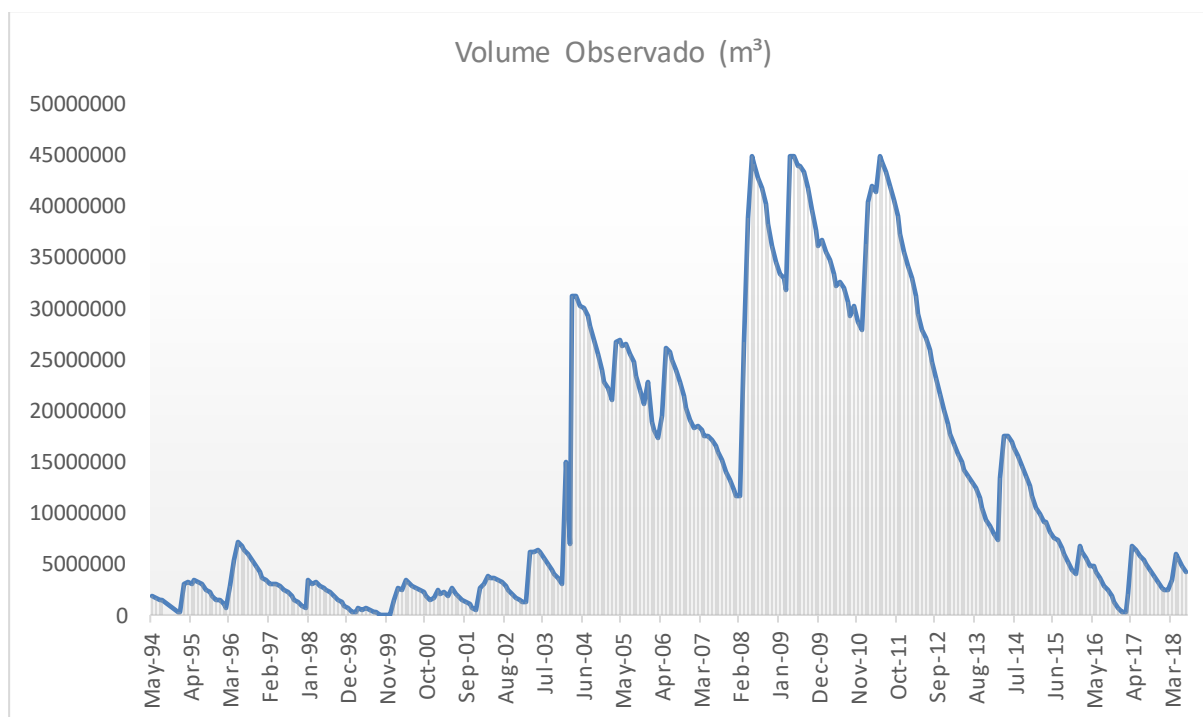
Dantas (2018), analisando a bacia hidrográfica da área em estudo, fez uma observação sobre os períodos de secas e cheias que ela enfrentou. Ele dividiu a séries de dados de sua pesquisa em períodos de acordo com a relação chuva-vazão-volume dos açudes da bacia e classificou as séries de dados da seguintes forma: período de anos secos e normais de 1994 a 2003; período de anos chuvosos e normais de 2004 a 2011; período de anos secos de 2012 a

2016. Essa nomenclatura está relacionada às características dos totais mensais de precipitação, onde anos com chuvas muito abaixo da média foram classificados com secos, próximos a média como normais e acima da média como chuvosos.

O último período de seca enfrentado pela região semiárida brasileira, que durou de 2012 a 2016, ficou marcado por caracterizar a crise de abastecimento público de água nas cidades abastecidas por reservatórios que tiveram seu volume de água reduzido drasticamente após o início da estiagem.

Sabe-se que a região semiárida brasileira sofre secas desde a formação territorial do Brasil, no entanto, a ocorrência das secas não segue um padrão definido, isso porque nenhuma seca é igual a outra e também porque não é possível prever quando ela irá ocorrer novamente e quanto tempo irá durar. As secas hidrológicas, que marcam a região semiárida com rios e reservatório com volumes abaixo do normal, foram recorrentes nos períodos secos citados por Dantas (2018). Esse comportamento pode ser observado para o açude Sumé, através do Gráfico 1 a seguir:

Gráfico 1 – Volume do açude Sumé de 1994 a 2018.



Fonte: AESA (2019).

A série histórica de dados de volume se inicia após a seca de 1990 a 1993. Durante esse período os açudes da região apresentavam volumes baixos. Em 1994, embora houvesse um total

precipitado maior que nos anos anteriores, o açude Sumé ainda apresentava volume muito baixo, cerca de 5% da capacidade, isso porque ao longo desse ano, o escoamento gerado pela precipitação ao longo da bacia era interceptado pelos reservatórios a montante do açude, que necessitavam de água para suas recargas, o que impedia que a água chegasse no açude. A partir de 2004, quando se inicia anos chuvosos e normais, o escoamento gerado na bacia foi capaz de elevar o volume do açude, principalmente até o início do ano de 2008, mas só após fevereiro desse mesmo ano, o açude recebeu recarga suficiente para atingir a sua capacidade máxima. A situação do açude permaneceu confortável até o final de 2011, e em 2012, ano já configurado como seco, o volume passou a cair continuamente até metade de 2014, sendo que a seca hidrológica da região perdurou até 2016. Os anos de 2017 e 2018 foram chuvosos e normais, mas o açude não conseguiu repor grandes quantidades de volume.

3.1.1. Clima

A bacia hidrográfica está situada em uma região onde predomina, o clima semiárido BSh, segundo a classificação de Köppen (1948), caracterizado por escassez de chuvas e desigualdade na sua distribuição, forte insolação, precipitação anual em torno de 600 mm, temperaturas elevadas, forte evaporação e pela alternância de duas estações nitidamente determinadas: a das chuvas, também chamada de inverno e a da seca, ou verão. As chuvas ocorrem com maior intensidade nos meses de março a junho. De acordo com o DNOCS (2019), a evaporação anual pode chegar até 2800 mm em tanque classe A.

3.1.2. Vegetação

A vegetação do local é a caatinga hiperxerófila densa, caracterizada por ser resistente a escassez de água nos períodos de estiagem. Há a presença de florestas caducifólias, ou seja, as folhas caem nas épocas de estiagem, e arbustos espinhosos, plantas herbáceas e cactos. Apresenta poucas árvores e arbustos esparsos, não apresentando uma cobertura vegetal contínua (BARROS, 2010). A vegetação dessa região possui alta capacidade de adaptação à escassez hídrica, seus recursos bioquímicos e físicos a tornam altamente adaptada aos longos períodos de estiagem da região (RIBEIRO, 2014).

3.1.3. Relevo

Para a área de estudo o relevo varia predominantemente de ondulado a plano, com altitude variando entre 532 a 710 m.

3.1.4. Geologia

A bacia está totalmente situada sobre embasamento cristalino pré-cambriano. Seu subsolo é impermeável e por esse motivo é possível afirmar que não existe aquífero generalizado sob a bacia.

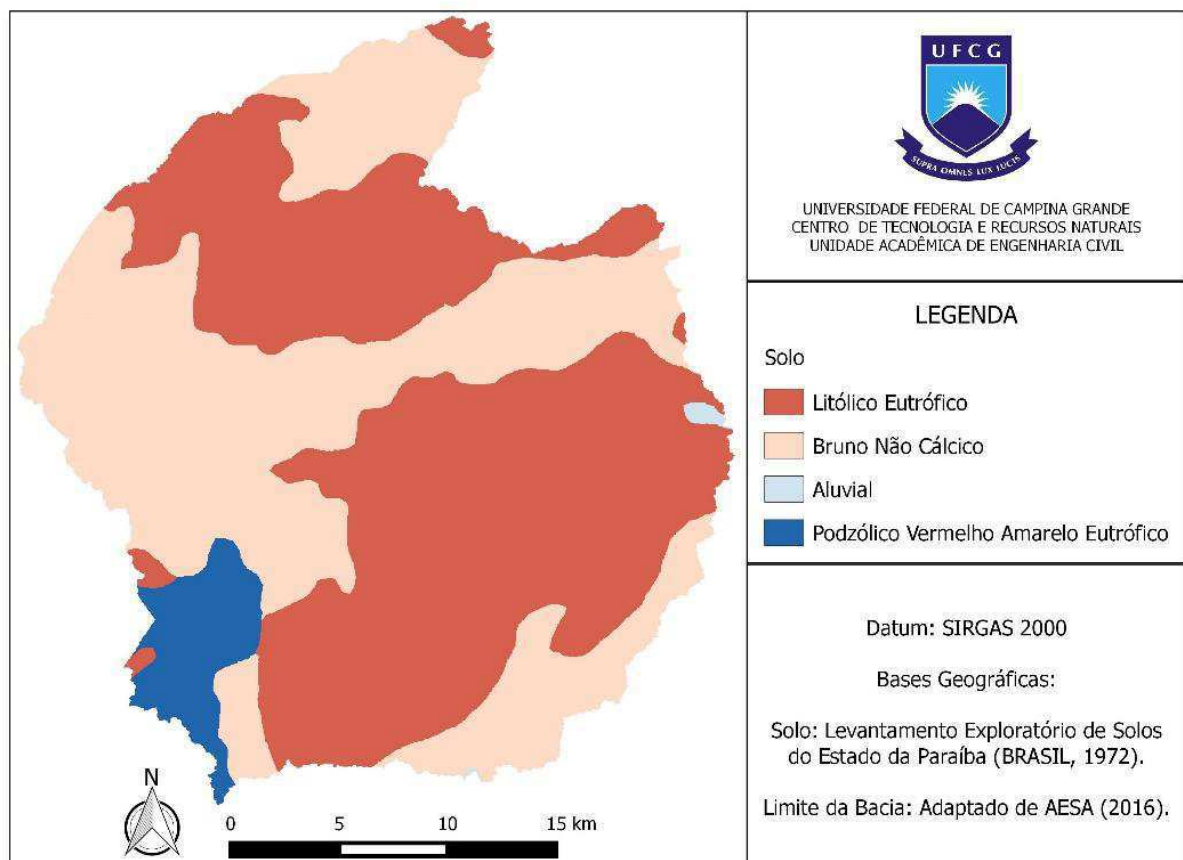
Apesar dessa característica, é possível encontrar lençóis confinados nas falhas ou nas formações aluviais superficiais, normalmente perto dos rios.

