



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
CENTRO TECNOLÓGICO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO
SWAT EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Vitória
2017

Laíza Fernanda Curti Teixeira

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS DO MODELO
HIDROLÓGICO SWAT EM FUNÇÃO DE DIFERENTES
CARACTERÍSTICAS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Sérgio Ferreira Mendonça.

Vitória

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

T266a Teixeira, Laíza Fernanda Curti, 1992-
Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo
hidrológico SWAT em função de diferentes características de
bacias hidrográficas / Laíza Fernanda Curti Teixeira. – 2017.
131 f. : il.

Orientador: Antonio Sérgio Ferreira Mendonça.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solo – Uso – Planejamento. 2. Bacias hidrográficas.
3. Calibração. 4. Análise de sensibilidade. 5. Modelo SWAT.
I. Mendonça, Antonio Sérgio Ferreira. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**“Análise de Sensibilidade de Parâmetros do
Modelo Hidrológico SWAT em Função de
Diferentes Características de Bacias
Hidrográficas”.**

Laíza Fernanda Curti Teixeira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça
Orientador - DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Daniel Rigo
Examinador Interno - DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
Examinador Externo - DCFM/UFES

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória-ES, 09 de outubro 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus.

Ao professor Dr. Antonio Sérgio Ferreira Mendonça, pelos ensinamentos compartilhados durante o mestrado, e por contribuir de forma especial no desenvolvimento dessa pesquisa através da sua orientação.

Aos órgãos INCAPER, FEST e CESAN pela disponibilização e permissão de uso de dados na pesquisa.

Aos professores Daniel Rigo e Roberto Cecílio pela participação na banca e pelas contribuições pontuais.

Aos meus pais Gaspar e Maria, por ser fonte de inspiração e incentivos durante toda minha trajetória. À minha família de Vitória, minha irmã Graziella, Raphael, Sophia e Antônio por me receberem de braços abertos em sua casa e serem meu porto seguro, obrigada de coração. Ao meu amor Diego, companheiro nos momentos de alegria e suporte nas horas mais difíceis, estimulando de modo especial a conclusão desse trabalho. Aos meus amores, Cibele, Lavínia e Augusto pelo apoio incondicional.

Às colegas de pós-graduação, Lara, Mônica, e em especial à Selena e Luana por dividirem seus conhecimentos sobre o SWAT, o que foi fundamental para a realização desse projeto.

Aos discentes e equipe do PPGEA.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Enfim, a todos que contribuíram, fica aqui o meu obrigado.

RESUMO

Avaliação do comportamento de componentes de modelos matemáticos pode ser realizada através de técnicas de análise de sensibilidade, incertezas e calibração dos mesmos. No estudo buscou-se utilizar esses recursos especificamente para o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), com o intuito de avaliação de condições de aplicação para determinar a vazão em uma bacia hidrográfica localizada no estado do Espírito Santo – Brasil e, posteriormente, simular cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia. Na análise de sensibilidade global os parâmetros mais sensíveis foram os relacionados com o escoamento superficial e o fluxo de base. O SWAT mostrou ser eficaz na representação da variável vazão em uma sub-bacia, após a calibração dos parâmetros. Em relação aos índices estatísticos de qualidade de ajuste entre dados simulados e observados, para a simulação mensal o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) foi 0,72 e o percentual de viés (PBIAS) 9,40, ambos considerados satisfatórios, segundo a literatura. No entanto, para a modelagem das vazões diárias o índice NSE foi muito baixo, 0,21. Observou-se que a presença de valores atípicos (outliers) na série diária de dados afeta fortemente os valores do coeficiente NSE. Após a calibração aplicou-se três cenários distintos de composição total para a sub-bacia calibrada: Mata Nativa, Eucalipto e Pastagem. A análise de sensibilidade manual dos parâmetros para os cenários demonstrou que não houve diferenças significativas entre os cenários para a maioria dos parâmetros. Porém, para o valor do número da curva (CN2), os cenários de Eucalipto e Pastagem foram influenciados em maior magnitude do que o de Mata Nativa. Uma correlação entre parâmetros de diferentes processos pode ser observada. Na avaliação de variáveis de saída modeladas, para diferentes cenários, não foram observadas grandes diferenças para médias mensais. Para as simulações diárias, as particularidades entre os cenários foram melhor observadas, principalmente para eventos de maiores precipitações. A Mata Nativa demonstrou maiores valores de vazão em épocas de seca, em virtude do maior fluxo de base, enquanto o cenário de Pastagem retornou um escoamento superficial superior às outras situações.

Palavras-chave: SWAT. Análise de sensibilidade. Calibração. Cenários de uso e ocupação do solo.

ABSTRACT

Evaluation of mathematical models components behavior can be performed through sensitivity analysis, uncertainties and calibration techniques. In the study, it was sought to use these resources specifically for the hydrological Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, with the purpose of evaluating the application conditions to simulate flow in a watershed in Espírito Santo State, in Brazil and, later, simulate alternative land use and occupation scenarios in the basin. In the global sensitivity analysis, the most sensitive parameters were those related to surface and base flow. The SWAT showed, after parameters calibration, to be effective in the representation of the flow variable. The Nash and Sutcliffe (NSE) coefficient calculated for the monthly simulation was 0,72 and the bias percentage (PBIAS) 9,40, both considered satisfactory, according to the literature. However, for daily flow modeling the NSE index was very low, 0,21. It was observed that the highest values present in the daily data series strongly affected the NSE coefficient values. After calibration, three distinct scenarios were considered for the sub-basin: native forest, eucalyptus and pasture. The manual sensitivity analysis for the scenarios showed that there were no significant differences for most parameters. However, for the number curve (CN2) value eucalyptus and pasture scenarios were influenced in greater magnitude than native forest. A correlation between parameters of different movements processes was observed. In the evaluation of modeled output variables, for different scenarios, large differences were not observed for monthly averages. For the daily simulations, the particularities between the scenarios were better observed, mainly for greater precipitations events. The native forest showed higher flow rates for drought times, due to the higher base flows, while the pasture scenario returned superficial flow superior to the corresponding to other situations.

Key words: SWAT. Sensitivity analysis. Calibration. Land use and occupation scenarios.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Modelos de Simulação desenvolvidos pela EPA	18
Tabela 2 - Estudos com o modelo SWAT no Brasil.	36
Tabela 3 - Faixas de performance dos índices estatísticos para simulações mensais.	47
Tabela 4 - Informações sobre as estações climáticas	50
Tabela 5 - Parâmetros meteorológicos da BHRM para entrada no modelo	51
Tabela 6 - Parâmetros dos solos existentes na bacia hidrográfica do rio Mangaraí.	57
Tabela 7 - Uso e ocupação do solo na BHRM, porcentagem de composição e respectiva classificação no SWAT.	59
Tabela 8 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia 2.....	62
Tabela 9 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo SWAT.....	63
Tabela 10 - Classificação da Sensibilidade dos Parâmetros	71
Tabela 11 - Sensibilidade global dos parâmetros da variável vazão.....	72
Tabela 12 - Parâmetros de processos sub-superficiais considerados sensíveis em outros estudos.	74
Tabela 13 - Sensibilidade dos parâmetros em bacias hidrográficas do Espírito Santo.	78
Tabela 14 - Sensibilidade dos parâmetros - Método <i>one-at-a-time</i>	79
Tabela 15 - Valores do coeficiente NSE obtidos em bacias hidrográficas no Espírito Santo	82
Tabela 16 - Parâmetros e seus limites utilizados na calibração do modelo	85
Tabela 17 - Índices de sensibilidade de cada parâmetro por cenários de uso e ocupação do solo.	96
Tabela 18 - Simulação das variáveis hidrológicas para os cenários aplicados na BHRM	109

Lista de Figuras

Figura 1 - Etapas necessárias para a realização de um processo de modelagem matemática ambiental.	17
Figura 2 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.....	21
Figura 3 - Exemplos de inter-relação entre uso e ocupação do solo e focos alteradores da qualidade da água	24
Figura 4 - Desenvolvimento histórico do SWAT	27
Figura 5 - Exemplo da sequência da amostragem Hipercubo Latino	39
Figura 6 - Esquema da ligação entre os programas de otimização do SWAT-CUP e o SWAT.	42
Figura 7 - Localização da Bacia Hidrográfica do Mangaraí	48
Figura 8 - Localização das estações climáticas.....	50
Figura 9 - Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Mangaraí.....	54
Figura 10 - Tipos de solos da bacia hidrográfica do rio Mangaraí	55
Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mangaraí.	59
Figura 12 - Sub-bacias da BHRM delimitadas pelo modelo SWAT.....	62
Figura 13 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da metodologia do trabalho.	68
Figura 14 - Ranking de sensibilidade dos parâmetros para a BHRM.....	76
Figura 15 – Precipitações pluviométricas, vazões medidas e simuladas (sem calibração).	81
Figura 16 - Precipitações pluviométricas, vazões medidas e simuladas (com calibração).	83
Figura 17 - Relação entre os dados simulados pelo modelo (sem calibração) e os observados em campo para a simulação diária e a precipitação.....	88
Figura 18 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas (sem calibração).	90
Figura 19 - Relação entre os dados simulados pelo modelo e os observados em campo após a calibração para a simulação diária	91
Figura 20 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas (após calibração).	92
Figura 21 - Box-Plot das vazões médias diárias observadas na BHRM em cada mês da série.....	93
Figura 22 - Relação entre os dados simulados pelo modelo e os observados em campo (sem outliers) após a calibração para a simulação diária.....	94
Figura 23 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas após calibração sem outliers.....	95

Figura 24 - Índice de sensibilidade dos parâmetros entre os cenários em relação à vazão	100
Figura 25 - Índice de sensibilidade dos parâmetros entre os cenários para o escoamento superficial	101
Figura 26 - Índice de sensibilidade dos parâmetros para cada cenário para a produção de água	103
Figura 27 - Índice de sensibilidade dos parâmetros para cada cenário para o fluxo de base	104
Figura 28 - Simulação com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de uma sub-bacia da BHRM. (a) simulação mensal e (b) simulação diária.....	106
Figura 29 - Simulação com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de toda a BHRM. (a) simulação mensal e (b) simulação diária	107
Figura 30 - Vazões diárias simuladas para cenários extremos na BHRM.....	111

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Modelagem Ambiental	14
3.2 Bacias Hidrográficas como unidade de estudo	18
3.2.1 CICLO HIDROLÓGICO	20
3.2.2 INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	23
3.3 Modelos Hidrológicos	25
3.3.1 SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL - SWAT	26
3.3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	36
3.3.3 CALIBRAÇÃO DE MODELOS	39
3.3.4 ÍNDICES ESTATÍSTICOS	45
4. MATERIAL E MÉTODOS	48
4.1 Área de estudo	48
4.2 Informações de entrada no modelo	49
4.2.1 DADOS CLIMÁTICOS	49
4.2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)	53
4.2.3 TIPO E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	54
4.3 Modelagem no SWAT	60
4.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, INCERTEZAS E CALIBRAÇÃO DO MODELO	61
4.1 Cenários de uso e ocupação do solo	69
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1 Análise de Sensibilidade	72
5.1.1 ANÁLISE GLOBAL	72
5.1.2 ANÁLISE ONE-AT-A-TIME	78
5.2 Calibração do modelo	80
5.2.1 SIMULAÇÃO MENSAL	80
5.2.2 SIMULAÇÃO DIÁRIA	88
5.3 Simulação de cenários	96
5.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE MANUAL	96
5.3.2 VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS SIMULADAS	105
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICE	128
APÊNDICE A – GRÁFICOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ONE-AT-A-TIME (SWAT-CUP) PARA A VARIÁVEL VAZÃO	129

1. INTRODUÇÃO

As variáveis que regem o funcionamento de sistemas ambientais, bem como sua complexidade, despertam grande parte do interesse científico para com o meio ambiente e seus componentes. Esse fator, alinhado à necessidade de desenvolvimento de políticas públicas voltadas a um planejamento sustentável em nível regional, alavancou diferentes formas de pesquisas ao longo do tempo para tornar mais acessível o processo de previsão do comportamento de um sistema em decorrência de eventos naturais e ações antrópicas.

Entre as ferramentas disponíveis para atingir esse propósito podem ser citadas observações diretas em campo, ensaios em laboratório e prática da modelagem matemática. Interligação destes três processos estão presentes nas principais pesquisas realizadas na atualidade.

Dentre as propriedades ambientais estudadas, o percurso hidrológico é primário, por governar e influenciar todos os outros processos. Por ser um fenômeno aleatório, com sua origem relacionada com eventos de precipitação e condicionado pelo ciclo hidrológico, é constantemente avaliado e aprimorado em pesquisas. Considerando cenários extremos, quantificar a variação volumétrica, através da vazão, dos recursos hídricos em uma determinada região torna-se fundamental.

O progresso tecnológico e a conseqüente expansão da velocidade computacional permitiram que processos hidrológicos fossem melhor representados através de modelos matemáticos que simulam as variáveis em ocorrência no meio ambiente. Posteriormente à integração desses modelos com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) surgiram novas perspectivas que permitem estimular o desenvolvimento dessa prática em escalas menores de bacias hidrográficas (APRÍGIO e BRANDÃO, 2011).

Um modelo de simulação desenvolvido para a análise dos processos físicos, químicos e biológicos em escala de bacia hidrográfica mundialmente utilizado é o *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). O programa baseia-se em informações específicas sobre diversas variáveis ambientais, retornando dados de comportamento dos movimentos físicos da água e demais parâmetros de qualidade. Sua principal vantagem é a capacidade de permitir a avaliação de impactos de ações antrópicas sobre a quantidade e qualidade das águas (NEITSCH et al., 2009).

O estudo dos parâmetros de entrada que exercem maior influência sobre os resultados é importante em processos de modelagem ambiental, principalmente devido à carência de dados, variabilidade espaço-temporal e dificuldade na determinação de efeitos a longo prazo desses fenômenos. Levando em consideração esses aspectos e a aleatoriedade com que ocorrem, estudar parâmetros críticos do modelo, considerando suas incertezas e relevância para o objetivo final da modelagem é de grande importância. Uma maneira de avaliar essas particularidades é através dos processos de análise de sensibilidade, incertezas e calibração de parâmetros do modelo. Este tipo de análise auxilia na eliminação de dados insensíveis e fornece maior foco na obtenção e no aprimoramento desses parâmetros. Desta forma, serve de orientação para novos estudos, pois é capaz de elevar a precisão de modelos, garantindo melhores resultados produzidos e habilitando seu uso para a localidade de interesse (HAMBY, 1994; LELIS et al., 2012; LENHART et al., 2002).

Além da avaliação da efetividade de modelos em regiões específicas, essas técnicas credenciam a aplicação para cenários futuros, para que se possa compreender a relação entre características de bacias hidrográficas e a qualidade da água de corpos receptores, determinando como as mudanças no uso e ocupação do solo e do clima irão impactar na disponibilidade das águas e em seu funcionamento. Essa é a chave para auxílio aos gestores nos processos de tomadas de decisões, seja a curto ou longo prazo. Considerando que a modelagem matemática baseada em determinadas fontes de informação gera uma análise mais complexa da situação hidrológica da bacia como um todo, permite melhor forma de avaliação dos possíveis impactos gerados por alterações, prevendo acontecimentos e auxiliando na sustentabilidade e conservação ambiental.

Tendo em vista esses fatores, aplicar um modelo em uma determinada bacia hidrográfica, considerando os principais mecanismos que ditam seu funcionamento e relacionando seus resultados com as diferentes características associadas a ela, é essencial para auxiliar no desenvolvimento contínuo de melhorias da técnica de modelagem e contribuir para uma aplicação mais corriqueira desse dispositivo em ações de planejamento ambiental. Desta forma, o desenvolvimento do presente estudo é plenamente justificável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

A partir de análise de sensibilidade, avaliar a influência dos parâmetros de entrada do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) sobre os resultados da modelagem de vazão, em função de diferentes características de bacias hidrográficas.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar quais parâmetros de entrada do modelo governam os principais processos hidrológicos na pequena bacia hidrográfica do rio Mangaraí.
- Avaliação de desempenho do SWAT através da calibração do modelo e análise de índices estatísticos de qualidade do ajuste.
- Análise da resposta do modelo hidrológico SWAT a diferentes cenários de uso e ocupação do solo em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Mangaraí.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelagem Ambiental

A crescente exigência por uma melhor compreensão dos processos que ocorrem no meio ambiente e por uma maior capacidade de obtenção de prognósticos das mudanças ambientais, sejam elas causadas por ações antrópicas ou naturais, acarreta em novos desafios para a pesquisa científica em sistemas ambientais. A complexidade dessas regiões e o caráter perceptivo com o qual são estudadas, implicam na necessidade de soluções quantitativas para o entendimento do seu funcionamento (BEVEN, 2009; PENG et al., 2002).

Um sistema consiste na combinação, não aleatória, de matéria e energia em uma determinada região do espaço e tempo físicos, sendo organizado em subsistemas inter-relacionados. Possuem como características primordiais a organização, a generalização e a integração, sendo que para o seu funcionamento se faz necessário a presença de uma força motriz ou uma fonte de energia. Desta forma, um sistema ambiental pode ser entendido, resumidamente, como um sistema complexo composto por um conjunto de interações entre seus componentes e subcomponentes (HUGGET, 1980; WHITE et al., 1998).