3.1.5. Solo

Os solos integram uma região localizada geologicamente no complexo cristalino brasileiro. Os tipos de solo predominantes são Litólico Eutrófico, Bruno Não Cálcico, Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico e Aluvial.

A Figura 3 a seguir apresenta o mapa de solos da bacia:

Figura 3 – Mapa de solos da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.



Os dados de solo foram obtidos do Levantamento Exploratório de Solos do Estado da Paraíba (BRASIL, 1972). Os perfis de solo foram determinados de acordo com as características físicas similares com as da área de estudo.

Os solos encontrados na bacia, de acordo com a nova classificação de solos da EMBRAPA (2006), foram identificados como:

Solos Aluvias, classificados como Neossolos Flúvicos, que são solos com horizonte A e que possuem pouco potencial de escoamento superficial devido a sua alta taxa de infiltração. Eles variam de bem drenados a excessivamente drenados. Esses solos ocorrem em áreas de várzeas às margens dos cursos d'água, sendo mais evidentes às margens do açude Sumé, cuja barragem se encontra no exutório da bacia.

Já os solos Bruno Não Cálcico e Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico foram classificados como Luvisolos. São solos com moderadas taxas de infiltração e erosão. Podem variar de horizonte B para o horizonte A e normalmente são solos pouco profundos. São bem característicos de regiões semiáridas podendo ou não apresentar pedregosidade na parte superficial.

Por último, o Solo Litólico Eutrófico foi classificado como Neossolo Litólico, que é um solo muito pouco desenvolvido, bastante raso, normalmente não ultrapassam 50 cm de profundidade, com alto potencial erosivo e com baixa cobertura vegetal apresentando contato direto dentre o horizonte A e o C,

A Tabela 2 a seguir traz o resumo dos solos encontrados na bacia.

Tabela 2 – Solos presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.

Solo	Nova Classificação	Área (km ²)	%
Litólico Eutrófico	Neossolo Litólico	400,1	51,96
Bruno Não Cálcico	Luvisolo	331,5	43,05
Aluvial	Neossolo Flúvico	1,75	0,22
Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico	Luvisolo	36,7	4,76

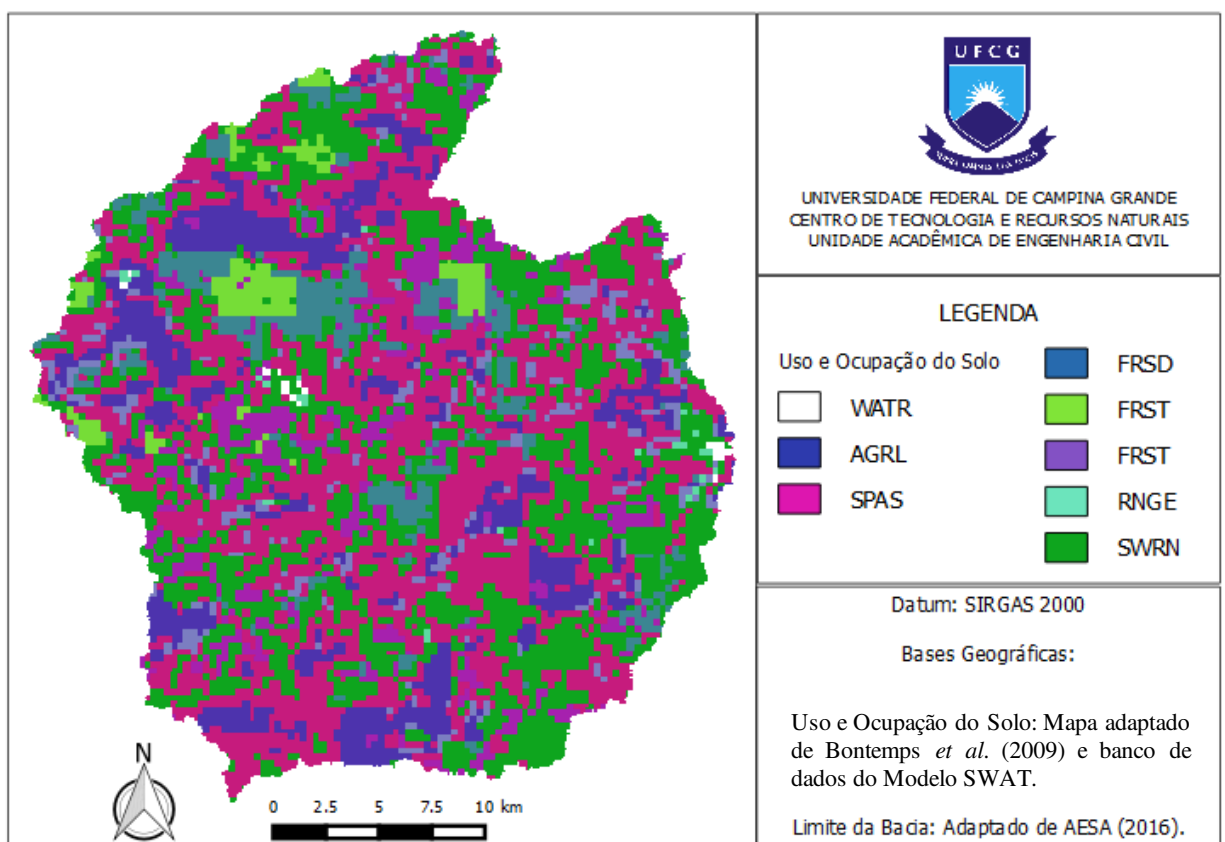
Fonte: Autoria própria.

3.1.6. Uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir do mapa produzido no estudo de Bontemps *et al.* (2009).

O mapa desse estudo em conjunto com o banco de dados do modelo SWAT para o uso de solo resultou no mapa de uso e ocupação do solo da bacia, que pode ser visto na Figura 4 a seguir:

Figura 4 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.



Como o modelo SWAT foi desenvolvido nos Estados Unidos (EUA), as classes de uso e cobertura do solo existentes no banco de dados são oriundas deste país. Para Arnold *et al.* (2012) para compor a lista do banco de dados do SWAT, buscou-se incluir as culturas mais importantes economicamente e também aquelas que são amplamente difundidas no território, logo, essa lista não abrange todos os usos do solo existentes no mundo.

É muito comum, nos estudos envolvendo o modelo SWAT, que os tipos de cobertura existentes na bacia hidrográfica de estudo sejam associados com as classes presentes no banco de dados do programa. Como exemplo, Silva e Medeiros (2014) utilizando o modelo SWAT

para analisar a variabilidade do escoamento superficial na bacia experimental do São João do Cariri, localizada na região semiárida da Paraíba, Brasil, associaram a classe de Caatinga Arbustiva como RNGE, classe marcada por variedade de gramíneas, e a Caatinga Arbustivo-arbórea como RNGB, classe marcada por arbustos ou pequenas árvores densas.

Conforme Perazzoli *et al.* (2013), a cobertura agrícola genérica (AGRL) considera que o uso do solo na bacia é de agricultura anual e todos os cultivos e formas de manejo são uniformes. A floresta mista (FRST) é representada como uma mudança entre floresta de coníferas e floresta decidual de folhas largas. A floresta decidual (FRSD) é um tipo de floresta que ocorre em clima estacional, o qual determina a semideciduidade da folhagem da cobertura florestal. A cobertura vegetal composta por pastagens é representada pela classe PAST no modelo SWAT e são consideradas as espécies perenes.

O modelo também possibilita aprimorar ainda mais esse tipo de cobertura, trazendo classes como pastagens de verão (SPAS) e pastagens de inverno (WPAS). Para Moreira (2002), as pastagens são formadas por culturas de plantas utilizadas geralmente por animais em pastoreio no próprio local em que se desenvolvem. Este tipo de cobertura vegetal geralmente fica exposta a ações de desfolhação e pisoteio pelos animais, sendo assim, as pastagens são caracterizadas por plantas de baixo porte e com potencialidade para o pastoreio.

A classe chamada de RNGB apresenta a cobertura composta por uma variedade de arbustos ou pequenas árvores densas. Os arbustos são espécies vegetais caracterizadas por possuir caule lenhoso. As culturas variadas da região Sudoeste dos EUA são representadas pela classe SWRN. O Sudoeste americano é uma região que comporta uma variedade de paisagens, como montanhas naturais, vales, planaltos e planícies. Nesta região se encontram os climas áridos e semiáridos e a mesma possui a maior dimensão territorial dos Estados Unidos.

Para o mapa da Figura 4 acima citada, segue, na Tabela 3 abaixo, o resumo do uso e ocupação do solo encontrado na bacia de acordo com o banco de dados do modelo:

Tabela 3 – Usos do solo presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.

Uso do solo	Nome	Tipo de Planta	Área (km ²)
SWRN	Culturas do Sudoeste dos EUA	Perene	225,56
FRSD	Floresta decidual	Árvore	50,53
AGRL	Agricultura genérica	Anual, estação quente	96,03
WATR	Água	-	0,83
FRST	Floresta mista	Árvore	77,88

RNGE	Gramíneas variadas	Perene	2,68
SPAS	Pastagens de verão	Perene	316,48

Fonte: Autorial própria.

Fazendo a associação dessas classes com as características da bacia, segue, na Tabela 4, a relação:

Tabela 4 – Usos do solo presentes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.

Uso do solo	Nome	Área (km ²)	%
SWRN	Vegetação arbustiva	225,56	29,29
FRSD	Vegetação arbustiva	50,53	6,56
AGRL	Culturas de milho, feijão e trigo	96,03	12,47
WATR	Água	0,83	0,11
FRST	Vegetação mista	77,88	10,11
RNGE	Vegetação herbácea	2,68	0,35
SPAS	Pastagens	316,48	41,40

Fonte: Autorial própria.

A vegetação arbustiva, com presença de cactos e plantas xerófilas, é uma característica marcante da região semiárida, sendo essa vegetação típica do bioma caatinga. A vegetação herbácea é pouco desenvolvida e rasteira. Nas pastagens também são encontradas espécies de herbáceas e arbustos, além de gramíneas. A vegetação categorizada como SWRN pelo modelo é composta por vegetação arbustiva e forrageira. Já a vegetação mista representa áreas onde há mais de um tipo de vegetação ou onde há a mudança de uma vegetação para outra.

3.1.7. Dados tabulares com características da área estudada

Foram coletados junto à Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AESAs) os dados de precipitação oriundos dos postos pluviométricos dispostos na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Postos pluviométricos utilizados no estudo.

Nome do Posto	Latitude	Longitude	Elevação
Alcantil	-7.7422	-36.0572	512
Amparo	-7.5697	-37.0639	620
Barra de São Miguel	-7.7517	-36.3181	487
Boa Vista	-7.2575	-36.2375	486
Açude Boqueirão	-7.4908	-36.1358	3533
Congo	-7.8022	-36.6586	493
Cabaceiras	-7.4922	-36.2869	397
Cacimbas	-7.2114	-37.0583	635

Camalaú	-7.89	-36.8256	519
Caraúbas	-7.7253	-36.4903	443
Coxixola	-7.6286	-36.6056	469
Desterro	-7.2903	-37.0881	592
Gurjão	-7.2478	-36.4892	491
Juazeirinho	-7.0683	-36.58	554
Junco do Seridó	-6.995	-36.7131	590
Livramento	-7.3761	-36.9492	587
Olivedos	-6.9886	-36.2436	556
Ouro Velho	-7.6206	-37.1508	595
Parari	-7.6206	-37.1508	595
Passagem	-7.1364	-37.0475	306
Prata	-7.695	-37.0842	583
Riacho de Santo Antônio	-7.6942	-36.1561	449
Salgadinho	-7.1022	-36.8453	434
São Vicente do Seridó	-7.1022	-36.8453	434
Serra Branca	-7.4819	-36.66	485
São Domingo do Cariri	-7.6331	-36.4311	417
São João do Tigre	-8.08	36.8472	571
Soledade	-7.0608	-36.3619	524
São Sebastião do Umbuzeiro	-8.1517	-37.0097	596
Sumé – fazenda Banana	-7.5068	-36.9631	664
Sumé	-7.6736	-36.8964	516
Taperoá	-7.2163	-36.8281	547
Tenório	-6.9408	-36.6294	604
Cacimba de Areia	-7.1275	37.1558	272

Fonte: INMET (2018).

Destes, o modelo seleciona o mais próximo para cada sub-bacia simulada.

Os dados climatológicos foram oriundos da estação meteorológica de Monteiro, monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Através desses dados foram definidos valores estatisticamente representativos das séries temporais da estação meteorológica para alimentar o gerador de clima (WGEN) do modelo SWAT. Como exemplo, foram inseridos, mensalmente, os seguintes parâmetros referentes à temperatura da estação meteorológica no banco de dados do modelo: a média máxima da temperatura do ar (TMPMX); a temperatura mínima média do ar (TMPMN); o desvio padrão máximo da temperatura máxima do ar (TMPSTDMX); o desvio padrão máximo da temperatura mínima do ar (TMPSTDMN) e outros.

Os dados da estação meteorológica estão dispostos na Tabela 6 adiante:

Tabela 6 – Posto meteorológico utilizados no estudo.

Nome do Posto	Latitude	Longitude	Elevação
Monteiro	-7.88	-37.06	606.6

Fonte: INMET (2018).

Caso falte alguns dados na série histórica observada, o próprio modelo se encarrega de gerá-los, por meio do gerador de clima WGEN, a partir de equações e processos estáticos que determinam a precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar para o dia onde não tem dados observados (NEITSCH *et al.*, 2005).

Os dados de evapotranspiração potencial também foram obtidos junto ao INMET. Esses dados foram calculados através de um tanque classe A da estação meteorológica de Monteiro.

Os dados mensais de volume do açude Sumé e suas demais informações, além das informações sobre os açudes São Paulo e Prata II necessárias para a modelagem, foram coletadas junto à AESA, no período de 1994 a 2018. Esses dados também estão disponíveis no *website* da AESA.

3.2. A MODELAGEM

3.2.1. *Softwares* utilizados

O QSWAT 1.7, versão 2012, foi utilizado através da interface SIG *Quantum* GIS 2.6.1 para simular o volume do açude Sumé. Para analisar os dados de volume, através de gráficos, foi utilizado o *software Excel*.

3.2.2. Dados de entrada do modelo SWAT

O modelo SWAT necessita de três diferentes arquivos geoespaciais para iniciar a modelagem, e são: o modelo digital de elevação (MDE) da bacia, o mapa de solo da área de estudo e o mapa de uso e ocupação do solo. Além desses dados, são necessários dados tabulares referentes às condições climáticas da região de estudo (precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa). É opcional a inserção de dados de precipitação e evapotranspiração, pois o modelo pode simular estes dados. Mas caso haja disponibilidade dos mesmos, é recomendável utilizá-los para aumentar a acurácia da

modelagem. Além destes, são necessárias informações sobre os reservatórios da bacia, caso estes venham a ser considerados na modelagem.

Para a utilização do modelo, o MDE utilizado é originário da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). É o MDE que faz a delimitação automatizada da bacia, para gerar a rede de drenagem da área e dividir a bacia em sub-bacias de acordo com o relevo. O MDE também é utilizado para o cálculo de parâmetros de área, declividade média e elevação para cada sub-bacia.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir do mapa produzido no estudo de Bontemps *et al.* (2009).

Os dados para criar o mapa de solo foram obtidos do Levantamento Exploratório de Solos do Estado da Paraíba (EMBRAPA, 1972). Os perfis de solo foram escolhidos de acordo com as características físicas semelhantes com as da área de estudo.

O conjunto de informações tabulares com os dados de precipitação oriundos dos postos pluviométricos da região foram coletados junto à AESA. Os dados climatológicos e os dados de evapotranspiração potencial foram oriundos da estação meteorológica de Monteiro, monitorada pelo INMET. As informações sobre os reservatórios necessárias a modelagem e os dados mensais de volume do açude Sumé também foram coletados junto à AESA.

Os dados de reservatórios que o modelo exige estão dispostos na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Parâmetros necessários para que o modelo simule os reservatórios.

Parâmetros	Descrição
MORES	Mês de início de operação do reservatório
IYRES	Ano de início de operação do reservatório
RES_ESA (ha)	Área do espelho d'água do reservatório no vertedouro de emergência
RES_EVOL (10^4 m ³)	Volume de água do reservatório no vertedouro de emergência
RES_PSA (ha)	Área do espelho d'água do reservatório no vertedouro principal
RES_PVOL (10^4 m ³)	Volume de água do reservatório no vertedouro principal
RES_VOL (10^4 m ³)	Volume de água no reservatório no início da modelagem
RES_SED (mg/l)	Concentração inicial de sedimentos em suspensão no reservatório
RES_NSED (mg/l)	Equilíbrio da concentração de sedimentos no reservatório
RES_D50 (µm)	Diâmetro médio das partículas de sedimento
RES_K (mm/h)	Condutividade hidráulica no fundo do reservatório
EVRSV	Fator de evaporação do reservatório
IRESCO	Opção da simulação de retirada de água do reservatório

OFLOWMN_FPS	Saída mínima de água do volume de água do reservatório no vertedouro principal
-------------	--

Fonte: Autoria própria.