Com o objetivo de representar a realidade de sistemas ambientais, as pesquisas científicas buscaram explicar o funcionamento dessas áreas através de números e conceitos, que foram denominados de modelos. Como definição do conceito de modelo, tem-se: "uma simplificação da realidade que é construída para obter intuições sobre atributos selecionados de um determinado sistema físico, biológico, econômico ou social" (EPA, 2009, p. 4). Na literatura, para Lee (1973), Oliveira (2015), Tucci (2005) e Xu (2002) um modelo representa a realidade de uma forma simplificada e generalizada, onde se faz uso da abstração dessa realidade com o intuito de obter clareza conceitual, ou seja, minimizar a complexidade e a variedade do mundo real a um estágio que se pode representar e compreender, descrevendo os componentes básicos principais e de maior importância desse sistema.

A classificação de um modelo ocorre conforme suas características, podendo apresentar caráter (TUCCI, 2005; SANTOS, 2009; XU, 2002):

- Estocástico ou determinístico: Quando qualquer variável de uma equação é considerada como aleatória e com distribuição de probabilidade, então o modelo é considerado estocástico, caso contrário, se nenhuma variável ser considerada em virtude de uma probabilidade de ocorrência, o modelo é dito determinístico.
- Teórico, empírico ou conceitual: Um modelo teórico, ou também chamado de modelo fisicamente baseado, é em consequência das leis mais relevantes que regulam os fenômenos de um sistema, sua estrutura lógica é semelhante ao mundo real. Os empíricos não possuem característica de compreensão física, contendo parâmetros que possuem pouco significado físico direto, e que podem ser estimados através de entradas e saídas simultâneas de um sistema, utilizando análises estatísticas (correlação e análise de regressão, por exemplo). E o modelo conceitual compreende um intermédio entre o teórico e o empírico, apesar de poder considerar leis físicas, esta classe de modelo faz uso dessas leis de uma forma mais simplificada. No caso de modelos hidrológicos, serão classificados como conceituais, se considerarem os processos físicos agindo sobre as variáveis de entrada para gerar variáveis de saída. Esses três tipos de modelos podem ser lineares ou não-lineares.
- Concentrado ou distribuído: No caso de um modelo não levar em consideração a variabilidade espacial da bacia ele é considerado concentrado, porém se suas variáveis e parâmetros dependerem do espaço e/ou tempo o modelo é denominado distribuído, esse tipo de modelo permite examinar, com um embasamento mais satisfatório, modificações naturais ou antrópicas nas bacias hidrográficas, o que é quase impraticável com os modelos concentrados, pela sua característica empírica e do caráter concentrado da sua fórmula. Em estudos realizados em escala de bacia hidrográfica os modelos hidrológicos distribuídos são cada vez mais utilizados, em virtude da sua compatibilidade natural com dados dos Sistemas de Informações Geográficas - SIG.

O objetivo primário do uso de modelos na pesquisa ambiental é formalizar as explicações científicas existentes sobre o assunto, sendo que, os diversos propósitos existentes para a modelagem podem ser englobados em duas vertentes principais:

- (a) examinar e diagnosticar causas e condições precursoras de eventos ocorridos, e
- (b) prever variáveis de saída e ocorrências futuras (EPA, 2009; BEVEN, 2009).

Os modelos matemáticos são vantajosos devido aos seus usos múltiplos, podendo ser aplicados em pesquisas, gerenciamento/planejamento e no controle de processos em tempo real. Isto ocorre através de diversas funcionalidades, como exemplo, a determinação de concentrações de compostos nas matrizes ambientais (água, ar, solo), em diferentes escalas temporais. Isso auxilia no processo de tomada de decisões, principalmente por parte de agências reguladoras. Sendo assim um modelo tem como utilidade proporcionar respostas à diferentes entradas, assessorando a gestão de alternativas (ROVEDA et al., 2012; VON SPERLING, 2014).

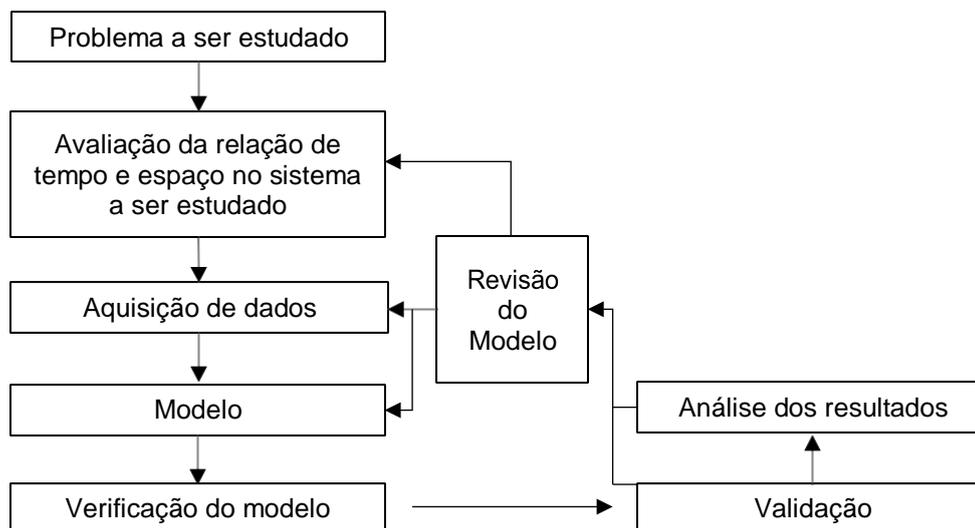
A descrição completa e detalhada da condição (temperatura, pressão, composição, etc.) mesmo que de um pequeno sistema ambiental é complexa, principalmente devido à prática de interações espaço-temporais entre esses componentes. Desta forma, é necessário criar inúmeras suposições ou simplificar afirmações sobre a condição desse ambiente. Para a formulação de um modelo é preciso estar atento à uma questão importante, um modelo excessivamente simples pode ser enganoso, enquanto uma modelagem extremamente detalhada pode não se mostrar útil, confiável ou até mesmo compreensível. É recomendável que durante a construção do modelo, os processos importantes que controlam o meio ambiente sejam favorecidos em detrimento das particularidades menos significativas (MACKAY, 2001).

No desenvolvimento metodológico de simulações ambientais, tanto modeladores quanto usuários precisam estar cientes da problemática em representar a compreensão humana do meio ambiente, modelos são usados em um sentido puramente dedutivo, desta forma a avaliação de questões espaço-temporais, incertezas de previsões, imprecisões, ambiguidades, vagueza de modelos, entre outros fatores, torna-se imprescindível (BEVEN, 2009; ROVEDA et al., 2012).

As etapas básicas para o processo de modelagem ambiental consistem em (a) identificação e especificação do problema, definindo o propósito e o contexto da modelagem, (b) o desenvolvimento, onde se enquadra a formulação do modelo conceitual e da parte computacional, (c) evolução do modelo, fase de testes e revisão

a partir de análises de sensibilidade, incertezas e robustez, entre outros e por fim (d) a aplicação do modelo, avaliando cenários e a evolução das previsões, ou análise de qualquer que seja o objetivo final do processo (EPA, 2009).

Figura 1 - Etapas necessárias para a realização de um processo de modelagem matemática ambiental.



Fonte: Adaptado de Roveda e outros (2012).

Von Sperling (2014) descreveu a composição de um modelo matemático da seguinte forma: (a) estrutura teórica, configurada por equações matemáticas, (b) valores numéricos dos parâmetros, denominados coeficientes das equações e (c) dados de entrada e saída, normalmente incluindo observações/medições de campo ou de laboratório, associando fatores externos com a resposta do sistema. Ao modelar matematicamente um processo, as propriedades ambientais são apresentadas como variáveis do modelo enquanto que suas inter-relações são tratadas por operações aritméticas ou lógicas (FELGUEIRAS, 1999).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*, EPA), desenvolveu uma série de modelos de simulação para as diferentes matrizes ambientais, com o objetivo de avaliar e proteger o meio ambiente e a saúde pública, além de auxiliar gestores no processo de tomada de decisões. Na Tabela 1, estão descritos alguns modelos de simulação e suas características, que são distribuídos pela EPA.

Tabela 1 - Modelos de Simulação desenvolvidos pela EPA.

Modelo	Característica	Matriz Ambiental
AERMOD	Simula a dispersão de poluentes de múltiplas fontes em áreas urbanas e rurais.	
GLIMPSE	Ferramenta de análise para cenários de qualidade do ar voltada à tomada de decisão rápida.	Ar
MOVES	Modelagem de emissões de fontes móveis de poluentes.	
AQUATOX	Modelo de simulação para sistemas aquáticos que prevê o destino de vários poluentes, e seus efeitos sobre o ecossistema.	
HSPF	Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e da qualidade da água para poluentes orgânicos e tóxicos provenientes de áreas agrícolas.	Água
WASP	Simulação de sólidos e contaminantes em águas superficiais.	
PRZM	Modelação de fenômenos como o destino de pesticidas na zona de raiz de culturas, temperatura e volatilização em solos.	
Virulo	Modelo probabilístico para prever a lixiviação de vírus em solos não saturados.	Solo

Fonte: EPA, 2017.

A aplicação de modelos matemáticos pode ocorrer à nível global, regional ou local, isso irá depender dos limites que lhe foram impostos no processo de construção. Segundo Rennó e Soares (2003) na hidrologia os modelos são desenvolvidos, em sua maioria, para atuar em escalas de bacia hidrográfica, uma abordagem considerada eficiente e satisfatória, pois é a unidade física onde ocorrem os principais processos hidrológicos.

3.2 Bacias Hidrográficas como unidade de estudo

A utilização de recortes territoriais, como bacias hidrográficas, é amplamente utilizada na área da gestão dos recursos hídricos, pois a efetividade desse gerenciamento depende da integração de todas as dimensões sociais, físicas e econômicas de uma determinada região, e que são facilmente contempladas em um espaço desta característica (PORTO e PORTO, 2008). Outro fator que alavancou as pesquisas à nível de bacia hidrográfica, foi a implementação da Lei nº 9.433, no ano de 1997, que

instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e definiu que bacias hidrográficas devem ser empregadas como unidades de estudo e gestão.

A bacia hidrográfica é uma área delimitada por divisores topográficos, que capta naturalmente a água proveniente da precipitação, defluindo-a juntamente com sedimentos para um ponto de saída, o exutório. Ou seja, é composta por superfícies declináveis e uma rede de drenagem com cursos d'água que convergem para um leito único através da gravidade (TUCCI, 2015; VON SPERLING, 2014). Sendo assim, uma bacia pode ser considerada uma entidade sistêmica, que realiza um balanço hídrico de entrada e saída de água, viabilizando a conexão de sistemas hídricos e consequente delimitação de subdivisões, denominadas sub-bacias (PORTO e PORTO, 2008).

De acordo com Porto e Porto (2008), o uso de recortes espaciais em bacias hidrográficas é visto como vantajoso, pois têm relação física direta com a água, que é o objeto principal de estudo na gestão de recursos hídricos. Pires e outros (2002), evidenciaram os motivos pelo qual o emprego de bacias hidrográficas como unidade de gerenciamento é eficiente:

- À nível local, é melhor praticável uma abordagem do desenvolvimento sustentável considerando as interdependências com áreas globais.
- O gerenciamento no âmbito de bacias hidrográficas proporciona decisões democráticas, podendo reunir autoridades, planejadores, representantes da comunidade (associações de moradores, etc.) e os usuários (privados e públicos).
- Obtenção de equilíbrio financeiro com a adequação de investimentos públicos (medidas para conservação dos recursos hídricos são onerosas), e facilidade na aplicação de princípios como usuário-pagador e poluidor-pagador.

Para a realização de avaliações hidrológicas e ambientais em bacias hidrográficas, previamente deve-se realizar uma caracterização morfométrica do local, que tem por objetivo ilustrar questões sobre o entendimento da dinâmica ambiental da região (TEODORO et al., 2007). As características físicas e bióticas de uma bacia exercem grande influência no comportamento hidrológico, impactando processos como a

infiltração, evapotranspiração, a produção de água como deflúvio, a e os escoamentos sub-superficiais e superficiais (TONELLO et al., 2006).

A caracterização morfométrica de bacias hidrográficas é definida como uma série de procedimentos metodológicos com o objetivo de investigar e compreender os componentes naturais de uma bacia. Este estudo resulta na determinação de parâmetros físicos da bacia, como declividade, altitude, densidade de drenagem, fator de forma, índice de circularidade, coeficiente de compacidade, entre outros, que são importantes para a previsão do quanto a bacia hidrográfica está vulnerável à fenômenos como, enchentes e erodibilidade (CARDOSO et al., 2006; SANTOS e MORAIS, 2012). De uma forma geral, as características primordiais de uma bacia hidrográfica são: a área de drenagem, o comprimento do rio principal e a declividade do rio e da própria bacia (TUCCI e MENDES, 2006). Todas essas características exercem influência sobre o movimento e o comportamento das águas em bacias, que tem o ciclo hidrológico como principal mecanismo de renovação e circulação das águas.

3.2.1 Ciclo Hidrológico

A água em todas as suas formas disponíveis tem como características a sua instabilidade e a mobilidade, estando envolvida em um ciclo, considerado dinâmico. Para o entendimento do comportamento natural da água, suas ocorrências, transformações e relações com o ambiente, o conceito de ciclo hidrológico descreve de forma satisfatória essas condições (TUNDISI, 2003; VILLELA e MATTOS, 1975).

Segundo Balbinot e outros (2008, p. 133) “[...] o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera”. Os principais componentes do ciclo hidrológico são: evaporação, precipitação, transpiração das plantas, percolação, infiltração e escoamentos. Entre os fatores essenciais para a ocorrência do ciclo destacam-se a energia solar, a força dos ventos e a gravidade (TUNDISI, 2003). O ciclo hidrológico pode transcorrer em escala pequena ou média nos continentes e em grande escala entre a terra e o oceano (PENG et al., 2002).

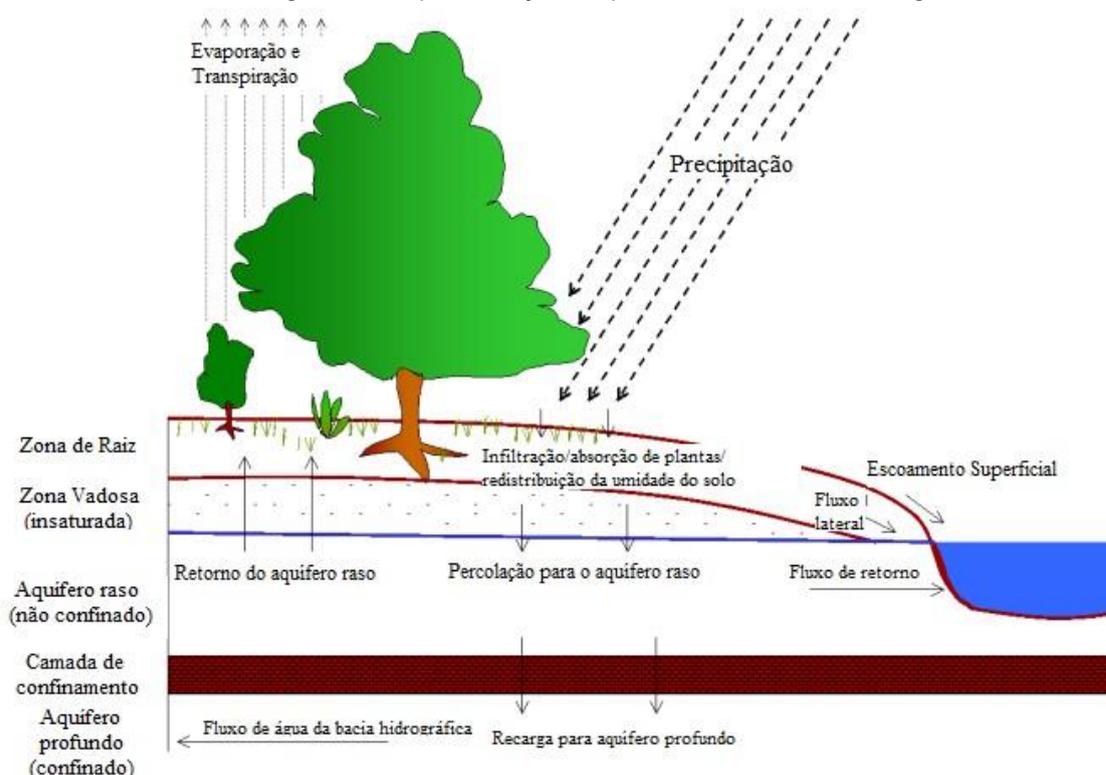
O ciclo da água à nível global é iniciado através da energia solar, e ocorre com uma interação entre atmosfera, superfície terrestre e oceanos. A água evaporada na área continental resulta na vazão de rios que flui na direção dos oceanos, nessa região há uma maior evaporação do que precipitação, e por consequência essa sobra de

evaporação é deslocada, através da circulação na atmosfera, para os continentes onde irá precipitar (TUCCI e MENDES, 2006).