Para os açudes Sumé, São Paulo e Prata II, inseridos na modelagem, como não há a diferenciação entre vertedouro de emergência e vertedouro principal, os parâmetros relacionados a área do espelho d'água e volume de água foram os mesmos para os dois tipos de vertedouros. Devido a inexistência de dados referentes aos sedimentos, estes não foram inseridos no modelo.

O modelo também possibilita a inserção de dados de vazão de saída de água do reservatório, caso contrário, ele simula a retirada de água. Na modelagem desse estudo, foram consideradas as outorgas em vigência como vazão de saída de água para os açudes.

3.2.3. Os processos da modelagem

A primeira etapa desenvolvida no modelo SWAT foi a entrada do MDE no modelo através da ferramenta *Watershed Delineation*. Em seguida, o modelo gerou a direção do fluxo para a criação da rede hidrográfica. Após a delimitação da bacia e a criação da rede de drenagem, foram inseridos arquivos no formato *shapefile* representando os barramentos dos reservatórios Sumé, São Paulo, Prata II e Ouro Velho, selecionados previamente de forma manual. Nesta delimitação da bacia hidrográfica, o modelo gerou 44 sub-bacias. A sub-bacia 44 é a última sub-bacia antes do exutório real da bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé.

O QGIS utiliza o algoritmo *D8 flow directions* para calcular a direção e a acumulação do fluxo, sendo que neste método o fluxo é direcionado de acordo com o valor de altitude de cada *pixel*, o qual possui oito possíveis direções para o fluxo e vai na direção do pixel com menor altitude.

Foram definidas, nesta etapa, a presença de lagos, reservatórios, fontes pontuais de poluição e pontos de saída. Nessa modelagem, foram inseridos os açudes Sumé, São Paulo, Prata II e Ouro Velho sendo o barramento do açude Sumé o exutório da bacia.

Já com a bacia delimitada e a rede de drenagem definida, antes de entrar com os demais mapas geoespaciais no modelo, foram inseridos os dados exigidos com as características dos solos na base de dados do SWAT. Então, foi feita a sobreposição do mapa de uso e cobertura

do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia, para que o modelo gerasse as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).

A forma mais simples de entender o que é uma HRU, é analisando que uma área que possui um solo Bruno Não Cálcico, com Pastagens e com uma declividade de 0 a 3% irá originar um HRU, enquanto que uma outra área com o mesmo solo, Bruno Não Cálcico, com o mesmo uso do solo, Pastagens, mas com declividade diferente originará outra HRU, e assim sucessivamente. A subdivisão da bacia hidrográfica em HRU possibilita uma análise mais detalhada das diferenças de evapotranspiração, e outras componentes do ciclo hidrológico para os diferentes tipos de usos e características do solo. O escoamento superficial é medido para cada HRU e, em seguida, é quantificado o total para a bacia inteira, melhorando a análise do balanço hídrico da bacia.

A declividade da bacia em estudo foi definida de acordo com a recomendação da Embrapa (2000), que considera que uma região com declividade de 0 a 3% possui relevo plano, de 3 a 8% possui relevo suave ondulado, de 8 a 20% possui relevo ondulado, de 20 a 45% possui relevo forte ondulado e de 45 a 75% possui relevo montanhoso.

No processo de definição das URHs, optou-se por deixar o valor de 0% para o nível de sensibilidade nas três categorias apresentadas, pois essa indicação permite que todos os tipos de uso e ocupação do solo, tipos de solo e intervalos de declividade sejam considerados na modelagem, tornando o resultado mais preciso. Caso fosse limitado, por exemplo, a categoria do solo com valor limite de 5%, neste trabalho, os solos Aluvial e Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico seriam desconsiderados na modelagem, pois estão abaixo dos 5%, e o modelo redistribuiria a área para categorias que estejam acima do limite definido.

Para esse estudo, as 1426 HURs derivaram da sobreposição de 4 tipos de solos, 7 tipos de uso e ocupação do solo e 5 classes de declividade.

Definidas as URHs, foram inseridos os dados diários das variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento), assim como as médias mensais dessas variáveis (WXGEN). Caso o usuário não possua séries completas dos dados diários das variáveis climáticas, o SWAT fornece essas informações fazendo a simulação com seu próprio banco de dados. Também foram inseridos no modelo os dados de precipitação das estações pluviométricas nas proximidades da bacia para que o modelo escolhesse as

estações mais próximas, os dados de evapotranspiração e as informações sobre os açudes Sumé, São Paulo, Prata II e Ouro Velho.

Finalmente, com todas as informações inseridas, foi executado uma simulação no SWAT para o período correspondente a série histórica de dados climáticos, que foi de 01/01/1994 a 31/12/2018, onde foi possível obter a primeira simulação do volume para a área de estudo e a comparação com os dados observados. Foi considerado um período de aquecimento (*warm up*) de 2 anos para a simulação. Esse período de aquecimento é utilizado a fim de estabelecer um equilíbrio das condições hidrológicas iniciais do modelo.

Por conseguinte, depois de ter sido realizado todas essas etapas de processamento do modelo (delineamento da bacia, definição das HRU's, e definição dos dados meteorológicos), o QSWAT estava pronto para iniciar o processo de parametrização do modelo, que envolve análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração (manual e/ou automática) e análise estatística e, finalmente, a validação.

3.2.4. Análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo

A análise sensibilidade dos parâmetros foi feita para fornecer uma melhor compreensão de quais parâmetros têm maior efeito na saída do modelo. Para definir os parâmetros mais influentes na predição do volume do açude Sumé, a análise de sensibilidade foi realizada utilizando a análise de sensibilidade relativa (S_r) proposta por Haan (2002), em seu livro *Statistical methods in hydrology*. Essa metodologia foi avaliada ainda em 2002 por Lenhart *et al.* (2002) e utilizada com sucesso mais recentemente por Brouziyne *et al.* (2017), que realizou, de forma manual, a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT em relação à simulação da vazão de uma bacia semiárida em Marrocos.

Na Equação 6 a seguir é possível visualizar a forma de calcular a sensibilidade relativa (S_r) de cada parâmetro proposta por Haan (2002):

$$S_r = \left[\frac{[(OP + \Delta P) - (OP - \Delta P)]}{\frac{2\Delta P}{P}} \right] \quad (6)$$

Onde:

S_r é a sensibilidade relativa;

$OP + \Delta P$ é a saída do modelo com o parâmetro de entrada que está sendo estudado definido como sendo um valor igual ao valor inicial mais uma porcentagem especificada;

$OP - \Delta P$ é a saída do modelo com o parâmetro de entrada que está sendo estudado definido como sendo um valor igual ao valor inicial menos uma porcentagem especificada;

OP é a saída do modelo com o parâmetro de entrada definido como sendo o valor inicial;

ΔP é a diferença absoluta do valor do parâmetro de entrada; e

P é o valor inicial do parâmetro de entrada.

A sensibilidade relativa é sem unidade e, portanto, pode ser utilizada para comparar sensibilidades entre parâmetros (Haan, 2002). Em relação à faixa de variação (ΔP) utilizada na equação de análise de sensibilidade relativa (S_r), Lenhart *et al.* (2002), utilizaram em seu estudo, uma porcentagem de variação de P de 10 e 25%, e o ranking da sensibilidade dos parâmetros foi o mesmo para ambas as abordagens.

Neste estudo, ΔP foi tomado como 25% de P , exceto em alguns casos em que uma alteração de 25% resultaria em um valor fora dos limites estabelecidos para os parâmetros do SWAT.

A forma de avaliar os resultados obtidos na análise da sensibilidade relativa (S_r) também foi sugerida por Lenhart *et al.* (2002), onde quatro classes de sensibilidade foram especificadas. Na primeira classe, o S_r apresenta valores entre 0 e 0,05; na segunda classe, os valores estão entre 0,05 e 0,20; na terceira classe, entre 0,20 e 1,00; e na quarta classe valores maiores que 1, sendo que os parâmetros tem a sensibilidade classificada como, respectivamente, baixa, média, alta e muito alta.

O método de análise de sensibilidade descrito acima é trabalhoso, mas simples de executar. Ainda, deve-se lembrar que esse método não considera interações entre parâmetros.

Para definir quais parâmetros, nessa pesquisa, seriam analisados através da sensibilidade relativa (S_r), inicialmente, foi feita uma compreensão dos processos hidrológicos da bacia em estudo. Para os parâmetros que influenciam no fluxo de base, por exemplo, é importante analisar as características da região. Como já citado nesse trabalho, a bacia está situada em uma região sob o embasamento cristalino pré-cambriano, ou seja, possui rochas de baixa permeabilidade e porosidade, o que não permite que ocorra armazenamento de água subterrânea ou subsuperficial com grande expressividade.

Ainda, de acordo com Siqueira (1964), as fendas existentes no substrato não são interligadas, o que não permite assim, o fluxo subterrâneo. Esse mesmo autor cita que há o contato direto do solo com as rochas, o que, de acordo com Dantas (2018), colabora para a predominância de rios efêmeros e intermitentes na região, pois os mesmos não recebem contribuição significativa do fluxo subsuperficial ou subterrâneo, e dependem, essencialmente, da contribuição da chuva para que o escoamento ocorra.

Portanto, foram analisados parâmetros que, essencialmente, trazem influência sobre o escoamento superficial e fluxo subsuperficial e subterrâneo. Os parâmetros escolhidos foram:

- 1) CANMX – parâmetro que quando aumentado, diminui o valor de escoamento superficial. Isso ocorre porque quanto maior a quantidade de água interceptada pela vegetação, menor será o escoamento superficial gerado e vice-versa;
- 2) ESCO – parâmetro que quanto menor o valor, menor é a recarga potencial de aquíferos, isso porque na modelagem, quanto menor esse valor, mais o modelo será capaz de extrair água de níveis mais baixos do solo;
- 3) CN2 – parâmetro geralmente muito influente em modelagens hidrológicas, em especial para a geração de escoamento superficial, isso porque um aumento na porcentagem de CN2 provoca um aumento no escoamento superficial, conseqüentemente infiltra menos água e a recarga dos aquíferos é reduzida;
- 4) EPCO – parâmetro que é função da quantidade de água necessária para a transpiração, evaporação e a quantidade de água disponível no solo. Quanto maior o valor de EPCO, mais água pode ser direcionada para as camadas mais baixas do solo e, portanto, menor a lâmina escoada;
- 5) GWQMN – parâmetro que indica o limite da profundidade de água no aquífero raso necessário para que ocorra fluxo de retorno, e quanto mais baixo o valor desse parâmetro, mais haverá fluxo de base;
- 6) GW_REVAP – parâmetro que indica coeficiente de retorno da água subterrânea por evaporação;
- 7) REVAPMN – parâmetro que traz a ideia de que o movimento de água de um aquífero raso para a zona insaturada é permitido apenas se o volume de água no aquífero raso é maior ou igual ao REVAPMN;
- 8) RCHRG_DP – parâmetro que representa a fração de água percolada do aquífero raso para o aquífero profundo;

- 9) GW_DELAY – parâmetro que quanto maior, menor é a recarga do aquífero raso, isso porque mais água entra e flui na zona vadosa;
- 10) SOL_AWC – parâmetro que quando é aumentado, tem o fluxo de base e o escoamento superficial diminuído, porque haverá um maior teor de umidade disponível para as plantas nas camadas de solo;
- 11) ALPHA_BF – parâmetro que quando aumentado, aumenta a recarga do aquífero e diminui o fluxo de base;
- 12) SURLAG – parâmetro que quanto maior for o seu valor, mais água é liberada para o canal principal aumentando a geração de fluxo.

Além disso, foram definidos os limites iniciais de variação dos parâmetros e o método de variação dos mesmos, que pode ser por adição (adição de um valor constante ao valor inicial); multiplicação (variação do valor inicial por porcentagem); e substituição direta (alteração do valor diretamente). Uma observação importante sobre o método de alteração dos parâmetros é que aqueles que possuem referencial espacial, ou seja, que podem apresentar diferentes valores para diferentes pontos da bacia, devem ser sempre alterados pelo método da multiplicação, para que mantenham seu referencial espacial, porque corre-se o risco de homogeneizar os valores desses parâmetros para toda a bacia, o que seria extremamente prejudicial aos resultados. O parâmetro CN2, por exemplo, deve ser sempre alterado pelo método da multiplicação.

A Tabela 8 abaixo traz os 12 parâmetros incluídos na análise de sensibilidade, seu método de variação, seus intervalos de variação e o processo que influenciam.

Tabela 8 – Parâmetros incluídos na análise da sensibilidade.

Parâmetro	Método de Variação	Intervalo	Processo
GWQMN	Substituição direta	500 a 5000	Água subterrânea (.gw)
GW_REVAP	Substituição direta	0,02 a 0,2	Água subterrânea (.gw)
REVAPMN	Substituição direta	0 a 1000	Água subterrânea (.gw)
RCHRG_DP	Substituição direta	0 a 1	Água subterrânea (.gw)
GW_DELAY	Substituição direta	0 a 500	Água subterrânea (.gw)
ALPHA_BF	Substituição direta	0 a 1	Água subterrânea (.gw)
CANMX	Substituição direta	0 a 100	Geração de escoamento (.hru)
ESCO	Substituição direta	0 a 1	Geração de escoamento (.hru)
EPCO	Substituição direta	0 a 1	Geração de escoamento (.hru)
SURLAG	Substituição direta	0 a 10	Geração de escoamento (.hru)
CN2	Multiplicação (%)	-	Escoamento superficial (.mgt)
SOL_AWC	Multiplicação (%)	-	Solo (.sol)

Fonte: Autoria própria.

Depois de definidos os valores limites para cada parâmetro, o usuário pode especificar de acordo com o parâmetro, em que tipo de uso, solo, declividade, HRU e sub-bacias este parâmetro pode variar. Foi estabelecido nessa pesquisa que os parâmetros escolhidos deveriam variar em todos os tipos anteriormente descritos.

3.2.5. Calibração manual e análise estatística

A calibração manual foi realizada alterando-se os parâmetros mais sensíveis previamente identificados na análise de sensibilidade e realizando várias iterações manuais do modelo, com o intuito de fazer com que a contribuição de água da precipitação na bacia hidrográfica para a recarga do açude fosse em torno de 5% do total precipitado, valor esse encontrado na bibliografia dos estudos hidrológicos na região (SANTOS *et al.*, 2011). Partindo disso, os parâmetros foram sendo alterados de acordo com o conhecimento da região para obter a melhor correspondência entre os dados modelados e os dados observados de volume do açude Sumé. Essa correspondência foi monitorada através da otimização do coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e de avaliações gráfico-visuais no *software Excel*.

3.2.6. Validação e análise estatística

A validação do modelo foi realizada para verificar se os parâmetros calibrados foram selecionados adequadamente. O período para validação foi um intervalo de tempo diferente do utilizado na calibração, afim de comparar se o modelo foi eficiente na determinação do volume do açude Sumé de acordo com os parâmetros analisados. Por fim, foi feita a análise estatística da modelagem para o período validado através do R^2 e NSE.

4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

4.1. A MODELAGEM INICIAL

A primeira modelagem com o modelo SWAT foi realizada com os valores *default* (valores iniciais dos parâmetros adotados pelo modelo) para o período de 1994 a 2018, período referente aos dados climáticos disponíveis, e considerando os 2 primeiros anos como aquecimento. Foi possível perceber que a contribuição de água da precipitação na bacia hidrográfica para a recarga do açude foi muito alta, 41%, o que difere muito dos valores relatados para a região, que segundo Santos *et al.* (2011) é em torno de 5% do total precipitado.

Diante disso, buscando uma melhor representação do modelo às características da bacia, foi feita a análise da sensibilidade dos parâmetros previamente identificados para posterior calibração manual e validação do modelo, visando obter a melhor correspondência entre os dados modelados e os dados observados de volume do açude Sumé.

4.2. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade foi realizada utilizando a equação de análise de sensibilidade relativa (Sr) descrita anteriormente. Ela foi feita para 12 parâmetros do modelo SWAT, no período entre 01/01/1994 e 31/12/2008, sendo que o período entre 01/01/1994 e 31/12/1998 serviu apenas para o aquecimento do modelo. A análise dos 12 parâmetros foi feita examinando o efeito de cada parâmetro por vez na resposta do modelo. Na Tabela 9 a seguir foram listados os resultados da sensibilidade relativa (Sr). A classificação dos graus de sensibilidade foi baseada em Lenhart *et al.* (2002).

Tabela 9 – Resultado da sensibilidade relativa (Sr) dos parâmetros.

Parâmetro	Unidade	Valor default (P)	(ΔP)	Sr	Importância
GWQMN	mm	1000	+ 25/- 0	2.19	Alta
GW_REVAP	-	0.02	+ 25/- 0	0.14	Média
REVAPMN	mm	750	± 25	0.00	Baixa
RCHRG_DP	fração	0.05	± 25	0.03	Baixa
GW_DELAY	dias	31	± 25	0.16	Média
ALPHA_BF	dia	0.048	± 25	0.02	Baixa
CANMX	mm	0	+ 25/- 0	0.22	Alta
ESCO	fração	0.95	+5/-25	0.32	Alta
EPCO	-	1	+ 0/- 25	0.06	Baixa
CN2	-	67.3 (valor médio)	± 25	0.84	Alta
SURLAG	dias	2	± 25	0.00	Baixa
SOL_AWC	mm mm ⁻¹	0.12 (valor médio)	± 25	0.52	Alta

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros classificados com um grau de influência alto para esse estudo foram: CN2, SOL_AWC, ESCO, GWQMN e CANMX, e esses foram os parâmetros utilizados na calibração manual.

Os parâmetros que apresentaram maior grau de sensibilidade estão relacionados à umidade do solo (CN2), a presença da água no solo (SOL_AWC, GWQMN), evaporação da água no solo (ESCO) e interceptação da água que retrata a influência da vegetação para o escoamento superficial (CANMX).

Arnold *et al.* (2010) cita, com base em diversos estudos já realizados utilizando o modelo SWAT, que os parâmetros CANMAX, GWQMN, GW_REVAP, ESCO, EPCO e CN2 são os que mais influenciam o escoamento superficial. Desses, 4 foram significativos para esse estudo.

O parâmetro CN2 representa o valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II, a qual ocorre quando o solo não está totalmente saturado. O valor do CN2 influi na quantidade de escoamento superficial gerado na bacia hidrográfica, isso porque um aumento na porcentagem de CN2 provoca um aumento no escoamento superficial, e conseqüentemente infiltra menos água e a recarga dos aquíferos é reduzida. Para a bacia em estudo, por ela ser predominantemente rural, um valor mais baixo que a média de 67,3 para o CN2 é considerado aceitável, tendo em vista que isso promoverá uma diminuição do total escoado superficialmente, contribuindo para que a recarga do açude seja reduzida, e por isso esse parâmetro foi considerado importante.