Villela e Mattos (1975) descreveram o ciclo hidrológico,

Como tendo início com a evaporação da água dos oceanos. O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar. Sob determinadas condições, o vapor é condensado, formando nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. A precipitação que ocorre sobre a terra é dispersada de várias formas. A maior parte fica temporariamente retida no solo próximo de onde caiu e finalmente retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água restante escoar sobre a superfície do solo, ou através do solo para os rios, enquanto que a outra parte, penetrando profundamente no solo, vai suprir o lençol d'água subterrâneo. Devido à influência da gravidade, tanto o escoamento superficial como o subterrâneo retornam à atmosfera por evaporação e transpiração antes de atingirem o oceano.

Figura 2 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.



Fonte: Adaptado de Neitsch e outros (2009).

Em escala de bacia hidrográfica os processos hidrológicos são direcionados por dois sentidos principais de fluxo: vertical e longitudinal. Os processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo de solo compreendem o vertical, enquanto o longitudinal corresponde ao escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo) (TUCCI e MENDES, 2006).

Os elementos que influenciam na infiltração de água no solo também interferem no escoamento superficial. Com uma intensidade constante de precipitação, estes processos são opostos, conforme ocorre diminuição da infiltração, o escoamento aumenta, até que haja certo equilíbrio, ou seja, uma estabilização (SPOHR et al., 2009).

No ciclo hidrológico, o escoamento superficial corresponde ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo e ocorre quando a taxa de infiltração e retenção de água no solo é superada pela taxa de precipitação. Ao atingir um solo seco, a quantidade de água infiltrando é extremamente elevada, e vai diminuindo à medida que o solo fica encharcado. No momento que a precipitação excede a infiltração, os desníveis da superfície começam a acumular água, e quando saturados dá-se o início do escoamento superficial. Esse processo pode ser entendido como a água que se movimenta sobre a superfície do solo, escoando para as depressões da superfície até atingirem rios, córregos, canais e lagos (FERRIGO, 2014; MENEZES, 2010; TUCCI, 2015).

Segundo Baldissera (2005) o movimento de percolação da água no solo é dependente de diversos fatores e atravessa áreas com comportamento e características diferentes. Primeiramente fica retida na Zona de Evapotranspiração (ZET), podendo retornar à atmosfera, ser utilizada no metabolismo das plantas ou continuar o processo de infiltração até chegar na Zona Intermediária (ZI). Uma outra faixa estreita, denominada Franja Capilar (FC), é onde a água pode realizar um movimento tanto descendente, por força da gravidade, quanto ascendente, por ação de forças de capilaridade entre partículas adjacentes. E por fim a Zona Saturada (ZS), onde se junta à outras partículas de água já existentes, aumentando o armazenamento ou deslocando-se juntamente com o escoamento subterrâneo ou de base. As zonas superficiais (ZET, ZI e FC) são compostas por matéria sólida, água e possuem espaços preenchidos por ar, o conjunto dessas três áreas é denominado de zona de aeração. Na Zona Saturada, não há espaços preenchidos por ar, conseqüentemente é a região com a quantidade máxima de água, e compreende o escoamento subsuperficial.

Todos esses caminhos percorridos pela água podem atingir direta ou indiretamente os cursos d'água inseridos no contexto da bacia hidrográfica. Por estarem hidraulicamente conectados, os cursos d'água podem receber ou perder água para o

fluxo subterrâneo, depende do nível onde estão localizados os lençóis d'água. O rio que se encontra em uma área de descarga e recebe o fluxo subterrâneo é denominado efluente, e caracteriza-se por um aumento na descarga à jusante. O curso d'água em uma zona de recarga, que perde água, é denominado influente e conseqüentemente ocasiona uma diminuição à jusante. Há rios onde podem ocorrer os dois tipos de processos acima citados, e que são ditos contínuos (SWAT, 2012, p. 333).

Apesar de parecer um ciclo contínuo, o movimento da água em cada uma das fases do ciclo hidrológico é aleatório, com variação no espaço e no tempo, ou seja, a água não se movimenta de forma permanente e com taxa constante. Em um determinado instante pode parecer que o ciclo parou, assim como a precipitação e o escoamento, são os períodos de seca, já em outras circunstâncias pode haver chuvas em excesso, sendo maior que a capacidade de armazenamento dos cursos d'água e acarretando em inundações (VILLELA e MATTOS, 1975).

3.2.2 Influência do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas

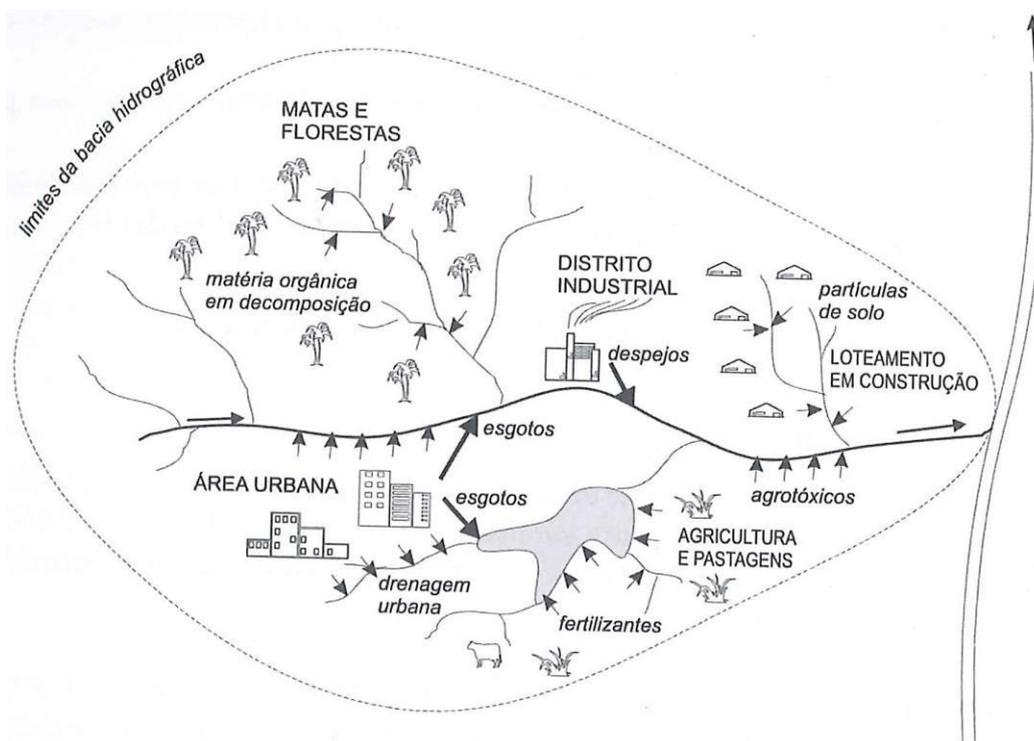
A qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da atuação antrópica. De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é alterada em função das condições naturais e dos padrões de uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica. Sendo que, tais padrões possuem efeitos importantes e consideráveis na qualidade da água de rios e ecossistemas aquáticos que estão inseridos no contexto de uma bacia (BU et al., 2014; VON SPERLING, 2014).

As características das atividades humanas estão intimamente relacionadas com as formas de uso da terra, que por sua vez determinam as substâncias que serão carregadas por eventos hidrológicos através de sistemas de drenagem ou do escoamento superficial, e que alteram as condições químicas, físicas e biológicas do corpo hídrico receptor (LEE et al., 2009; WANG, 2001).

As conexões entre o uso da terra e a qualidade da água, a nível local, ocasionam efeitos considerados cumulativos em uma determinada região, na sua bacia hidrográfica e nas águas costeiras receptoras. Tais efeitos podem variar de diferentes maneiras: devido ao crescimento populacional, a paisagem cultural e ecológica, as mudanças no uso e ocupação do solo e variando também em virtude de eventos climáticos. Apesar desses conceitos serem difundidos há muito tempo, nos dias atuais ainda é importante a discussão sobre o assunto, que deve estar em constante

atualização para determinar a magnitude com a qual um determinado uso pode afetar o ecossistema e prover informações que auxiliem no desenvolvimento de práticas de gestão de bacias hidrográficas. Um desafio importante na área da gestão do uso do solo é a fiscalização por parte do setor público, onde em muitas localidades encontram-se defasadas, não colaborando com o cumprimento das leis. Devido a esse descaso, a não fiscalização das demandas existentes, acaba por gerar um cenário problemático no uso do solo e, conseqüentemente, na qualidade da água (FARIA, 2012; MENEZES et al., 2016; TURNER e RABALAIAS, 2003).

Figura 3 - Exemplos de inter-relação entre uso e ocupação do solo e focos alteradores da qualidade da água.



Fonte: Von sperling (2014).

Diversas pesquisas são encontradas na literatura exemplificando a influência do padrão de uso e ocupação do solo na quantidade e na qualidade da água em bacias hidrográficas. Yu e outros (2016), evidenciaram que áreas compostas por agricultura e núcleos urbanos possuem relações mais impactantes com a qualidade da água de rios, quando comparadas com outros padrões de uso da terra na bacia do rio Wei, na China. O estudo de Tong e Chen (2002) corrobora essa afirmação, uma vez que sua pesquisa identificou através da modelagem de uma bacia hidrográfica no estado de Ohio – EUA, que áreas cultiváveis e usos urbanos impermeáveis foram os tipos de

uso de solo que produziram os mais altos níveis de nitrogênio e fósforo quando comparados com outros padrões de ocupação.

Machado e outros (2003) aplicaram um modelo hidrológico na simulação de cenários para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba – SP, e alcançaram uma redução de 94% na produção de sedimentos com a substituição de pastagem por vegetação nativa. Um estudo sobre o impacto do uso da terra na erosão do solo e no balanço e qualidade da água na bacia do rio Corumbataí-SP, realizado por Garcia e outros (2006) quantificou a vazão para diferentes condições de uso na bacia. Quando a área foi composta em sua totalidade por cultura de cana-de-açúcar, a vazão média do rio aumentou significativamente, em torno de 25%, e a mesma região quando considerada com mata nativa apresentou menores valores de vazão em relação ao uso atual. Silva e outros (2011), ao realizarem um estudo sobre a perda de solo na bacia do rio Colônia, na Bahia, aplicaram dois cenários alternativos de uso e ocupação do solo para a região. O primeiro incrementando Área de Preservação Permanente (APP) no contexto da bacia e o segundo considerando toda a área composta por mata nativa, os autores relataram uma diminuição na média da perda de solo de 9,09 e 20,91 t/ha.ano, respectivamente.

3.3 Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos são utilizados como sistemas de suporte à decisão, se apresentam como uma ferramenta extremamente útil para responder questões e avaliar alternativas relacionadas ao uso do solo e gestão das águas. São capazes de descrever e entender a dinâmica dos sistemas físicos, incluindo bacias hidrográficas e cursos d'água receptores como lagos, rios, estuários e áreas costeiras. O balanço hídrico e a qualidade da água de uma bacia podem ser modelados baseando-se em dados climáticos, topografia e parâmetros de uso e ocupação do solo (SHOEMAKER et al., 2005; SCHMALZ e FOHRER, 2009).

Os modelos de simulação apresentam diversas vantagens no seu uso como melhor definição do problema, se apresentam como um guia para coleta de dados, executam análises de dados, avaliam situações complexas, permitem o teste de situações hipotéticas e possibilitam examinar todo o processo de decisão (SANDERS III, 1976 apud PORTO, 1995). Segundo Pimentel (2015) os modelos hidrológicos são fundamentais em projetos de dimensionamento de obras hidráulicas, um exemplo é a

previsão de vazões para a operação de sistemas hídricos construídos. A autora afirma que, à medida que a preocupação com temas ambientais foi intensificada, os modelos ficaram mais abrangentes e houve uma expansão em suas aplicações.

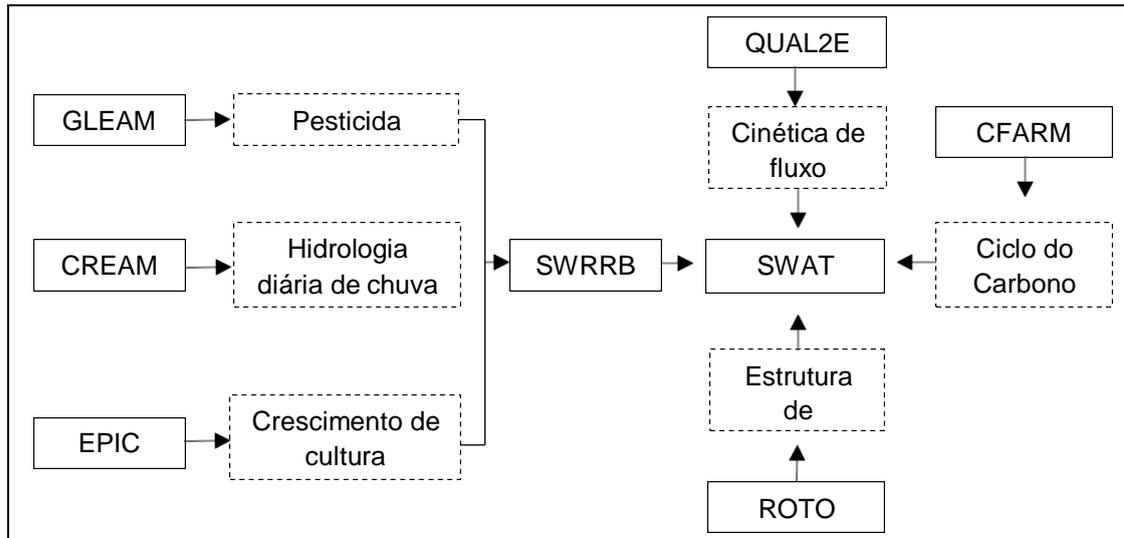
O modelo hidrológico simula a resposta da bacia hidrográfica para um evento de precipitação, representando o movimento da água e os processos de transporte dos poluentes. Se atenta ao detalhamento exigido na avaliação de cada caso, permitindo a avaliação de alternativas para a solução e gerenciamento do problema através da repetição de diversas simulações. O comportamento de cada bacia hidrográfica pode ser analisado sob condições que podem ser variadas conforme a necessidade do usuário, como alterações no uso e ocupação do solo, diferentes períodos sem chuva entre eventos de precipitação, duração e intensidade de eventos chuvosos, entre outras alternativas (PORTO, 1995).

Segundo Aprígio e Brandão (2011) os modelos hidrológicos mais comumente encontrados na literatura são: *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS); *Water Resources in Rural Basins* (SWRRB); *Storm Water Management Model* (SWMM); *Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model* (STORM); *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation* (ANSWERS); *Hydrological Simulation Program-FORTRAN* (HSPF); *Long-Term Hydrologic Impact Assessment* (L-THIA) e o *Soil Water Assessment Tools* (SWAT).

3.3.1 Soil and Water Assessment Tool - SWAT

SWAT é a sigla para *Soil and Water Assessment Tool*, modelo hidrológico físico, semi-distribuído e aplicado em escala de bacia hidrográfica. O SWAT é totalmente acoplado à uma interface de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o ArcGIS-ArcView. Foi desenvolvido no início da década de 1990, pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*U.S. Department of Agriculture - USDA*). O SWAT incorpora características de diversos modelos e é uma consequência direta dos modelos: SWRRB, CREAMS, juntamente com o *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) e o *Erosion-Productivity Impact Calculator* (EPIC). Todos esses modelos foram sendo aperfeiçoados no SWAT, que ao longo do tempo foi expandindo sua capacidade de simulação e recebeu melhorias consideráveis (NEITSCH et al., 2009).

Figura 4 - Desenvolvimento histórico do SWAT.



Fonte: Adaptado de Gassman e outros (2007) e Arnold e outros (2012).

Além das incorporações de componentes e rotinas de outros programas, o SWAT foi adaptado com novos recursos como melhorias nos submodelos de gestão, a partir da introdução temporal de *Best Management Practices* (BMP's), opções de expansão da irrigação, possibilidade de adição de reservatórios, lagoas, *wetlands*, fontes pontuais de poluição, entre outros, na modelagem. Além de incluir submodelos alternativos de hidrologia diária e subdiária e melhorias na simulação de sedimentos (ARNOLD et al., 2012).

O programa foi criado para prever o impacto das práticas de gestão do solo, na água e nos sedimentos, em bacias hidrográficas grandes e complexas, com solos, uso da terra e condições de manejo diferentes, durante longos períodos de tempo. Oferece simulação de tempo contínuo, um alto nível de detalhamento espacial, um número ilimitado de subdivisões de bacias hidrográficas, uma computação eficiente e a capacidade de simular mudanças na gestão do solo (APRÍGIO e BRANDÃO, 2011; JHA, 2009).

Neitsch e outros (2009) descrevem algumas vantagens do modelo e características para que seu objetivo seja atingido:

- Requer informações específicas sobre o tempo, as propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão de solos que ocorrem na bacia. A partir desses dados de entrada os processos físicos associados como o movimento da água, dos sedimentos, dos nutrientes, parâmetros de quantidade e qualidade, entre outros, podem ser diretamente modelados pelo programa.

- Faz uso de dados de entrada de fácil acesso, os dados mínimos necessários para fazer uma simulação normalmente estão disponíveis em banco de dados de agências governamentais.
- As simulações de estratégias de gestão em bacias hidrográficas podem ser realizadas sem altos investimento de tempo ou dinheiro.
- Permite aos usuários estudar os impactos de longo prazo, pois é um modelo contínuo.