O conteúdo de água disponível no solo (SOL_AWC) também foi um dos parâmetros mais sensíveis. Esse parâmetro representa a quantidade de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo e, portanto, um aumento do SOL_AWC resulta em uma diminuição do fluxo base e em uma diminuição no escoamento superficial. Para a região, a sensibilidade desse parâmetro indica que as plantas utilizam bastante do teor de umidade do solo.

O parâmetro GWQMN, que controla o fluxo de base na bacia, estabelece o valor limite do nível de água armazenada no aquífero raso a partir do qual há liberação do fluxo de base, e é muito importante para o balanço hídrico na bacia. Apesar de não haver aquíferos generalizados na bacia, esse parâmetro foi o mais sensível na análise da sensibilidade relativa (Sr), e a possível justificativa para isso será citada mais a frente.

Outro parâmetro com alto grau de sensibilidade foi o ESCO. O fator de compensação de evaporação do solo (ESCO), quando aumentado, diminui a profundidade do solo em que o SWAT pode atender à demanda potencial de evaporação, diminuindo a evaporação do solo e aumentando o fluxo de base.

O parâmetro CANMX quando aumentado, diminui o valor de escoamento superficial. Para a região em estudo, isso quer dizer que grande quantidade do total precipitado é

interceptado pela vegetação e conseqüentemente menor é o escoamento superficial gerado na bacia.

A sensibilidade dos parâmetros SOL_AWC, ESCO e GWQMN pode ser explicado pelo fato de que cerca de 49% da bacia hidrográfica pertence aos solos hidrológicos dos grupos A e B, definidos por taxas de infiltração de altas a moderadas e boa capacidade de drenagem, e os outros 51% pertencer a solos formados por fragmentos de rocha, que apresentam contato direto entre o horizonte A e o C e também alta taxa de infiltração.

Concluída a análise da sensibilidade, procede-se para o processo de calibração manual.

4.3. CALIBRAÇÃO MANUALE ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os parâmetros mais sensíveis à simulação do volume na bacia em estudo foram submetidos à etapa de calibração do modelo, no mesmo período utilizado para a análise da sensibilidade dos parâmetros.

A calibração manual foi feita realizando-se várias iterações manuais do modelo, com o intuito de fazer com que a contribuição de água da precipitação na bacia hidrográfica para a recarga do açude fosse em torno de 5% do total precipitado, valor esse encontrado na bibliografia dos estudos hidrológicos na região e, também, tentando adequar os parâmetros relacionados ao fluxo de base com os aspectos da bacia: solos rasos em contato com o substrato rochoso cristalino, que não permite a formação de aquíferos e que determina um fluxo subterrâneo bastante limitado.

Partindo disso, os parâmetros foram sendo alterados de acordo com o conhecimento da região para obter a melhor correspondência entre os dados modelados e os dados observados de volume do açude Sumé. Essa correspondência foi monitorada através da otimização do coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e de avaliações gráfico-visuais no *software Excel*.

Os parâmetros mais sensíveis e os valores utilizados para cada um deles estão dispostos na Tabela 10 abaixo:

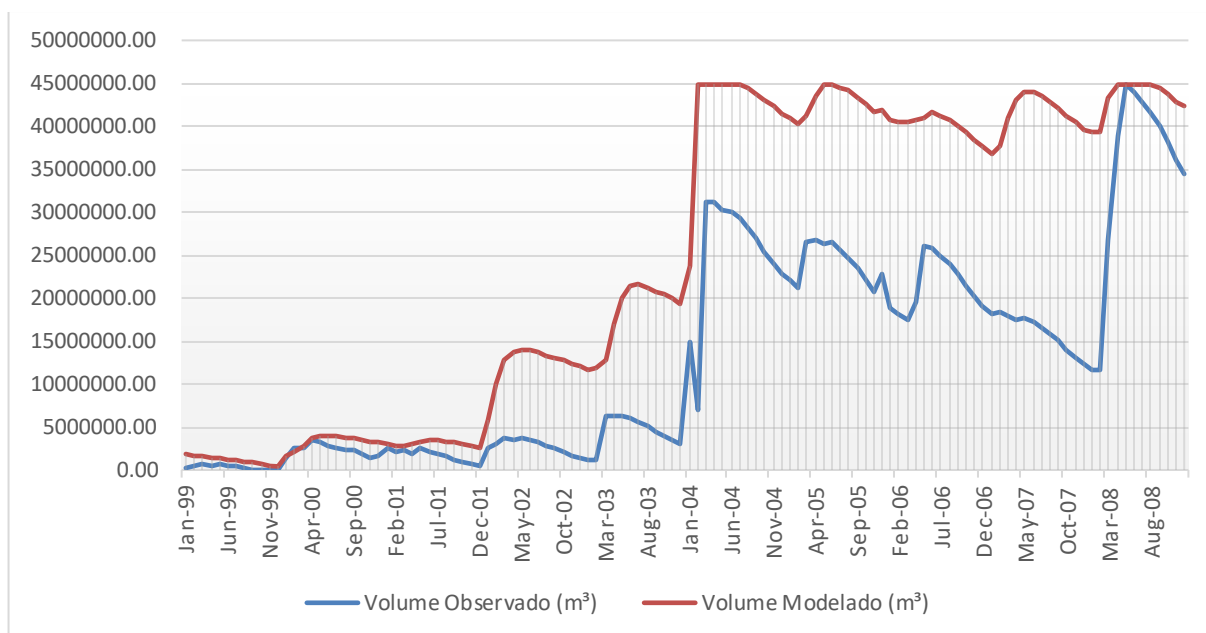
Tabela 10 – Parâmetros utilizados.

Parâmetro	Unidade	Valor <i>default</i> (P)	Valor ajustado
GWQMN	mm	1000	500
CANMX	mm	0	100
ESCO	fração	0.95	0.3
CN2	-	67.3 (valor médio)	74,45% do valor <i>default</i>
SOL_AWC	mm mm ⁻¹	0.12 (valor médio)	253,33% do valor <i>default</i>

Fonte: Autoria própria.

E no Gráfico 2 a seguir é possível visualizar o comportamento do volume do açude para o período de calibração.

Gráfico 2 – Volume observado do açude Sumé e volume modelado após a calibração dos parâmetros.



Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de correlação (R^2) obtido foi de 0,88 e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) obtido foi de 0,73, o que indica que o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente o volume do açude Sumé, mesmo tendo o superestimado em alguns anos. Portanto, o modelo é apropriado para a simulação de volume do açude e a metodologia utilizada é eficiente. Apesar de superestimar, o modelo conseguiu reproduzir o volume simulado com comportamento semelhante ao observado.

É de se imaginar que o volume foi superestimado porque o escoamento superficial não foi apresentado corretamente, visto que o modelo simulou um cenário sem a existência de vários

açudes na bacia hidrográfica a montante da barragem do açude Sumé, o que não é verificado na realidade.

O modelo SWAT foi sensível ao parâmetro GWQMN, que indica o valor limite do nível de água armazenada no aquífero raso a partir do qual há liberação do fluxo de base. Esse parâmetro foi limitado a 500 mm, devido as características dos solos da região. O valor baixo para esse parâmetro se justifica devido ao fato de não haver aquíferos generalizados na bacia e assim, a água do fluxo subsuperficial fica disponível para o fluxo de base. Como os rios da região são efêmeros e intermitentes, os mesmos não recebem contribuição significativa do fluxo de base, portanto, a água fica armazenada no solo disponível para o processo de evapotranspiração. Em uma possível análise automática, esse parâmetro analisado em conjunto com os parâmetros de evapotranspiração poderia trazer uma melhor calibração para o volume, tendo em vista que nessa calibração manual esse parâmetro foi analisado isoladamente.

O SOL_AWC, que define a capacidade de armazenamento de água armazenada no solo, importante regulador da evapotranspiração, teve uma mudança bastante significativa sobre o valor *default*, confirmando a ideia de que realmente há a possibilidade da água fica armazenada no solo e disponível para o processo de evapotranspiração, denotando a influência do uso e da cobertura do solo e das condições climáticas no escoamento superficial.

O valor baixo para o fator de compensação da evaporação de água do solo (ESCO) indica que o SWAT consegue retirar água de maiores profundidades do solo para atender a demanda potencial de evaporação, o isso permite que menos água seja direcionada para o fluxo de base.

A diminuição de CN2 provoca uma diminuição no escoamento superficial e uma consequente infiltração maior de água no solo, o que indica, também, a grande quantidade de água armazenada no solo disponível para o processo de evapotranspiração.

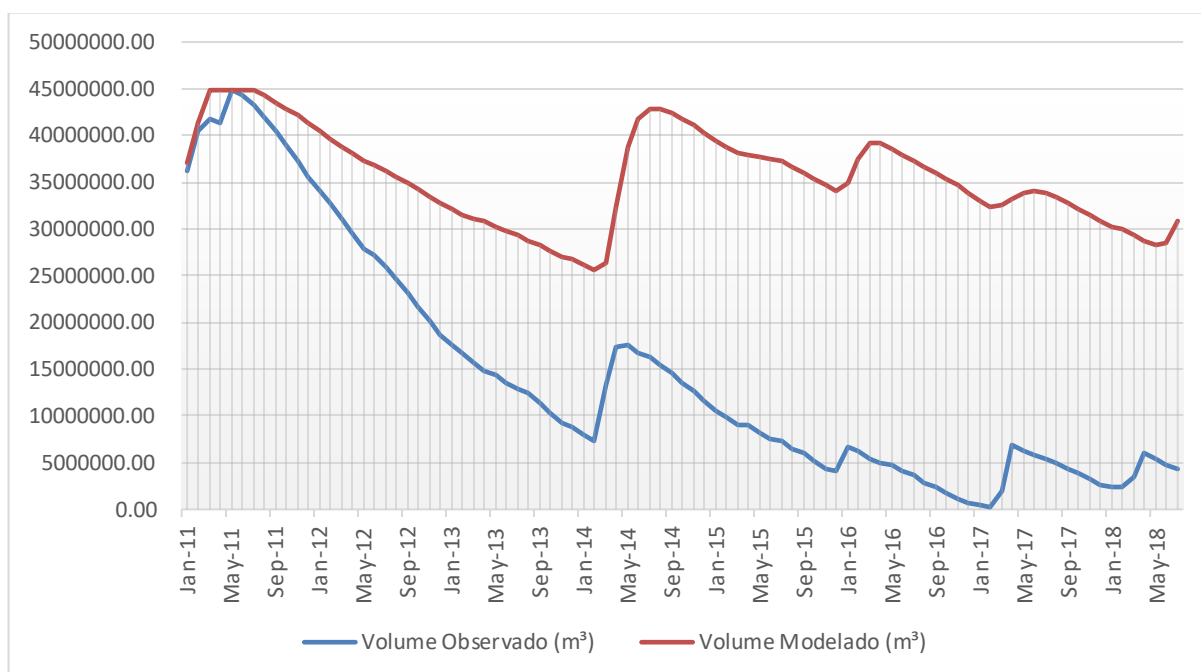
O valor máximo atualizado para o parâmetro CANMX indica que para a região em estudo, grande quantidade do total precipitado é interceptado pela vegetação e consequentemente menor atinge o solo da bacia, diminuindo o total escoado superficialmente.

4.4. VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na etapa de validação do modelo, foram utilizados os mesmos parâmetros definidos durante a calibração, sendo alterado o período da modelagem. A modelagem foi feita para o período de 2009 a 2018.

No Gráfico 3 a seguir é possível visualizar o comportamento do volume do açude para o período de validação.

Gráfico 3 – Volume observado do açude Sumé e volume modelado no período de validação.



Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,61 e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) obtido foi de 0,51, o que indica que a modelagem no período de validação também foi satisfatória.

A superestimação do volume do reservatório no período citado, principalmente no intervalo 2014 a 2018, que foram anos secos, pode ser explicada pela quantidade de pequenos reservatórios dentro da bacia que influencia diretamente o regime de fluxo, e que esses reservatórios não foram considerados na modelagem.

Faz-se aqui as mesmas ressalvas citadas para o período de calibração sobre o volume escoado na bacia. Ressalta-se ainda a necessidade de se fazer uma análise criteriosa dos

parâmetros para entender se eles estão realmente compatíveis com as características da região. Além disso, destaca-se que, o uso de produtos cartográficos de alta resolução espacial como dados de entrada em modelos hidrológicos acoplados a um SIG, são de extrema valia para uma melhor representação do uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica e, conseqüentemente, para a modelagem dos processos de chuva-vazão-volume. Neste contexto, deve-se destacar que o uso do solo utilizado na modelagem para o período de calibração pode não ser compatível com o uso do solo dos períodos de validação.

Muitos autores consideram que o modelo de uma bacia hidrográfica não pode ser totalmente validado, como Abbaspour *et al.* (2009), isso porque podem existir condições na bacia hidrográfica que não estão sendo modeladas (exemplo: alterações nas condições de uso de água para irrigação) e estas incertezas podem levar a resultados insatisfatórios e tornar a validação em um grande desafio para o modelador. Para Faramarzi *et al.* (2009) as incertezas na modelagem hidrológica podem estar relacionadas a fatores como: irrigação; interação entre águas superficiais e subterrâneas; ocorrência de deslizamento de terra, o que altera a quantidade de sedimentos transportados e, conseqüentemente, a quantidade de água. Abbaspour *et al.* (2015) acrescentaram a estas incertezas a qualidade dos dados de entrada, sendo esses extremamente importante para a acurácia da modelagem hidrológica.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, a análise de sensibilidade foi realizada utilizando a equação de sensibilidade relativa (S_r) aplicada a 12 parâmetros do modelo SWAT. Os parâmetros considerados como mais influente foram os seguintes: CN2, SOL_AWC, ESCO, GWQMN e CANMX, refletindo a importância dos processos de escoamento superficial, água no solo e interceptação vegetal no balanço hídrico da bacia hidrográfica do estudo.

Na calibração manual, os parâmetros do modelo SWAT selecionados como mais influentes na análise da sensibilidade foram modificados manualmente em várias iterações do modelo, acompanhando os indicadores NSE e R^2 . Os resultados obtidos no presente estudo indicam que o modelo SWAT simulou, de forma satisfatória, o volume armazenado no açude Sumé, de acordo com os índices que avaliam a qualidade estatística da simulação. Isso confirma a aplicabilidade do modelo na predição de volume nesta bacia.

Uma das limitações da aplicação da modelagem SWAT na bacia do açude Sumé foi a indisponibilidade de dados exigidos pelo modelo, principalmente referentes aos demais açudes

presentes na bacia, visto que a bacia hidrográfica possui uma elevada densidade de açudes (>1,5 por km²). A existência de açudes ao longo da rede de drenagem promove alterações no escoamento superficial. Esta é uma consideração importante visto que os açudes da região estão submetidos as entradas de água via escoamento superficial e quanto maior a capacidade de armazenamento de água destes açudes, mais eles interceptarão a água que escoar na bacia.

A disponibilidade dos dados de forma satisfatória, permitiria uma melhor representatividade espacial da bacia e a validação tornaria as predições mais precisas e proporcionando a redução das incertezas. Apesar de todos os esforços, a compilação dos dados hidrológicos e fisiográficos necessários para aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica para a predição do volume do açude Sumé foi suficiente para obtenção de boas modelagens para o período de calibração e validação de acordo com os critérios definidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. (2009). **SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs**. A user manual. Zurich, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology, 84p.

ABBASPOUR K. C; ROUHOLAHNEJAD E; VAGHEFI S; SRINIVASAN R; YANG H, KLØVE B (2015). **A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model**. Journal of Hydrology 524(1):733-752. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.

Abouabdillah A; White M; Arnold J. G; De Girolamo A M; Oueslati O; Maataoui A, Lo Porto A (2014). **Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT**. British Society of Soil Science doi:<https://doi.org/10.1111/sum.12146>.

ADDIS, H. K., STROHMEIER, S., ZIADAT, F., MELAKU, N. D., KILK, A. (2016). **Modeling streamflow and sediment using SWAT in Ethiopian Highlands**. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 9(5), pp. 51-66.

ADRIOLO, M. A.; SANTOS, I. DOS.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. DE. **Calibração do Modelo Swat para a Produção e Transporte de Sedimentos**. In: VI Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 2008. Belo Horizonte, MG.

ARAGÃO, Ricardo de *et al.* **Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino.** *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2013, vol.37, n.4, pp.1091-1102. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400026>.

ARAÚJO, S.M. S. de. **A REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE DO BRASIL: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos.** Rios Eletrônica- Revista Científica da FASETE. ano 5 n. 5 . 2011.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSUEN, A. V.; LIEW, M. W. V.; KANNAN, N.; JHA, M. K. **SWAT: Model Use, Calibration, And Validation.** ASABE: Model use, Calibration & Validation. 55(4), p 1491-1508. 2010.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R. *et al.* **SWAT: Model use calibration and validation.** Transactions of ASABE, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

ARNOLD, J. G., R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH, AND J. R. WILLIAMS. 1998. **Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development.** J. American Water Resour. Assoc. 34(1): 73-89.

ASSIS, J.M.O.; SOUZA, W.M.; SOBRAL, M.C.M. **Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 2, p. 188- 202. 2015.

ATECEL. **Estudo técnico integrado sobre o uso múltiplo dos recursos hídricos da bacia hidrográfica Sucurú.** Campina Grande, 1993.

BARROS, S. V. A. **Otimização dos usos múltiplos em pequenos açudes na bacia do açude de Sumé - PB.** 2010. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling: the primer.** 2. ed. Lancaster University, UK: JohnWiley & Sons, 2012a.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; PAIVA, E. M. C. D. **Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement**

uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. Appl. Eng. Agric., v. 29, n. 2, p. 189-200, 2013.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 08 DE JANEIRO DE 1997. **Política Nacional dos Recursos Hídricos**, Brasília, DF, jan 1997.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba.** Rio de Janeiro; Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (MA), 1972, 670p

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D.G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, SP. 2009

BRIGHENTI, T.M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. **Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p53-64>

BROOKFIELD, A.E., G.L. MACPHERSON, AND M.D. Covington. 2017. **Effects of changing meteoric precipitation patterns on groundwater temperature in karst environments.** Ground Water 55:227–236. doi:10.1111/gwat.12456.