As vantagens das premissas utilizadas por esse modelo hidrológico são a facilidade em modelar bacias hidrográficas com carência de dados de monitoramento e a possibilidade de se quantificar o impacto relativo de dados de entrada alternativos como mudanças nas práticas de gestão, clima, vegetação, etc., sobre a qualidade da água ou outras variáveis de interesse (NEITSCH et al., 2009).

Segundo Fontaine e outros (2002) os componentes inseridos no modelo SWAT de modo geral incluem a hidrologia, meteorologia, sedimentação, solo, temperatura, nutrientes, pesticidas e o manejo da terra. Neste modelo a simulação hidrológica é dividida em duas etapas: sendo a primeira a fase terrestre do ciclo hidrológico, que calcula o quanto de água, sedimento, nutriente e de pesticida o canal de drenagem principal contribui em cada sub-bacia. A segunda etapa controla o direcionamento do ciclo hidrológico desses mesmos componentes pela rede de drenagem até o exutório, sendo o cálculo desses processos divididos em cinco fases: precipitação-intercepção, escoamento superficial, infiltração na zona de solo e raiz, e o fluxo de águas subterrâneas (APRÍGIO e BRANDÃO, 2011).

Os dados de entrada do SWAT são divididos em gráficos e tabulares. Os gráficos consistem em planos de informações cartográficas, nesta categoria estão inseridos os mapas de modelo numérico do terreno (MNT), pedológicos, uso do solo e hidrografia. Os dados tabulares são aqueles relacionados com o clima, sendo os valores de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento (PERAZZOLI et al., 2013).

Em relação aos dados de climáticos, o SWAT permite ao usuário introduzir dados a partir de registros diários observados ou o próprio modelo realiza a simulação desses valores, através de médias mensais das estações meteorológicas com maior proximidade da bacia. Para tal, o usuário deve fornecer ao banco de dados de entrada

do modelo, estatísticas específicas dos dados observados nessas estações. Dentre essas estatísticas encontram-se médias diárias, desvios padrões e probabilidades de ocorrência das variáveis relacionadas ao clima (NEITSCH et al., 2009).

No SWAT a bacia hidrográfica é discretizada espacialmente através da sua divisão em sub-bacias, que do mesmo modo são submetidas a uma repartição em parcelas de terreno com declividade, tipo de solo e cobertura de terra homogêneos, estas parcelas são denominadas de Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), dessa forma o modelo calcula as cargas transportadas pelo escoamento separadamente para cada HRU que posteriormente são somadas para se determinar as cargas totais geradas na sub-bacia. O crescimento e o desenvolvimento de plantas diferem entre espécies, quando a diversidade de vegetação dentro de uma sub-bacia é contabilizada, a quantidade calculada do escoamento, por exemplo, que entra no canal principal é muito mais precisa, e essa é a vantagem da utilização de HRU's. Portanto este tipo de abordagem aumenta a precisão e permite uma melhor descrição física do equilíbrio hídrico (APRÍGIO e BRANDÃO, 2011; CASTRO, 2013; NEITSCH et al., 2009; SWAT, 2012).

A simulação dos processos hidrológicos com o modelo SWAT é dividido em quatro vertentes principais: (a) reservatório superficial, (b) reservatório subsuperficial, (c) reservatório subterrâneo – aquífero raso e (d) reservatório subterrâneo – aquífero profundo. O escoamento superficial é influenciado pelo escoamento lateral do perfil do solo e aquele proveniente de retorno do aquífero raso, sendo que a água destinada ao aquífero profundo não retorna para o processo (MARCON, 2013). Algumas formulações e métodos adotados na simulação com o modelo SWAT são descritas a seguir, principalmente aquelas relacionadas com o balanço hídrico, que são os principais valores de saída requeridos por usuários na utilização do modelo. Todas as equações referentes ao modelo SWAT encontram-se na documentação teórica do programa apresentada por Neitsch e outros (2009).

A fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseada na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde SW_t é o teor final de água no solo (mm H₂O); SW_o o teor inicial de água no solo (mm H₂O); t é o tempo em dias; R_d a precipitação no dia i ; Q_{surf} o escoamento superficial no dia i (mm H₂O); E_a é a evapotranspiração no dia i ; w_{seep} a quantidade de água entrando na zona vadosa a partir do perfil do solo (mm H₂O) e Q_{gw} é o retorno do fluxo no dia i (mm H₂O).

No cálculo da evapotranspiração, o modelo computa a evaporação do solo e das plantas separadamente, e a evapotranspiração real é dependente da evapotranspiração potencial e das condições de água armazenada no solo e no dossel. A evapotranspiração potencial (PET), que consiste na taxa em que a evaporação poderia ocorrer quando uma determinada área está completa e uniformemente preenchida com vegetação, além do acesso ilimitado de água no solo pode ser calculada no SWAT por três métodos: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. O que diferencia esses métodos é a quantidade de dados de entrada necessários, o primeiro requer radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O Priestley-Taylor necessita dos valores mencionados acima, porém sem a velocidade do vento, enquanto o método Hargreaves demanda apenas a temperatura do ar. A evaporação do solo e a transpiração das plantas dependem da cobertura, e são calculadas pelas equações 2 e 3 a seguir:

$$E_s = E_o cov_s \quad (2)$$

$$E_p = \left[\frac{E_o LAI}{3,0} \right], 0 \leq LAI < 3; E_p = E_o, LAI \geq 3 \quad (3)$$

E_o é a evapotranspiração potencial, cov_s é o índice de cobertura do solo, E_p a transpiração das plantas e LAI é o índice de área foliar, que é simulado como função das temperaturas máximas diárias e da cobertura do solo.

O escoamento superficial neste modelo hidrológico pode ser estimado por meio de duas metodologias, o Número da Curva SCS e a Infiltração de Green-Ampt (NEITSCH et al., 2009). O Número da Curva SCS é um método bastante difundido à nível mundial, também desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, e é especialmente utilizado em áreas que não possuem elevadas quantidades de dados hidrológicos. Este método combina através de uma equação grupos hidrológicos, uso e ocupação do solo, características e umidade antecedente do solo (BASTOS, 2009). A equação SCS é um modelo empírico produzido com mais de 20

anos de estudos envolvendo relações chuvas-escoamento em pequenas bacias hidrográficas rurais dos Estados Unidos, sendo representada por:

$$Q_{surf} = \frac{(R_d - I_a)^2}{(R_d + I_a + S)} \quad (4)$$

Onde Q_{surf} é o escoamento acumulado ou excesso de precipitação (mm H₂O); R_d é a profundidade de precipitação para o dia (mm H₂O), I_a é a abstração inicial que inclui o armazenamento na superfície, interceptação e infiltração anterior ao escoamento (mm H₂O), e S é o parâmetro de retenção (mm H₂O), este parâmetro varia espacialmente devido à mudanças no solo, em seu uso e gestão e com a declividade e temporalmente devido à mudanças na quantidade de água no solo, a equação para se obter o valor de S é dada pela equação 5:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Onde CN é o número da curva para o dia, sendo um valor tabelado para cada uso e tipo do solo e I_a é normalmente aproximado como 0,2 vezes o valor de S . O escoamento irá ocorrer quando a precipitação R_d superar o valor de I_a .

O parâmetro CN varia de 1 a 100, e é determinado em função do grupo de solo, uso e manejo da terra, condição hidrológica e umidade antecedente do solo. O número da curva é o método mais difundido e utilizado mundialmente, principalmente devido à facilidade do seu uso, utilizando apenas quatro características da bacia hidrográfica, e por ser desenvolvido por uma agência com alta credibilidade (MACHADO, 2002).

A metodologia de Infiltração de Green-Ampt retrata a infiltração em função da condutividade hidráulica do solo saturado e das umidades inicial e de saturação do solo, e não em virtude do tempo de ocorrência do processo. A equação assume o excesso de água na superfície em todo o tempo, considerando a homogeneidade do perfil do solo e que a umidade antecedente é distribuída de uma forma uniforme nesse perfil (CECÍLIO et al., 2003; NEITSCH et al., 2009).

O modelo também calcula, através do método racional modificado, o índice máximo de escoamento, que representa o fluxo máximo que ocorre em um determinado evento de pluviosidade:

$$q_p = \frac{C i A}{3,6} \quad (6)$$

Onde, q_p é o índice máximo de escoamento (m^3/s), C : coeficiente de escoamento; i : intensidade da chuva (mm/h), A é a área da sub-bacia (km^2) e 3,6 é um fator de conversão de unidade.

O tempo de concentração na bacia referente ao tempo que a partir do início de uma chuva, uma gota d'água flui desde o ponto mais remoto da sub-bacia até a saída dela, ou seja, toda a área da sub-bacia está contribuindo para o fluxo no ponto de saída. No SWAT esse tempo é determinado pelos tempos do escoamento superficial e no canal:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (7)$$

O t_{ov} é o tempo de concentração para o escoamento superficial (horas) e t_{ch} é o tempo de concentração para o escoamento do canal (horas).

Para determinar a percolação de água no solo, que é feita separadamente para cada camada, o SWAT combina um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo, com a metodologia de rota de armazenamento. A água só irá percolar se a umidade do solo exceder a capacidade da umidade do campo e a percolação em cada camada é definida pela equação 8 a seguir:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} (1 - \exp[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}]) \quad (8)$$

Em que $w_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola na camada de solo subjacente em um determinado dia ($mm H_2O$), $SW_{ly,excesso}$ é o volume de água drenável na camada do solo em um determinado dia ($mm H_2O$), Δt é o intervalo de tempo (horas) e TT_{perco} é o tempo de duração da percolação (horas).

O fluxo de água subterrânea advindo do aquífero raso e que atingi o canal principal (fluxo de base) em um dia só ocorre se a quantidade de água armazenada no aquífero exceder um valor limite. Esse fluxo é determinado por:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \exp[\alpha_{gw} \Delta t] + w_{rchr,sh} (1 - \exp[-\alpha_{gw} \Delta t]) \text{ se } aq_{sh} > aq_{shthr,q} \quad (9)$$

$$(Q_{gw,i} = 0) \text{ se } aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (10)$$

Onde $Q_{gw,i}$ é o fluxo de água subterrânea para o canal principal no dia i (mm H₂O), $Q_{gw,i-1}$ é o fluxo de água subterrânea para o canal principal no dia $i-1$ (mm H₂O), Δt é o intervalo de tempo (1 dia), $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm H₂O), α_{gw} é a constante de recessão do escoamento de base, aq_{sh} é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm H₂O) e $aq_{shthr,q}$ é o limite do nível de água no aquífero raso para que possa ocorrer a contribuição das águas subterrâneas para o canal principal (mm H₂O).

Em relação aos processos de fluxo no canal principal, para o cálculo do armazenamento de água no rio ao fim do intervalo de tempo em análise, o modelo realiza um equilíbrio hídrico considerando a entrada e saída de água em todos os processos envolvidos, utilizando a seguinte fórmula:

$$V_{s2} = V_{s1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (11)$$

Sendo V_{s2} o volume de água no rio no final do intervalo de tempo; V_{s1} é a quantidade de água no rio no início do tempo; V_{in} consiste no volume de água fluindo para o rio no intervalo de tempo e V_{out} o volume que foi para fora; $tloss$ é o volume de água perdido do rio via transmissão através do leito; E_{ch} é a evaporação para o dia; div é o volume de água adicionado ou removido do rio para o dia através de desvios e V_{bnk} é o volume de água adicionado ao rio através de fluxo de retorno vindo do armazenamento da margem. Todos os componentes da equação encontram-se na unidade de medida m³ H₂O.

A vazão e a velocidade das águas no segmento de um rio são determinadas pela equação de Manning para o fluxo uniforme:

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} * R_{ch}^3 * slp^2}{n} \quad (12)$$

$$v_c = \frac{R_{ch} * slp^2}{n} \quad (13)$$

Em que q_{ch} representa a vazão no canal (m³/s), A_{ch} é a área da seção transversal do fluxo do canal (m²), R_{ch} consiste no raio hidráulico para uma dada profundidade (m),

slp_{ch} é a declividade ao longo do canal (m/m), n é o coeficiente de Manning “n” para o canal e v_c consiste na velocidade do fluxo (m/s). Como o SWAT direciona a água como volume, esse é utilizado para determinar a área da seção transversal, juntamente com o comprimento do rio.

Apesar da grande aplicabilidade do SWAT, como qualquer modelo de simulação que busca representar a ocorrência de eventos, considerados complexos no ambiente, o modelo apresenta certas limitações, algumas de ordem climática, como a não interpretação de chuvas intensas em curtos períodos de tempo e a variabilidade espacial de dados de precipitação, ou seja, a resolução espacial de dados climáticos (BENAMAN et al., 2005; MORO, 2005). Outras em relação à processos subterrâneos, Machado (2002) relata em seu estudo a dificuldade de um balanceamento completo dos componentes que simulam a água subterrânea, evidenciando esse problema na simulação hidrológica de bacias hidrográficas, uma vez que o tempo de resposta desses processos é menor que o período adotado para a simulação dos procedimentos que ocorrem na superfície. Ainda nesse aspecto, Lee e outros (2005) indicam que o programa encontra dificuldades na descrição da distribuição dos níveis freáticos em escala temporal e espacial, e na consideração do impacto de aquíferos profundos na resposta hidrológica da bacia.

Benaman e outros (2005), mostraram em sua pesquisa três limitações primárias da modelagem com o SWAT: modelagem do degelo, simulação na evapotranspiração e estimativa de processos de erosão de sedimentos, este último principalmente devido à natureza heterogênea de bacias e ao uso de equações, que segundo os autores, são relativamente não refinadas, como a equação universal de perda de solos modificada (MUSLE). Andrade e outros (2013) ressaltaram outro aspecto como desvantagem do modelo: a não disponibilidade de alimentação do SWAT, em forma de mapas, das informações sobre atributos físicos do solo, como armazenamento de água e condutividade hidráulica. Lopes (2008) identificou em seu estudo uma limitação na modelagem de pequenas bacias, em função da perda de sensibilidade na resposta da bacia, devido ao passo do tempo de geração dos dados de saída (diário). Apesar de todas as deficiências acima citadas, Lelis e Calijuri (2010) consideram a dificuldade na determinação de parâmetros regionais, necessários para inserção no banco de dados do SWAT, como a principal a ser relatada.

Devido à sua abrangência e flexibilidade, a aplicação do modelo SWAT pode ser conduzida com uma diversidade de objetivos e para os diferentes processos que ocorrem em um sistema ambiental. Pereira e outros (2014) utilizaram o SWAT para modelar a vazão na bacia hidrográfica do Córrego do Galo, localizada no Espírito Santo, simulando vazões máximas e mínimas diárias anuais e vazões mínimas de referência para outorga de uso da água, e concluíram através do processo de calibração e validação, que o modelo SWAT teve desempenho satisfatório na simulação dessas variáveis na bacia. Malluta (2012) analisou a produção hidrosedimentológica na bacia do rio Negrinho – SC, e obteve bons ajustes entre dados simulados e observados para vazão e sedimento, a autora evidenciou que 11% da área da bacia apresentou uma produção de sedimento maior que sua tolerância de perda de solo.

Outra finalidade do SWAT é a avaliação de cenários, Blainski e outros (2008) estimaram a produção de vazão na bacia do Rio Araranguá – SC, com diferentes usos do solo (arroz irrigado, reflorestamento e solo exposto) e indicaram o modelo como uma ferramenta importante na previsão de alterações de vazão em função do uso do solo. Monteiro e outros (2016) com o objetivo de avaliar a eficácia de fontes alternativas de obtenção de dados de precipitação, aplicaram o SWAT para simular a vazão na bacia do Tocantins, utilizando como dados de entrada, os valores de precipitação estimados com o método alternativo. Os resultados de saída de vazões foram submetidos a uma calibração, que retornou índices estatísticos satisfatórios entre a vazão simulada e observada, evidenciando a eficiência do método de geração de séries de precipitação.

Os trabalhos desenvolvidos com a ferramenta SWAT expandiram consideravelmente nos últimos anos no Brasil, os pesquisadores brasileiros cada vez mais vêm apresentando familiaridade com o modelo (BRESSIANI et al., 2015). Segundo Garbossa e outros (2011) o primeiro registro do uso do SWAT no país ocorreu no ano de 1999 com o trabalho de Oliveira e Medeiros apresentando no XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, o estudo avaliou impactos causados por modificações no uso do solo em bacias hidrográficas. E até então uma diversidade de trabalhos pode ser encontrada na literatura para as diversas regiões brasileiras. Um levantamento feito por Bressiani e outros (2015) mostrou que a maioria dos estudos utilizando esse modelo aconteceu na região Sul, seguida por Sudeste, Nordeste,

Centro-Oeste e Norte, essa última com uma disponibilidade incipiente de estudos. A pesquisa apontou que os processos predominantemente modelados estão ligados à vazão e sedimentos, ademais têm-se previsões de nutrientes/pesticidas, evapotranspiração e revisões teóricas ou apenas o delineamento de bacias hidrográficas.

Tabela 2 - Estudos com o modelo SWAT no Brasil.

Processo modelado	Região brasileira do local de estudo	Autor (es)
Vazão	Centro-Oeste	Baldissera (2005); Castro (2013); Ferrigo (2014)
	Sudeste	Fukunaga (2012); Barbarotto (2014); Oliveira (2014); Bressiani (2016)
	Sul	Brighenti (2015)
Produção de Sedimentos	Sudeste	Lelis e outros (2012); Kuwajima (2012)
	Sul	Adriolo e outros (2008)
Hidrossedimentológico	Centro-Oeste	Carvalho (2014)
	Sudeste	Malluta (2012); Tesch (2015)
	Sul	Lopes (2008); Uzeika (2009); Perazzoli e outros (2013)
	Nordeste	Fernandes (2015); Dantas e outros (2015)

Nos diversos trabalhos avaliados constatou-se uma constante aplicação dos procedimentos inerentes ao processo de modelagem: análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros, e que serão comentados nas seções a seguir.

3.3.2 Análise de Sensibilidade

Os modelos hidrológicos são extremamente sensíveis à qualidade dos seus dados de entrada, sendo que a precisão de um determinado modelo depende dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e da representatividade de cada um. Para determinar a relevância de cada parâmetro é necessária a realização de análise de sensibilidade, das diversas variáveis, pela qual se avalia a intensidade de cada alteração deles sobre os resultados da modelagem. Outro fator importante que credencia a realização desse tipo de análise resulta da

dificuldade na aquisição de quantidade de dados consistentes suficiente para simulação do transporte de poluentes pelo escoamento superficial (ADRIOLO et al., 2008; PORTO, 1995; LENHART et al., 2002).

Cibin e outros (2010) destacam a importância da identificação dos parâmetros sensíveis para que possam ser utilizados na etapa de calibração do modelo, e afirmam que tais parâmetros podem variar consideravelmente entre bacias hidrográficas e diferentes períodos de tempo de simulação. Desta forma, para qualquer estudo feito através de modelagem, independente das circunstâncias, torna-se imprescindível a avaliação da sensibilidade dos parâmetros referentes ao modelo. Algo também defendido por Jha (2011), que salienta o fato de que a sensibilidade de um parâmetro em uma determinada bacia hidrográfica pode não refletir o mesmo nível de sensibilidade em outra bacia hidrográfica, podendo variar de uma para outra. Sendo assim, a sensibilidade precisa ser avaliada minuciosamente antes de se iniciar o processo de calibração.

A análise de sensibilidade de um modelo é essencial tanto durante o seu desenvolvimento como na redução de suas incertezas. Conhecer a sensibilidade de cada parâmetro é interessante uma vez que a resposta dada pelo modelo não é igual para todos os parâmetros. O SWAT requer um número elevado de dados de entrada, não sendo viável estudar a incerteza de todos. Desta forma, é importante que se identifiquem os parâmetros que exercem maior influência no modelo e sua importância na geração dos resultados (LENHART et al., 2002; ADRIOLO et al., 2008; LELIS et al., 2012).

Na definição da sensibilidade de um parâmetro no modelo, a determinação dos intervalos para a sua variação é de suma importância. A delimitação dos limites de variação deve ser definida de acordo com a realidade do parâmetro para a bacia simulada. Caso isso não ocorra, parâmetros que não apresentam sensibilidade podem mostrar-se mais sensíveis e parâmetros que são realmente relevantes podem ser descartados por apresentarem sensibilidade baixa, resultando em calibração que despreze critérios físicos, saindo da realidade local da bacia hidrográfica (CASTRO, 2013).

A determinação da sensibilidade dos parâmetros no SWAT pode ser realizada de forma automática ou manual, a manual consiste na alteração de dados específicos dentro de sua faixa permitida, sendo que um parâmetro de entrada por vez é alterado,

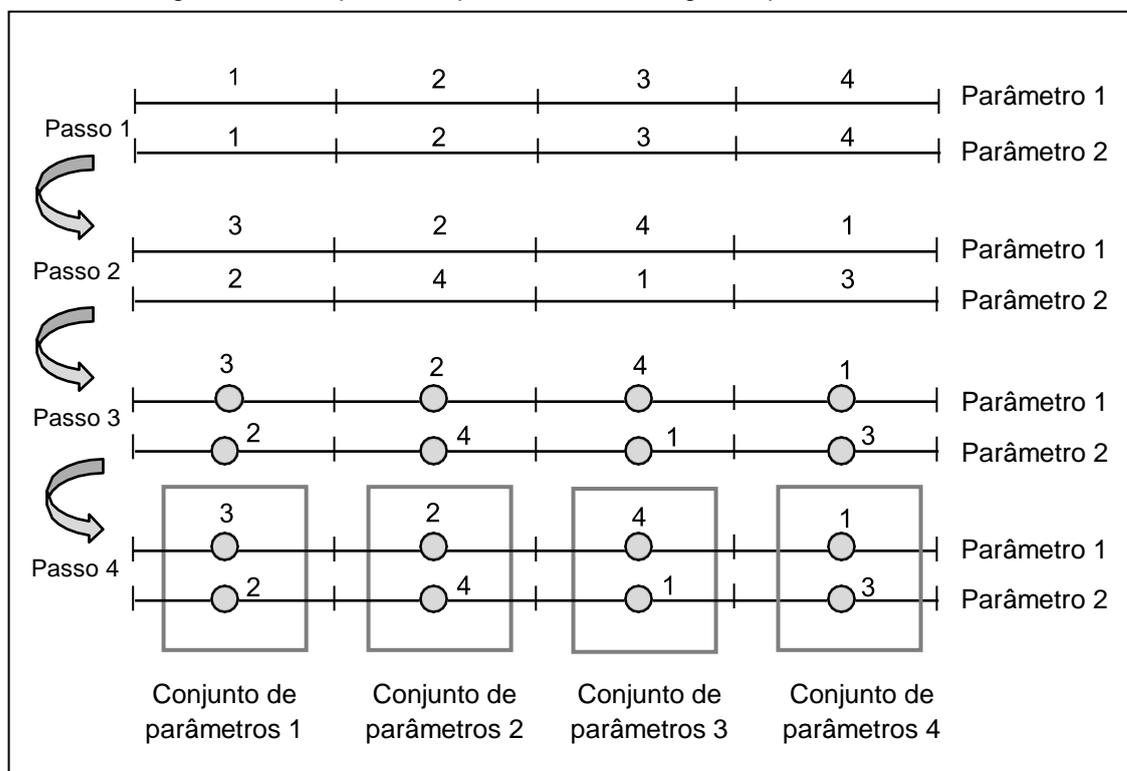
enquanto os outros são mantidos constante, a automática é realizada por uma interface conjunta com a calibração, podendo variar vários parâmetros ao mesmo tempo ou um por vez (SCHMALZ e FOHRER, 2009; LELIS et al., 2012). Em termos de processo automático, as etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT, até a versão 2009.93.7b, são realizadas no próprio ArcSWAT. Para as versões mais recentes do modelo (2012.10.19) esses processos passaram a ser executados em outra interface, o SWAT-CUP, desenvolvido por Abbaspour e outros (2007b). A sensibilidade dos parâmetros nessa plataforma pode ser realizada de duas maneiras: (a) Análise de Sensibilidade Global e a (b) Análise de Sensibilidade *One-at-a-time*.

Os parâmetros no SWAT-CUP são amostrados pelo método Hipercubo Latino (LH), que consiste na divisão da faixa de valores do parâmetro, definida pelo usuário, no número de simulações. Cada simulação corresponde a um segmento de parâmetros, que são colocados de forma aleatória e uma amostra é retirada do meio de cada segmento, cada combinação vertical é um conjunto de parâmetros (ABBASPOUR, 2015). Essa estratificação é uma distribuição das variáveis de entrada da simulação em n partes de igual probabilidade, onde um valor do parâmetro é selecionado no ponto médio. Esses valores que irão compor a amostra hipercúbica (MALLETA, 2005).

A análise global é determinada por um cálculo de regressão múltipla que regressa os parâmetros gerados pela amostragem LH contra os valores das funções objetivos. Logo após um teste estatístico (t-test) é aplicado para identificar a significância relativa de cada parâmetro. Essa sensibilidade é diagnosticada através das alterações médias na função objetivo em resposta as alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados. O programa retorna dois valores estatísticos para cada parâmetro, o t-stat e o p-value, o primeiro compreende o coeficiente de um parâmetro, na regressão múltipla, dividido pelo seu erro padrão, se o coeficiente possui um valor maior comparado ao erro, então é provável que seu valor seja diferente de zero e o parâmetro é considerado sensível. Porém para este tipo de análise a avaliação principal está relacionado com o p-value de cada parâmetro. Um p-value < 0,05 indica que é possível rejeitar a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero e não possui efeito sobre os resultados da modelagem, ou seja, parâmetros que se encaixam nessa representação serão mais significativos ao modelo pois a alteração em seus valores resulta em mudanças consideráveis na

variável de resposta. Sendo assim, quanto maior o t-stat (em valores absolutos) e menor o p-value, maior será a sensibilidade do parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

Figura 5 - Exemplo da sequência da amostragem Hipercubo Latino.



Fonte: Adaptado de Zhang e outros (2016) e Abbaspour (2015).

A análise de sensibilidade *One-at-a-time* determina a sensibilidade de um parâmetro enquanto todos os outros são mantidos constantes. O parâmetro é alterado em uma determinada faixa, sendo escolha do usuário o número de simulações. Os resultados dessa análise são relatados apenas com uma visualização gráfica de cada valor de parâmetro utilizado na simulação, sendo que parâmetros não sensíveis podem resultar em valores muito próximos ou praticamente iguais e aqueles com maior sensibilidade mostrarão uma variedade maior nos valores de saída simulados (ABBASPOUR, 2015). É importante mencionar que a análise de sensibilidade global avalia mudanças nos valores da função objetivo, enquanto a *One-at-a-time* avalia mudanças diretamente na variável de saída do modelo SWAT, sendo alternativa única para a realização da análise de sensibilidade dos parâmetros quando não há registros de variáveis medidas em campo.

3.3.3 Calibração de modelos

Na modelagem ambiental é de extrema importância ressaltar os aspectos fundamentais sobre os quais a própria essência de um modelo é contemplada. Se um

modelo tem por objetivo representar a realidade, seja como ocorre ou como é medida, somente poderá cumprir sua função quando os seus dados de entrada sejam considerados representativos desta realidade a qual se busca retratar (VON SPERLING, 1993).

Com o intuito de diminuir incertezas inerentes à uma representação da realidade, uma vez que a aplicação de modelos apresenta uma descrição aproximada do sistema em estudo, além de possuírem peculiaridades muitas vezes não conhecidas por completo, uma calibração do modelo aplicado é necessária. Outro fator que reforça o uso desta técnica é devido à variabilidade espaço-temporal dos processos simulados que podem interferir na validade do modelo. Sendo assim, pode-se considerar a calibração uma fase crítica e essencial no processo de modelagem (BONGANHA et al., 2007; JANSSEN e HEUBERGER, 1995; LELIS et al., 2012).

Normalmente alguns parâmetros de modelos ambientais não podem ser adquiridos de forma direta, através de medições específicas. E aqueles que são passíveis de mensuração estão sujeitos à erros de medições, além de consumirem tempo e dinheiro de laboratórios. Dessa forma, a calibração aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos e dos sistemas (ABBASPOUR et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2009).

A etapa de calibração consiste em alterar os valores dos parâmetros (coeficientes) de entrada do modelo, objetivando que as estimativas de saída representem de maneira satisfatória e com a maior proximidade possível um conjunto de dados observados em campo e que, por consequência, reduz a incerteza de sua previsão e aumenta a confiabilidade desse modelo (ARNOLD et al., 2012; MADSEN, 2000; VON SPERLING, 2014).

Este processo pode ser realizado de forma manual ou automática, ou uma combinação das duas técnicas. A calibração manual é realizada através de métodos como a tentativa e erro, onde o modelo é executado várias vezes e analisa-se os resultados afim de que se possa observar os ajustes à dados reais. Este processo é indicado para usuários experientes, que contam com conhecimentos específicos sobre a influência dos parâmetros no processamento do modelo, o que facilita e agiliza essa etapa da modelagem. Do contrário, acaba tomando tempo e muitas vezes torna-se ineficiente. Como alternativa a este método têm-se a calibração automática, que ganhou força com o aumento da velocidade computacional. O ajuste automático é realizado através de técnicas de otimização, que com o auxílio de algoritmos de busca

determinam diversos conjuntos de parâmetros que retornam uma boa correlação das variáveis de saída do modelo com os dados observados em campo, ou seja, otimizam uma função objetivo (COLLISCHONN e TUCCI, 2003).

De uma forma ideal, a calibração deve ser baseada e processada enquanto leva em consideração as incertezas estruturais do modelo, e incertezas referentes à parâmetros e à valores de entrada (ARNOLD et al., 2012). Nesse sentido, diversos estudos ao longo do tempo voltados ao ajuste de modelos hidrológicos (ABBASPOUR et al., 1999; VAN GRIENSVEN e BAUWENS, 2003; WU e CHEN, 2015) aplicaram o método da modelagem inversa, uma técnica útil em análises conceituais, condições de contorno e de processos predominantes de fluxo sub e superficial em simulações ambientais (ABBASPOUR et al., 2004), sendo a metodologia mais aplicada nas pesquisas recentes sobre calibração de modelos. Segundo Carvalho (2002) a modelagem inversa parte de uma estrutura existente para obter os processos e parâmetros que determinaram aquela estrutura. Em modelos de simulação hidrológica, este procedimento ocorre com o ajuste das variáveis de saída aos dados medidos na realidade da bacia, através da modificação, em diferentes faixas, de parâmetros de entrada do processo, o que conduz à uma estimativa desses parâmetros.

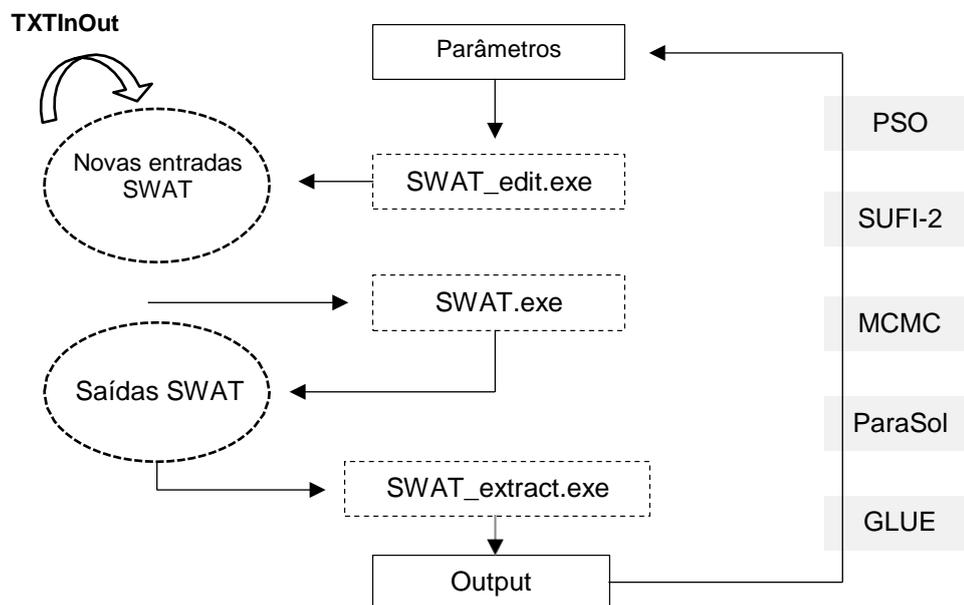
Entre as vantagens da aplicação da modelagem inversa estão a clareza na determinação dos valores dos parâmetros que produzem o melhor ajuste possível às observações disponíveis, oferece estatísticas que quantificam aspectos como a qualidade da calibração e falhas nos dados, além de indicar a confiabilidade das estimativas e previsões dos parâmetros e identifica questões que podem ser negligenciadas durante a calibração não automatizada. Em termos de divulgação dos resultados da modelagem, a quantificação da qualidade da calibração, as deficiências dos dados e a confiança nas estimativas e previsões dos parâmetros tornam-se concepções importantes (HILL, 1998).

Como comentado na seção sobre análise de sensibilidade, a etapa de calibração do modelo SWAT, em sua nova versão, é realizada pelo SWAT-CUP. Essa plataforma é um programa de calibração automatizada, que conta com cinco algoritmos diferentes de otimização: *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC), *Parameter Solution* (ParaSol), *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) e o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) (CORREIA, 2013).

Segundo ABBASPOUR e outros (2007b), o desenvolvimento do SWAT-CUP teve como principais objetivos:

- Integrar vários procedimentos de calibração e análises de incertezas do SWAT em uma única interface de usuário.
- Facilitar o processo de calibração para uso de estudantes e profissionais.
- Fazer com que o aprendizado do programa para iniciantes seja facilitado.
- Proporcionar uma forma mais rápida de realizar as operações de calibração, normalmente demoradas, e padronizar etapas de calibração.
- Adicionar funcionalidades extras, como criação de gráficos e resultados calibrados, comparação de resultados, entre outros.

Figura 6 - Esquema da ligação entre os programas de otimização do SWAT-CUP e o SWAT.



Fonte: Adaptado de Abbaspour (2015).

O conceito geral de funcionamento do SWAT-CUP é ilustrado na Figura 6, após a escolha do algoritmo que se deseja utilizar e da inserção de novos valores dos parâmetros na plataforma SWAT-CUP, esses valores são inseridos no arquivo de texto do SWAT, através do SWAT_edit.exe, logo após ocorre uma simulação do SWAT (SWAT.exe) que fornecerá novos valores de saída. O programa

swat_extract.exe extrai as variáveis desejadas dos arquivos de saída do SWAT e os grava em output. A principal função do SWAT-CUP é realizar essa ligação entre entrada/saída do programa de calibração com o modelo, até que se atinja um certo critério satisfatório de calibração (ABBASPOUR, 2015; ROSTAMIAN et al., 2008).

Para o programa computacional SWAT-CUP, a otimização comumente aplicada na literatura é a segunda versão do *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI), o SUFI-2. Abbaspour e outros (2004) descrevem o SUFI-2 como um algoritmo de pesquisa global, que através da análise das matrizes: Jacobian e Hessian, avalia o comportamento de uma função objetivo. De acordo com Rocha (2013), esse algoritmo tem como finalidade realizar análise de sensibilidade, calibração multi-paramétrica (multi-critério) e análise de incertezas, podendo avaliar os diversos parâmetros que conduzem o modelo SWAT, de uma forma simultânea e eficiente. Sendo sua principal vantagem a combinação de otimização com análise de incertezas, e lidando com uma vasta quantidade de parâmetros. De uma forma geral, o SUFI-2 é definido como um procedimento de modelagem inversa semi-automatizada para uma análise combinada de calibração-incerteza (ABBASPOUR et al., 2007a).

Os modelos ambientais estão sujeitos à inúmeras incertezas em sua previsão, têm-se incertezas de dados de entrada (erros em medições de precipitações, por exemplo) e incertezas quanto ao modelo conceitual, como simplificações no modelo e a não inclusão na modelagem de processos que ocorrem na bacia hidrográfica. Outra fonte de incerteza está relacionada à parâmetros, como esses representam processos e considerando que um processo pode compensar outro, na modelagem inversa conjuntos diferentes de parâmetros podem resultar em valores de saída idênticos. Esta ocorrência é denominada pelo termo em inglês *non-uniqueness* (não-singularidade) e refere-se às dificuldades de identificação, devido a múltiplos ótimos na superfície de resposta do parâmetro ou diferentes conjuntos de parâmetros ótimos resultantes de diferentes critérios de ajuste do modelo (BEVEN, 2009).

Para Abbaspour (2015) a realização de uma calibração sem considerar incertezas torna-se sem sentido e fornecer resultados ilusórios, assim como Beven (2009) afirma que a previsão final não deve ser o único objetivo da modelagem, as incertezas do modelo também devem ser consideradas para a explicação e compreensão dos sistemas de interesse.

A variação dos parâmetros durante a calibração com o algoritmo SUFI-2 é condicionada para produzir a menor faixa de incerteza possível e englobar a maioria dos dados medidos em campo nessa incerteza de previsão, que é expressa como distribuições de 95% de probabilidade, no SWAT-CUP denominada de 95PPU. Este intervalo é determinado pelo cálculo à níveis de 2,5 e 97,5% da distribuição acumulativa de uma variável de saída gerada, através da propagação das incertezas dos parâmetros usando a amostragem Hipercubo Latino. Ou seja, as simulações realizadas têm apenas 5% de probabilidade de não serem próximas daquela que obteve o valor ótimo em relação à função objetivo. No início da calibração a banda do 95PPU tende a ser maior, à medida que ocorre as iterações e o intervalo entre os limites inferiores e superiores dos parâmetros vai diminuindo, uma menor faixa de incertezas (95PPU) é alcançada (ABBASPOUR, 2015; BRESSIANI, 2016; ROCHA, 2013).

Com o objetivo de quantificar e relacionar essas incertezas foi proposto pelos autores do algoritmo duas estatísticas, r-factor e p-factor, a primeira relacionada com a largura da banda de incertezas e a outra com a porcentagem dos dados observados inclusos na faixa de resultados da 95PPU. De uma forma ideal, se o modelo representa de uma forma perfeita a bacia hidrográfica, e as medições estão livres de erro, os valores de p-factor e r-factor são 1 e 0, respectivamente. Como na realidade isso é impraticável, a calibração tem por objetivo atingir valores próximos a esses ideais, buscando sempre a menor banda de incertezas com o maior número de dados observados possível dentro dessa faixa.

A espessura média da faixa de 95PPU (R) e o r-factor são calculados pelas equações 14 e 15 a seguir (SETEGN et al., 2010):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{t_i}^n (y_{t_i,97,5\%}^M - y_{t_i,2,5\%}^M) \quad (14)$$

$$r - factor = \frac{R}{\sigma_{obs}} \quad (15)$$

Onde $y_{t_i,97,5\%}^M$ representa o limite superior e $y_{t_i,2,5\%}^M$ o inferior da banda 95PPU, e σ_{obs} é o desvio padrão dos dados medidos. O p-factor representa a porcentagem dos dados que estão inseridos na faixa de 95PPU.

Neste tipo de modelagem inversa, não se deve credenciar a calibração à um conjunto de parâmetros únicos, ou seja, uma solução única para o modelo, isso porque esses parâmetros estão condicionados a diversos fatores, como o modelo de calibração e simulação, a escolha da função objetivo, ao tipo e número de dados medidos, entre outros. Dessa forma, como a calibração é do tipo estocástica, a análise dos dados em relação a incertezas e o resultado final expresso como uma faixa de parâmetros, e não um conjunto único de solução, é de extrema importância (ABBASPOUR, 2015).

3.3.4 Índices Estatísticos

Na área da modelagem uma das etapas consiste na avaliação do desempenho do modelo, que busca identificar qual o grau de proximidade dos seus resultados em relação ao sistema real. Este tipo de análise permite que o modelo seja considerado apropriado para o uso na região de interesse, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. A avaliação quantitativa, que estima esse grau de aproximação do modelo a medições realizadas em campo, é obtida através de índices estatísticos (EPA, 2009; SILVA et al., 2015a). Krause e outros (2005) apontaram as principais razões que tornam a avaliação de desempenho de modelos uma etapa necessária para modeladores:

- Determinar uma estimativa quantitativa da capacidade do modelo em reproduzir o comportamento histórico e futuro da bacia hidrográfica.
- Avaliação de melhorias na abordagem da modelagem, que podem ser observadas através do ajuste de valores dos parâmetros, modificações estruturais do modelo, inclusão de informações adicionais e representação de importantes características espaciais e temporais da bacia hidrográfica.
- Para comparar os resultados da simulação com resultados de estudos anteriores.

Segundo Legates e Macabe (1999) apud Moriasi e outros (2007), as técnicas de avaliação de modelos podem ser divididas em (a) regressões padrões, que determina a força de uma relação linear entre dados simulados e observados, (b) adimensionais, que fornecem uma avaliação relativa do modelo e (c) índices de erros, que quantificam os desvios nas unidades de dados de interesse. Os índices Coeficiente de Determinação (R^2), Coeficiente de Eficiência de Nash e Stoulliffe (NSE, sigla em inglês)

e o Percentual de Viés (PBIAS, sigla em inglês) são exemplos de cada um, respectivamente.

O R^2 descreve a proporção de variância nos dados medidos explicada pelo modelo, varia de 0 a 1, e quanto maior for seu valor há um menor erro na variância, sendo que valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis.

Em trabalhos realizados com o modelo SWAT, na avaliação do ajuste do modelo, um coeficiente amplamente utilizado é o Coeficiente de Eficiência Nash e Sutcliffe, desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970) e dado pela equação:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{mobs})^2} \right] \quad (16)$$

Onde, y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada; y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável; \bar{y}^{mobs} é a média dos dados observados e n é o número total de observações.

O NSE é uma estatística normalizada, que determina a magnitude relativa da variância residual comparada com a variância dos dados medidos, indicando o ajustamento dos dados simulados e observados na reta 1:1 (linha de regressão com linha igual a 1). Este coeficiente varia entre $-\infty$ e 1, sendo que NSE igual a 1, indica um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados, valores entre 0 e 1 são valores aceitáveis de performance do modelo e NSE menor que 0 indica um desempenho não aceitável, desta forma a média dos valores observados é uma melhor previsão do que os valores simulados (MORIASI et al., 2007; ARNOLD, 2012).

O Percentual de Viés (PBIAS) mede a tendência dos dados simulados a serem maiores ou menores que os dados observados, sendo seu valor perfeito igual a 0. Resultados de baixa grandeza demonstram uma simulação precisa do modelo. Neste índice valores negativos indicam que o modelo superestimou os dados, enquanto os positivos demonstram uma subestimação (GUPTA et al., 1999 apud MORIASI et al., 2007). O PBIAS (%) é obtido a partir da seguinte equação:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs})} \right] \quad (17)$$

Assim como no NSE, y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada e y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável.

A relação entre valores de índices estatísticos e o desempenho de um modelo, proposta por Moriasi e outros (2007) é apresentada na Tabela 3 abaixo. Os autores realizaram uma extensa pesquisa na literatura, avaliando classificações de desempenho relatadas e valores desenvolvidos em estudos individuais para propor essa classificação.

Tabela 3 - Faixas de performance dos índices estatísticos para simulações mensais.

Desempenho	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Adaptado de Moriasi e outros (2007).

O estudo citado comenta que para valores simulados em um passo de tempo diário, os índices estatísticos podem ser menos rigorosos. Em uma pesquisa realizada com o SWAT, Green e outros (2006) consideraram um $NSE > 0,4$ como um desempenho satisfatório do modelo e citaram o trabalho de Chung e outros (2002) que usou um padrão aceitável de $NSE > 0,3$, porém para outro modelo de simulação. Wu e Chen (2009), Oliveira (2014) e Ferrigo (2014) adotaram o $NSE > 0,4$ como critério de satisfação do modelo SWAT. Lutz (2009) e Schultz e outros (2010) relataram baixos valores de NSE para simulações diárias no SWAT quando comparadas com as mensais. Sendo assim, neste estudo para a simulação mensal utilizou-se os critérios da Tabela 3 e para os valores diários alterou-se apenas o fundamento do coeficiente de eficiência NSE, considerando o modelo satisfatório para um $NSE > 0,4$.

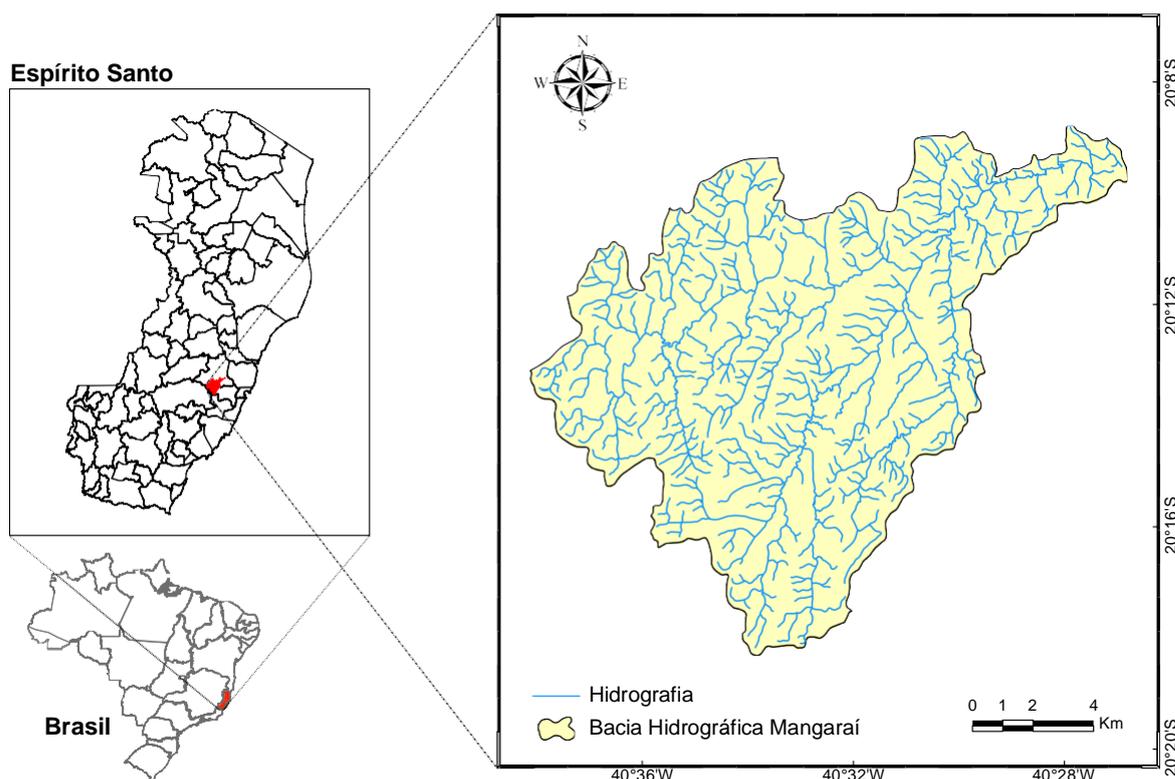
Krause e outros (2005) recomendam uma combinação de diferentes critérios de desempenho do modelo, para que a calibração científica seja considerada eficiente. Segundo os autores para incluir toda a dinâmica dos resultados do modelo, o objetivo da avaliação deve ser fornecer bons valores para um conjunto de medidas, mesmo que estes sejam menos satisfatórias do que as melhores simulações encontradas para um índice estatístico único.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica experimental objeto de estudo deste trabalho é a bacia do Mangaraí (BHRM), localizada entre os municípios de Cariacica e Santa Leopoldina (com sua maior parte inserida no segundo), no estado do Espírito Santo, na região sudeste do Brasil. Apresenta uma área de aproximadamente 164 Km², e o rio principal, o Mangaraí, tem 14 km de comprimento. Os principais afluentes são o Braço do Mangaraí, Cachoeira da Fumaça e o Rio do Meio. O rio Mangaraí deságua no rio Santa Maria da Vitória, que logo a jusante é utilizado como fonte de abastecimento de água da região metropolitana de Vitória.

Figura 7 - Localização da Bacia Hidrográfica do Mangaraí.



Fonte: o autor.

O clima do Espírito Santo, que está localizado em uma região tropical, é considerado quente e úmido, sem a presença de estação fria definida. De acordo com a classificação climática de Köppen, a bacia hidrográfica é caracterizada por um clima tropical com seca no inverno (Aw). Este tipo de classificação considera aspectos do regime de chuvas e temperaturas para especificar o clima de cada região

(ANTONGIOVANNI e COELHO, 2005). A altitude média da bacia é 470 m e a precipitação média anual 1029 mm, com temperaturas médias 24°C. Em ponto de monitoramento localizado no rio Mangaraí, próximo à sua foz, onde medições foram iniciadas no ano de 2014, apresenta uma vazão média diária 1,18 m³/s, com valor mínimo 0,05 m³/s e máximo 31,9 m³/s.

4.2 Informações de entrada no modelo

Como salientado na revisão bibliográfica, para a realização da modelagem, o SWAT requer valores de entrada específicos das diferentes características da região em estudo, sendo os principais arquivos de informações: dados climáticos, Modelo Digital de Elevação (MDE) e dados sobre o tipo e uso do solo. A aquisição e a manipulação desses elementos são descritas a seguir.

4.2.1 Dados Climáticos

As informações climáticas utilizadas nesse estudo foram disponibilizadas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural (INCAPER), ligado à Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca (SEAG) do Espírito Santo. O instituto conta com um Sistema de Informações Agrometeorológicas, que possui uma rede de estações de monitoramento distribuídas por todo o estado. No âmbito desta pesquisa foram coletadas informações de estações próximas à bacia hidrográfica do rio Mangaraí, sendo uma estação automática localizada na cidade de Vitória e uma convencional em Viana, no entorno da bacia. Cabe ressaltar que o SWAT realiza simulações para cada sub-bacia, e faz uso dos dados da estação mais próxima de cada sub-bacia. Desta forma, para uma mesma bacia hidrográfica pode utilizar informações de diferentes estações de monitoramento para a modelagem. A estação de Vitória está localizada a uma distância de 20 km, em linha reta, do ponto mais próximo da bacia, e a de Viana a 8 km. Os dados diários utilizados registrados nestas estações foram:

- Temperaturas, máximas e mínimas (°C).
- Precipitação (mm).
- Radiação solar (Kjm⁻²).
- Temperatura de ponto de orvalho (°C).

- Velocidade do vento (m/s).

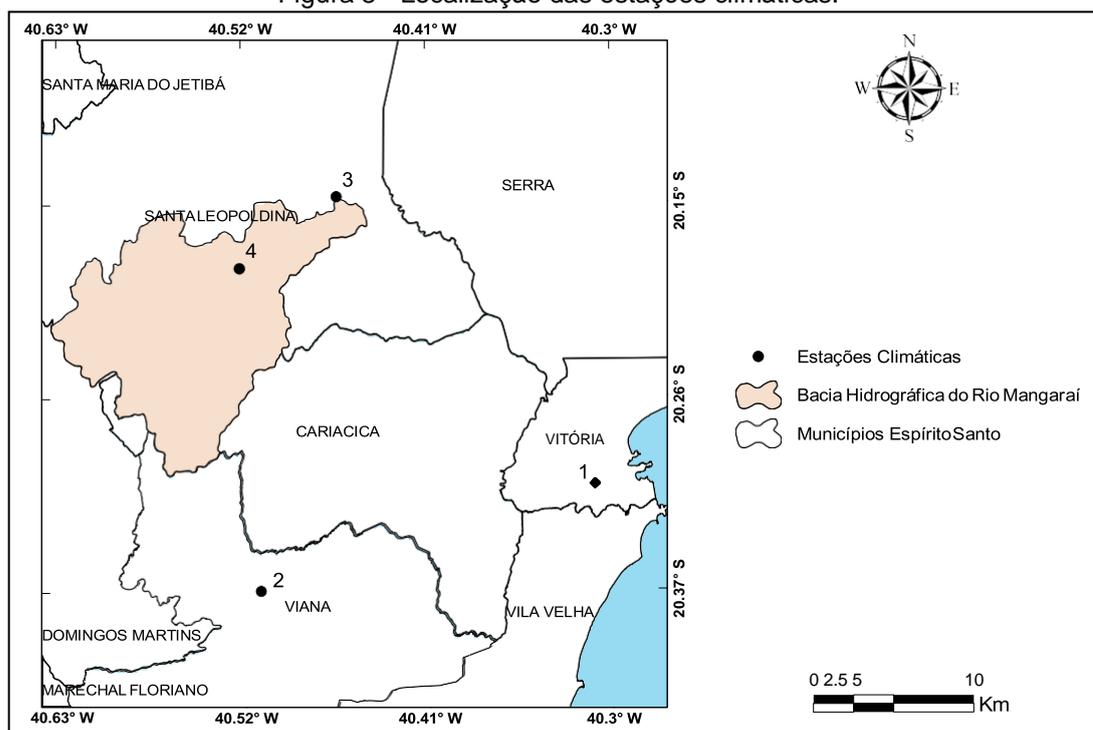
Além dessas estações, foram adicionados dados de precipitação diária registrados na área dos rios Mangaraí e Cachoeira da Fumaça, ambos dentro da bacia hidrográfica. As medições nessas localidades tiveram início em 2014. Estas informações foram obtidas dentro do Projeto Mangaraí, desenvolvido pela Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST) para a CESAN, concessionária de saneamento no estado do Espírito Santo.

Tabela 4 - Informações sobre as estações climáticas.

Estação de Monitoramento	Tipo e domínio	Latitude	Longitude	Altitude (m)	ID*
Vitória	Automática INMET*	20,31°S	40,31°W	9	1
Viana	Convencional INCAPER	20,37°S	40,51°W	20	2
Rio Mangaraí	Convencional FEST/CESAN	20,14°S	40,46°W	14	3
Rio Cachoeira da Fumaça	Convencional FEST/CESAN	20,18°S	40,52°W	180	4

*Instituto Nacional de Meteorologia; ID: Identificação para o mapa da Figura 8.

Figura 8 - Localização das estações climáticas.



Fonte: o autor.

Além dos valores diários que são utilizados na modelagem, o SWAT requer que cálculos estatísticos dos valores mensais das séries de cada estação sejam incorporados ao banco de dados de entrada. Estes valores foram calculados com o auxílio do software Excel:

- **TMPMX:** Média da temperatura máxima do ar diária (°C).
- **TMPMN:** Média da temperatura mínima do ar diária (°C).
- **TMPSTDMX:** Desvio padrão da temperatura máxima do ar diária (°C).
- **TMPSTDMN:** Desvio padrão da temperatura mínima do ar diária (°C).
- **PCPMM:** Média da precipitação total no mês (mm).
- **PCPSTD:** Desvio padrão da precipitação diária (mm/dia).
- **PCPSKW:** Coeficiente de assimetria da distribuição da precipitação sobre a média mensal (adimensional).
- **PR_W1:** Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%).
- **PR_W2:** Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%).
- **PCPD:** Número de dias de precipitação (dias).
- **RAINHHMX:** Precipitação máxima de 0,5 hora (mm).
- **SOLARAV:** Média diária da radiação solar (Mj/m²/dia).
- **DEWPT:** Média diária da temperatura do ponto de orvalho (°C).
- **WNDVAV:** Média diária da velocidade do vento (m/s).

Tabela 5 - Parâmetros meteorológicos da BHRM para entrada no modelo.

Parâmetro	Jan	Fen	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Vitória												
TMPMX	31,1	31,7	31,3	29,7	27,9	27,0	26,3	26,9	27,0	27,8	28,5	30,0
TMPMN	23,5	23,9	23,6	22,5	20,7	19,7	19,2	19,4	20,1	21,1	21,8	22,8
TMPSTDMX	2,5	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,9	3,0	3,0	2,8
TMPSTDMN	1,3	1,1	1,2	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,6	1,7	1,7	1,5

Continua

Continuação

Tabela 5 – Parâmetros meteorológicos da BHRM para entrada no modelo.

Parâmetro	Jan	Fen	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Vitória												
PCPMM	109,9	64,8	91,2	79,8	67,4	55,5	58,4	42,1	55,0	106,4	152,7	145,2
PCPSTD	11,8	8,3	11,9	11,1	9,0	9,4	6,8	5,7	6,5	14,6	15,8	15,0
PCPSKW	-0,5	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,08	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,7	-0,6
PRW1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2
PRW2	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
PCPD	10,1	7,5	9,2	8,7	7,8	7,2	8,7	7,2	9,3	11,2	11,7	11,4
RAINHHMX	63,7	36,2	59,9	48,3	47,4	68,9	29,6	21,0	27,2	106,8	52,3	50,0
SOLARAV	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9
DEWPT	21,1	21,3	21,6	20,6	18,5	17,7	17,4	17,1	17,4	18,8	20,0	21,1
WNDVAV	3,6	3,5	3,2	3,2	3,0	2,7	3,0	3,4	3,7	3,7	3,8	3,5
Viana												
TMPMX	33,2	33,9	32,9	31,6	29,3	28,0	27,6	28,2	28,8	29,9	30,6	32,1
TMPMN	20,6	20,6	20,6	19,5	17,1	15,7	15,2	15,4	16,9	18,4	19,4	20,4
TMPSTDMX	2,8	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,4	3,5	3,3	3,1
TMPSTDMN	1,6	1,7	1,7	2,0	2,1	2,3	2,0	2,2	2,3	2,3	2,3	1,9
PCPMM	140,7	179,2	195,7	111,2	66,5	66,0	63,2	164,1	82,8	186,8	248,2	226,1
PCPSTD	12,2	18,4	15,7	10,3	7,8	8,3	7,8	17,2	7,9	17,1	19,0	16,0
PCPSKW	4,1	3,8	4,0	4,9	7,7	8,3	7,8	17,2	7,9	17,1	19,0	16,0
PRW1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
PRW2	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6
PCPD	9,3	7,5	11,0	9,3	7,4	6,8	7,2	8,5	9,8	11,1	13,4	13,1
RAINHHMX	36,6	47,9	50,0	36,6	39,5	46,4	48,9	32,9	37,0	35,2	57,6	43,7
SOLARAV	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9
DEWPT	24,7	24,9	24,5	23,3	21,1	19,9	19,4	19,7	20,6	21,9	22,8	24,1
WNDVAV	3,6	3,5	3,2	3,2	3,0	2,7	3,0	3,4	3,7	3,7	3,8	3,5

Continua

Continuação

Tabela 5 – Parâmetros meteorológicos da BHRM para entrada no modelo.

Parâmetro	Jan	Fen	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mangaraí												
PCPMM	148,9	143,0	165,4	111,2	44,9	48,0	54,7	94,9	25,5	131,4	85,1	78,9
PCPSTD	13,1	18,4	15,4	12,4	2,7	4,1	4,2	9,9	2,2	14,7	8,7	6,2
PCPSKW	-0,5	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,08	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,7	-0,6
PRW1	0,09	0,09	0,12	0,34	0,21	0,22	0,23	0,06	0,16	0,25	0,24	0,15
PRW2	0,71	0,58	0,67	0,52	0,67	0,61	0,61	0,71	0,56	0,50	0,44	0,56
PCPD	8,5	6,0	9,0	12,5	12,0	11,5	11,5	7,0	8,0	11,0	9,0	8,0
RAINHHMX	23,2	40,3	36,6	24,6	3,9	9,2	7,9	24,4	4,1	28,1	18,3	11,4
Cachoeira da Fumaça												
PCPMM	137,1	127,2	161,4	134,0	76,3	132,4	101,3	93,2	50,2	185,5	270,9	170,3
PCPSTD	11,0	16,8	14,8	12,4	4,1	7,5	6,0	7,3	3,2	12,3	13,9	7,8
PCPSKW	-0,5	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,08	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,7	-0,6
PRW1	0,09	0,09	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,08	0,1	0,3	0,4	0,1
PRW2	0,7	0,6	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6
PCPD	8,0	6,0	10,0	14,0	13,5	16,0	15,0	10,0	11,5	20,0	22,0	17,5
RAINHHMX	16,8	42,5	28,1	29,5	8,0	15,9	14,9	21,0	7,9	24,5	31,5	16,3

Conclusão.

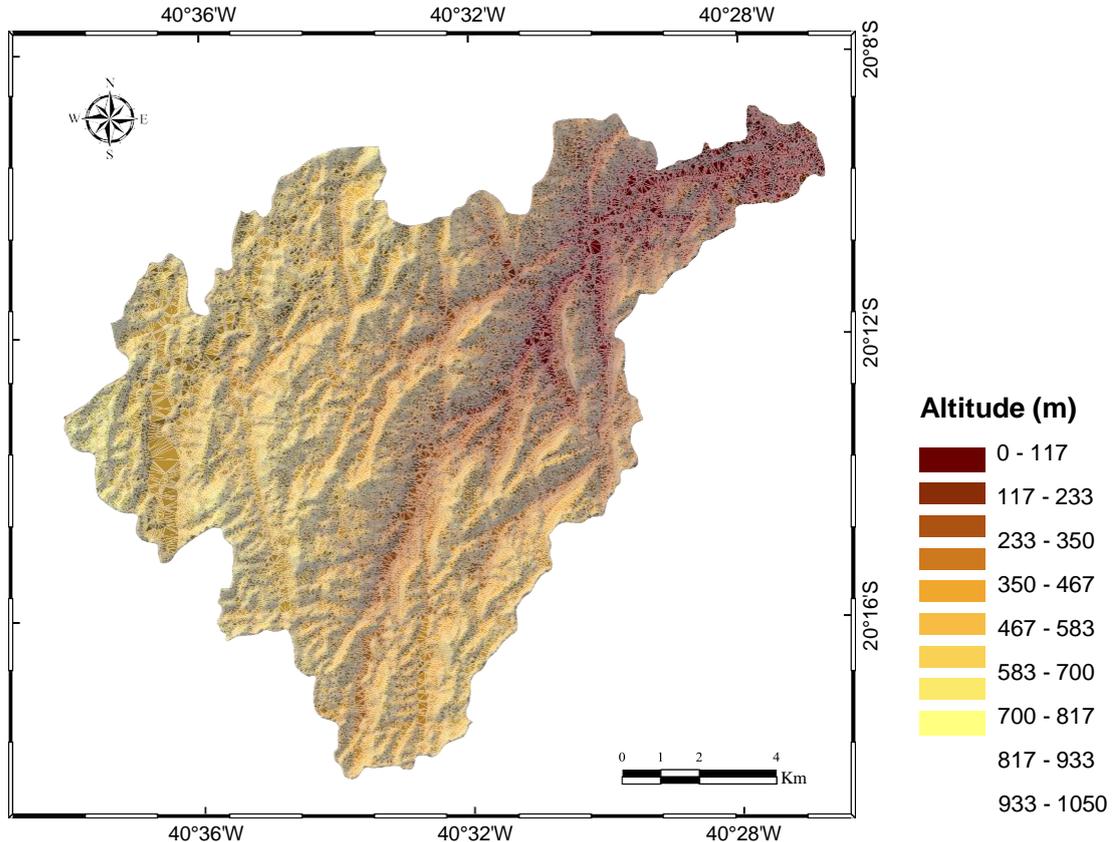
Devido à não disponibilidade de medições de temperatura, radiação solar, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do vento nas estações dos rios Mangaraí e Cachoeira da Fumaça, foram utilizadas as estatísticas da estação de Vitória.

4.2.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Em relação às características de relevo, um Modelo Digital de Elevação pode ser entendido como uma representação matemática contínua da distribuição espacial das variáveis de altitude de uma determinada região, que é construído através de curvas de nível e pontos altimétricos (TENÓRIO e SEIXAS, 2008). Desta forma, as curvas de níveis para a geração do MDE da bacia hidrográfica do rio Mangaraí foram adquiridas do banco de dados online do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do

Espírito Santo (GEOBASES) com escala de 1:250.000. O MDE foi gerado em um ambiente SIG, através da criação de um Rede Triangular Irregular (TIN, sigla em inglês) obtida pela interpolação dos valores de altitude que são representados por um conjunto de faces triangulares, de diferentes tamanhos, interligadas.

Figura 9 - Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Mangaraí.



Fonte: o autor.

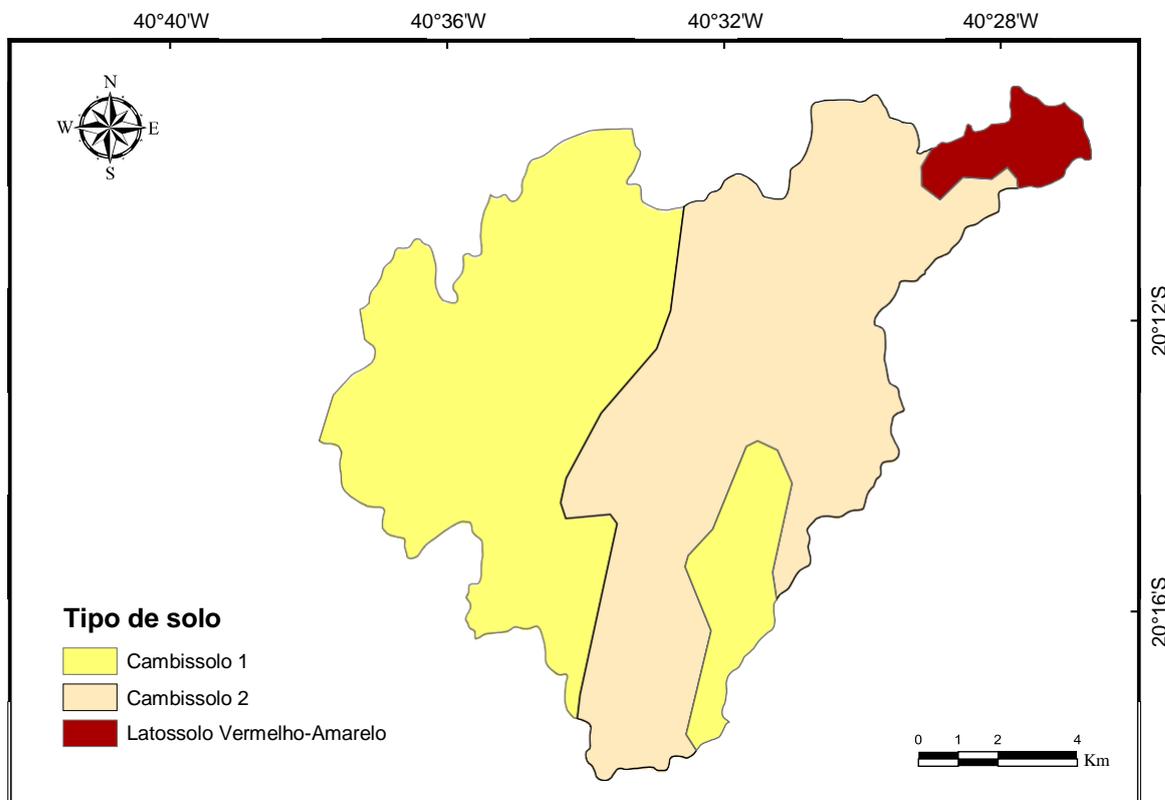
4.2.3 Tipo e uso e ocupação do solo

Os mapas referentes ao tipo e uso e ocupação do solo também foram obtidos junto ao banco de dados do GEOBASES na escala 1:25.000 e delimitados pelos limites da bacia em ambiente SIG.

Os tipos de solos encontrados no contexto da bacia hidrográfica são divididos em Cambissolos e Latossolos, com a predominância de Cambissolos, que para esse trabalho foram denominados de Cambissolo 1 (CAMB1) e Cambissolo 2 (CAMB2). Cada tipo (1 e 2) abrange cerca de 48% da bacia, e o Latossolo-Vermelho Amarelo (LVA) compreende apenas 4% da área total. Segundo a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o CAMB 1 é Cambissolo Háplico Tb Distrófico

não pedregoso e o CAMB 2 é a associação entre o Cambissolo Háplico Tb Distrófico pedregoso com afloramento rochoso.

Figura 10 - Tipos de solos da bacia hidrográfica do rio Mangaraí.



Fonte: GEOBASES.

Os Cambissolos (primeiro nível categórico) são um grupamento de solos poucos desenvolvidos com horizonte B incipiente e com textura média ou mais fina e que, pela presença de minerais primários apresentam características do seu material de origem. O termo Háplico significa que o solo não apresentou características das classificações anteriores em segundo nível (húmicos e fúvicos). Em relação à atividade de fração de argila os Cambissolos da região possuem baixa atividade (Tb). O caráter distrófico refere-se a uma baixa saturação por bases (<50%). Esta classificação, Tb distrófico, remete a solos com baixa fertilidade. Os Latossolos, caracterizam-se normalmente por serem muito profundos, bastante evoluídos e em estágio avançado de intemperização, sendo originados por diversas espécies de rochas e sedimentos e devido a uma variedade de condições climáticas e tipos de vegetação. O Latossolo-Vermelho Amarelo apresenta uniformidade em características de cor, textura e em estrutura em profundidade. Para a bacia

hidrográfica do rio Mangaraí, o Latossolo Vermelho-Amarelo, assim como o Cambissolo, é caracterizado como distrófico (EMBRAPA, 2006).

O banco de dados original do SWAT contém informações sobre os tipos de solos dos EUA. Desta forma, é preciso incrementá-lo com informações sobre as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos típicos da bacia hidrográfica. Essas características foram encontradas no boletim técnico da EMBRAPA (1978), que apresenta levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Espírito Santo. As características solicitadas pelo modelo e adquiridas com o boletim são listadas a seguir:

- **NLAYERS**: nº de horizontes.
- **HYDGRP**: grupo de saturação hidrológica.
- **SOL_ZMX**: profundidade de raiz (mm).
- **ANION_EXCL**: porosidade (fração).
- **SOL_Z**: profundidade da superfície do solo até o fundo da camada (mm).
- **SOL_BD**: massa específica aparente (g/cm).
- **SOL_AWC**: capacidade de água disponível na camada (mm/mm).
- **SOL_CBN**: carbono orgânico (%).
- **SOL_K**: condutividade hidráulica saturada (mm/hr).
- **CLAY**: teor de argila (%).
- **SILT**: teor de silte (%).
- **SAND**: teor de areia (%).
- **ROCK**: teor de pedregulhos e pedras (%).
- **SOL_ALB**: albedo (fração).
- **USLE_K**: coeficiente de erodibilidade do solo ($0.013 \text{tm}^2\text{hr}/\text{m}^3\text{tcm}$).
- **SOL_EC**: condutividade elétrica.

Tabela 6 - Parâmetros dos solos existentes na bacia hidrográfica do rio Mangaraí.

Características	CAMB1	CAMB2	LVA	Características	CAMB1	CAMB2	LVA
NLAYERS	5	5	7	SOL_EC2	0	0	0
HYDGRP	C	C	A	pH2	4,7	5,3	4,1
SOL_ZMX	1270	750	3200	SOL_Z3	920	680	700
ANION_EXC	0,52	0,51	0,55	SOL_BD3	1,16	1,35	1,09
SOL_Z1*	100	120	120	SOL_AWC3	0,2046	0,186	0,1488
SOL_BD1	1,08	1,07	1,32	SOL_K3	3,8	3,8	3,8
SOL_AWC1	0,155	0,1736	0,1054	SOL_CBN3	0,64	0,5	0,67
SOL_K1	3,29	12,5	1,46	CLAY3	48	41	57,04
SOL_CBN1	12,5	3,82	5	SILT3	10,56	32	5,52
CLAY1	33	30	44,65	SAND3	37,44	27	29,44
SILT1	13	31	8,55	ROCK3	4	0	8
SAND1	54	35	41,8	SOL_ALB3	0,15	0,15	0,15
ROCK1	0	4	5	USLE_K3	0,0027	0,04	0,0003
SOL_ALB1	0,15	0,15	0,15	SOL_EC3	0	0	0
USLE_K1	0,0078	0,046	0,0015	pH3	4,8	5,2	4,2
SOL_EC1	0	0	0	SOL_Z4	1270	850	1900
pH1	4,1	5,3	4,4	SOL_BD4	1,36	1,35	1,09
SOL_Z2	270	230	300	SOL_AWC4	0,2046	0,155	0,1612
SOL_BD2	1,1	1,33	1,32	SOL_K4	3,8	3,8	3,8
SOL_AWC2	0,1674	0,1426	0,1302	SOL_CBN4	0,39	0,38	0,39
SOL_K2	1,49	5	4,4	CLAY4	44,1	25	57,66
SOL_CBN2	5	1,6	1,1	SILT4	14,7	39	5,58
CLAY2	44	38	52,25	SAND4	39,2	36	29,76
SILT2	11	25	6,65	ROCK4	2	0	7
SAND2	45	37	36,1	SOL_ALB4	0,15	0,15	0,15
ROCK2	0	0	5	USLE_K4	0,0073	0,106	0,0003
SOL_ALB2	0,15	0,15	0,15	SOL_EC4	0	0	0
USLE_K2	0,003	0,023	0,0006	pH4	4,7	5,2	4,8

Continua

Continuação

Tabela 6 - Parâmetros dos solos existentes na bacia hidrográfica do rio Mangaraí.

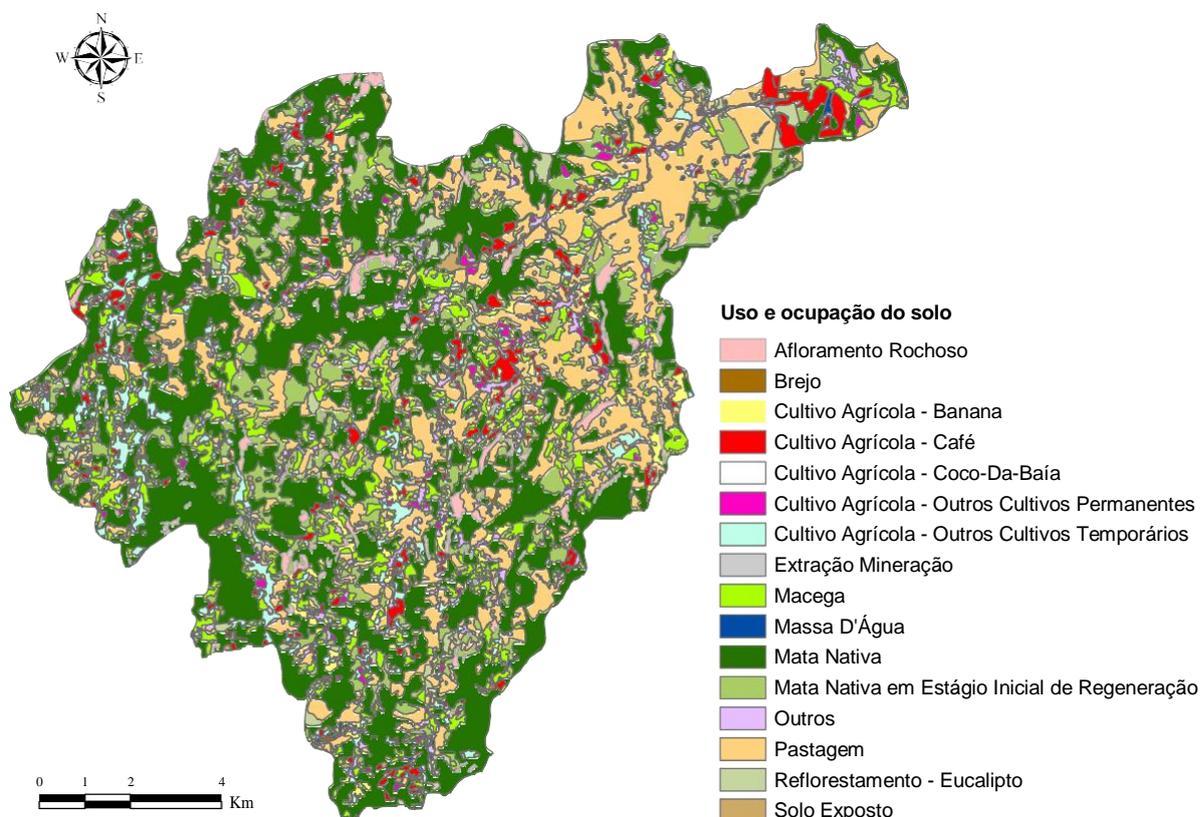
Características	CAMB1	CAMB2	LVA	Características	CAMB1	CAMB2	LVA
SOL_Z5	1620	1550	3200	SOL_AWC6	-	-	0,1488
SOL_BD5	1,42	1,29	1,09	SOL_K6	-	-	3,8
SOL_AWC5	0,1922	0,1426	0,1674	SOL_CBN6	-	-	0,28
SOL_K5	20	20	3,8	CLAY6	-	-	54,6
SOL_CBN5	0,14	0,26	0,35	SILT6	-	-	4,55
CLAY5	23,76	17	57,96	SAND6	-	-	31,85
SILT5	34,65	48	5,52	ROCK6	-	-	9
SAND5	40,59	35	28,52	SOL_ALB6	-	-	0,15
ROCK5	1	0	8	USLE_K6	-	-	0,0002
SOL_ALB5	0,15	0,15	0,15	SOL_EC6	-	-	0
USLE_K5	0,098	0,19	0,0003	pH6	-	-	5,4
SOL_EC5	0	0	0	SOL_Z7	-	-	5700
pH5	4,7	5	5	SOL_BD7	-	-	1,09
SOL_Z6	-	-	4500	SOL_AWC7	-	-	0,155
SOL_BD6	-	-	1,09	SOL_K7	-	-	3,8

*Os valores 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 representam o horizonte do solo.

Conclusão.

Quanto ao uso e ocupação do solo, na bacia hidrográfica do rio Mangaraí (Figura 11) as três maiores composições da bacia são mata nativa, pastagem e mata nativa em estágio inicial de regeneração, 39,67%, 21,43% e 12,43% da área da bacia, respectivamente. É possível identificar algumas áreas agricultáveis, com cultivos agrícolas permanentes e temporários, sendo o café a cultura com maior ocupação na área. Durante a modelagem com o SWAT é preciso caracterizar os usos com as respectivas classificações determinadas pelo programa. Na Tabela 7 apresenta-se o uso do solo, a área ocupada na bacia e a sigla correspondentes à classificação do modelo.

Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mangaraí.



Fonte: GEOBASES.

Tabela 7 - Uso e ocupação do solo na BHRM, porcentagem de composição e respectiva classificação no SWAT.

Uso e ocupação do solo	Área da bacia (%)	Classificação do SWAT
Mata Nativa	39,67	FRSE
Pastagem	21,43	PAST
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	12,43	FRST
Macega	8,06	BBLS
Cultivo Agrícola – Outros Cultivos Temporários	4,26	AGRC
Cultivo Agrícola – Café	3,46	COFF
Outros	2,78	AGRR
Afloramento Rochoso	2,21	AFRL
Cultivo Agrícola – Banana	1,87	BANA
Reflorestamento – Eucalipto	1,82	EUCA
Cultivo Agrícola- Outros cultivos Permanente	1,06	AGRL

Continua

Continuação

Tabela 7 - Uso e ocupação do solo na BHRM, porcentagem de composição e respectiva classificação no SWAT.

Uso e ocupação do solo	Área da bacia (%)	Classificação do SWAT
Solo Exposto	0,61	BARREN
Massa d'água	0,22	WATR
Áreas Alagadas	0,10	WETF
Cultivo Agrícola – Coco da Bahia	0,02	COCO
Extração Mineração	0,01	UIDU

Conclusão.

4.3 Modelagem no SWAT

Após o levantamento dos dados de entrada requeridos pelo modelo, realizou-se a modelagem com o SWAT. O banco de dados atualizado com as informações a respeito das características relacionadas com a BHRM foi incorporado ao modelo durante o início do processo. Por meio da interface SIG, o mapa do MDE foi adicionado e o modelo SWAT gerou a rede de drenagem e delimitou as sub-bacias, 30 no total (Figura 12). Os mapas de tipo e uso do solo foram carregados e os usos classificados conforme especificações do SWAT. A declividade foi redefinida conforme porcentagens de classes, estipuladas conforme os valores estatísticos de declive da bacia (máximo; mínimo; média; e desvio padrão) que são utilizados na determinação das Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU's). Definição das HRU's foi realizada com o objetivo de reduzir o número de unidades criadas, para simplificar a simulação do modelo. Utilizou-se uma combinação de no mínimo 5% para uso, tipo e declividade do solo, ou seja, se qualquer uma das parcelas dessas três características não compusesse ao menos 5% da área sub-bacia, ela não seria incorporada às HRU's. Foram criadas 478 áreas de igual declividade, tipo de solo e cobertura de terra, ao longo das 30 sub-bacias. Após essas etapas, as informações das estações climáticas de monitoramento foram inseridas na seção “*Weather Stations*”, em formato “txt”.

Como os registros de precipitação e vazão na estação localizada no rio Mangaraí foram iniciados em 2014, optou-se por modelar o período entre os anos 2014-2016, sendo que o primeiro ano foi utilizado para o aquecimento do modelo. Esta etapa é de

suma importância, sendo recomendada principalmente para períodos de simulações menores que cinco anos. No início da simulação as condições iniciais do modelo são desconhecidas. Adotando-se o período de aquecimento a simulação fica livre da influência dessas condições. A utilização de um ano para aquecimento é considerada adequada para estabilizar o ciclo hidrológico, e para que seja considerado operacional (ANDRADE et al., 2013; SWAT, 2012).

Objetivando a avaliação do desempenho do modelo, quanto ao passo de tempo e em relação aos dados observados em campo, foram realizadas duas simulações, uma diária e outra mensal, ambas para o período 2014-2016, da variável vazão. Optou-se por avaliar esse parâmetro devido à sua importância na modelagem matemática, relacionada com sua influência no comportamento hidráulico do rio e em virtude da sua capacidade de diluição de despejos afluentes, onde a vazão é a variável de maior relevância neste aspecto (VON SPERLING, 2014).

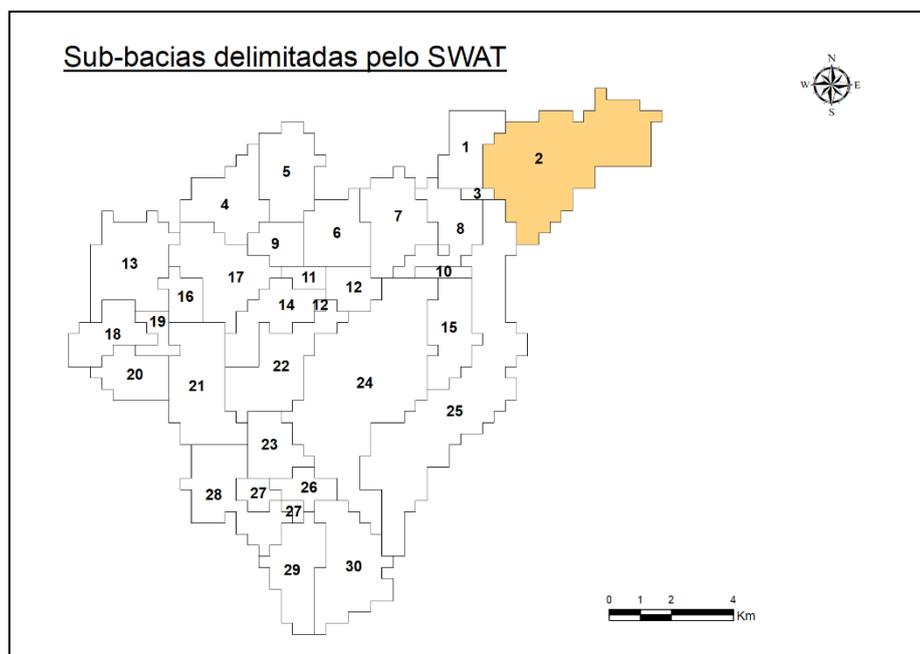
Os valores de saída do modelo compreendem os anos de 2015 e 2016, uma vez que os valores do período de aquecimento não são disponibilizados no banco de dados de saída, por motivo da instabilidade de resultados. Avaliou-se os resultados comparando-os com os dados medidos em campo para uma primeira visão do comportamento da simulação e, a partir disso, foi diagnosticada a necessidade de calibração dos parâmetros do SWAT, na plataforma SWAT-CUP, na versão 5.1.6.2. Foi realizada análise de sensibilidade e de incertezas quanto à previsão do modelo.

4.3.1 Análise de sensibilidade, incertezas e calibração do modelo

Para a realização das etapas de análise de sensibilidade e incertezas, e calibração do modelo, o SWAT-CUP necessita de informações quanto aos valores de parâmetros e das variáveis em estudo medidas em campo. As vazões medidas no rio Mangaraí foram disponibilizados pela FEST/CESAN. Os processos de calibração e análise de incertezas para o cenário real da bacia foram realizados na sub-bacia indicada pelo número 2 através da delimitação automática de sub-bacias do SWAT (Figura 12), localizada no exutório da bacia e onde está inserido o rio Mangaraí, o único com série de valores de vazão medidas em campo. Conta com área aproximadamente 15 Km² e é ocupada predominantemente pelo uso de Pastagem, cerca de 37% da área total da sub-bacia. Outros usos relevantes são: Mata Nativa, Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração e a produção agrícola do Café. A Tabela 8 descreve os usos da sub-bacia 2 e suas respectivas porcentagens de ocupação. Em relação à altitude, é

variável entre 20 e 400 m, porém com maior parte inserida entre as elevações 20 e 100 m. O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo. Em uma menor parte da sub-bacia encontra-se o Cambissolo 2.

Figura 12 - Sub-bacias da BHRM delimitadas pelo modelo SWAT.



Fonte: o autor.

Tabela 8 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia 2.

Uso e ocupação do solo	Área da sub-bacia (%)	