BROUZIYNE, YOUSSEF et al. SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco. **Arabian Journal Of Geosciences**, [s.l.], v. 10, n. 19, p.1-13, out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-017-3220-9>.

CÁRITAS (2014). Cáritas. Acesso em junho de 2019, disponível em Cáritas Brasileira: <http://caritas.org.br/wp-content/uploads/2011/03/caderno-3.pdf>.

CHAIBOU BJ, JOMAA S, BENABDELLAH S, BAZIE P, AFOUDA A, RODE M (2016) **Multi-site validation of the swat model on the bani catchment:** model performance and predictive uncertainty. Water Resour Manag 8: 1–23.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model Hydrol.** Process. 2010. Published online in Wiley InterScience DOI: 1.1002/hyp.7568. p.1133-1148.

Collischonn, W.; Dornelles, F. 2013 **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Editora ABRH.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. **Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.16, p.119-133, 2011.

DAGGUPATI, P., PAI, N., ALE, S., DOUGLAS-MANKIN, K. R., ZECKOSKI, R. W., JEONG, J., PARAJULI, P. B., SARASWAT, D., & YOUSSEF, M. A. (2015). **A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and water quality models**. Trans. ASABE, 58(6), 1705-1719. <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10712>.

DANTAS, José Carlos. **Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

DILE, Y. T.; DAGGUPATI, P.; GEORGE, C.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. **Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model**. Environmental Modelling & Software, v. 85, p. 129-138, 2016.

DURÃES, M. F. 2010. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 134p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ERCAN MB, GOODALL JL, CASTRONOVA AM, HUMPHREY M, BEEKWILDER N (2014). **Calibration of SWAT models using the cloud**. vol 62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.002>.

FARAMARZI, M., ABBASPOUR, K., SCHULIN, R., YANG, H., 2009. **Modelling blue and green water resources availability in Iran**. Hydrological Processes v.23, p.486-501.

FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A. (1995). **USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.

GASSMAN P, REYES M, GREEN C, ARNOLD J (2007) **The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions**. Am Soc Agric Biol Eng 50(4):1211–1250

GASSMAN, P. W., BRESSIANI, D. A., FERNANDES, J. G., GARBOSSA, L. H. P., SRINIVASAN R., BONUMÁ, N. B., MEDIONDO E. M. (2015). **Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects**. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 8(3), pp. 9-35.

GREEN CH, VAN GRIENSVEN A (2008). **Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds**. Environ Model Software 23:422-434 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.06.002>.

GRIENSVEN, A.V. **Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005**. Artigo técnico.

Haan C. T. (2002). **Statistical methods in hydrology**. Qmes-IOWA

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Estimating potential evapotranspiration**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 108, p. 225-230, 1982.

Jiang Y, Liu C, Li X, Liu L, Wang H (2015). **Rainfall-runoff modeling, parameter estimation and sensitivity analysis in a semiarid catchment**. vol 67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.008>.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2008. 160p

Köppen, W. 1948. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México. 479p.

KRYSANOVA, V., SRINIVASAN, R. (2015). **Assessment of climate and land use change impacts with SWAT**. *Regional Environmental Change* 15(3), pp. 431-434.

LEAVESLEY, G.H.; LICHTY, R.W.; TROUTMAN, B.M.; SAINDON, L.G. (1983) **Precipitation-Runoff Modelind System: User's Manual**. Denver, Colorado (EUA). Water-Resources Investigations Report, 214 p.

LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, FREDE HG (2002). **Comparison of two different approaches of sensitivity analysis Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C** 27:645–654 doi:[https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00049-9).

LIMA, J. E. F. W.; ANTONINI, J. C. DOS A.; BORGES, M. M.; ANDRADE, S. M. L. DE; LOBATO, B. R.; ROCHA, F. E. DE C.; CARVALHO, A. V. V. **Demandas relacionadas às Culturas irrigadas no DF e propostas para pesquisa, extensão e política pública**. IN Expedição Safra Brasília 2016: soja, milho safrinha e culturas irrigadas: diagnóstico e prospecção de demandas para pesquisa, extensão rural e política pública. Brasília, DF: Seagri-DF, 2017 , 355 p.

LOPES, V. L. (1987a). **A numerical model of watershed erosion and sediment yield**. Tucson, 148 p. PhD. Dissertation, University of Arizona.

LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. **Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do Ribeirão Concórdia, SC**. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos, v. 18, n. 2, p. 39-54, abr./jun. 2013.

MELO NETO, J. de O.; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de; MELLO JÚNIOR, A. V. **Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p177-188>.

MOLLE, François; CADIER, Eric. **Manual do pequeno açude**. SUDENE-DPG-PRN-DPPWR. Recife-PE,1992.

MONTEITH, J.L. (1965) **Evaporation and the Environment**. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205-234.

MOREIRA, M. (2002). **Agronomia das forragens e pastagens**. Ed. UTAD, 183 p

MORIASE, D. N. ARNOLD, J. G. , VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L; HARMEL, R.D. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**, Transactions of American Society of Agricultural & Biological Engineers. St. Joseph, V. 50, n. 3, 2007, p. 885-900.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. **Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model**. Journal of Hydrology, v. 306, p. 127-145, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.005>.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SPRINIVASAN, R. & WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2005**. 530p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool, Theoretical documentation version 2009**. Temple. Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station, 2011.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2010. cap 3, p. 33-112.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. (2013). **Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia – SC**. Revista Árvore, 37(5), pp. 859-869

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. **On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters**. Monthly Weather Review, v. 100, n. 2, p.81-92, 1972.

RIBEIRO, G. do N. **Uso de geotecnologias no estudo da degradação das terras no município de Sumé-PB**. 2014. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2014.

RODRIGUES, M. F. **monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do brasil**. Santa Maria: UFSM/CCR, 2011. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011

RUFINO, I. A. A.; SILVA, S. T. **Análise das Relações entre Dinâmica Populacional, Clima e Vetores de Mudança no Semiárido Brasileiro: Uma Abordagem Metodológica.** Bol. Ciênc. Geod. Curitiba, v. 23, n. 1, p. 166 – 181, 2017.

SALLES, L. de A. 2012. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 114 p.

SANTOS, R. B.; SILVA, G. S.; SILANS, A. M. B. P.; SANTOS, C. A. G. **Avaliação da disponibilidade hídrica em bacias do semiárido paraibano através do método Cadier.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2011.

SARMENTO, L. 2010. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas.** Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 241p.

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, 2005. (Nesta edição)

SCHULTZ, G.B.; SOUZA, R.M.; SANTOS, I. **Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: aplicação na bacia do altíssimo rio Negro.** In: LIMA, J.E.F.W.; LOPES, W.T.A. Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Brasília: ABRH, p. 448, 2011.

SETEGN SG, MELESSE AM, RAYNER D, DARGAHI B (2014) **Climate change impact on water resources and adaptation strategies in the Blue Nile River Basin.** In: Melesse AM, Abteu W, Setegn SG (eds) Nile River Basin: Ecohydrological Challenges. Climate Change and Hydropolitics. Springer International Publishing, Cham, pp 389– 404. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02720-3_20.

SHESHUKOV, A. Y., DOUGLAS-MANKIN, K. R., SINNATHAMBY, S., DAGGUPATI, P.(2016). **Pasture BMP effectiveness using an HRU-based subarea approach in SWAT**. Journal of Environmental Management 166, pp. 276-284.

SILVA, A. C. S.; SILANS, A. M. B. P.; NETO, A. F. S.; PORTO, R. Q. **Considerações sobre os aspectos sociais e físicos da açudagem na bacia do açude de Sumé - PB**. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande-MS, 2009.

SILVA, A. C. S. **Metodologias para definição da disponibilidade hídrica em pequenos açudes e pequenas bacias hidrográficas na região semiárida**. Projeto DISPAB-AS, 2010.

SILVA, R.M.; MEDEIROS, I.C. (2014). **Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT**. GeoFocus 14, pp. 211-231.

SILVEIRA, da L. L. André. **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica**. In: TUCCIM. E. Carlos (org.) Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

Strauch, M., Rein, J., and Galizia, C. G. (2012). **Signal extraction from movies of honeybee brain activity by convex analysis**. in Proceedings of the International Conference on Computational Advances in Bio and Medical Sciences (ICABS), eds S. Istrail, I. I. Mandoiu, M. Pop, S. Rajasekaran, and J. L. Spouge (Las Vegas, NV: IEEE), 1–6.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1998. p. 669.

TUCCI, C. E. M. (1987). **Modelos determinísticos**. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/ABRH, p. 211-324.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil And Water Assesment Tool) na Simulação da Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural**. Porto Alegre; UFRGS/IPH, 2009. 144 p. Dissertação Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M. **Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, v. 36, n. 2, p. 1-9, Mar./Apr. 2012.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual.** U. S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. ARS-77, 130 p, 1990.

YIRA, Y. et al. **Modeling land use change impacts on water resources in a tropical West African catchment** (Dano, Burkina Faso). *Journal of Hydrology*, v. 537, p. 187–199, 2016.

YESUF, H. M.; MELESSE, A. M.; ZELEKE, G.; ALAMIREW, T. **Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed.** *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 9, p. 1-16, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-5636-z>.

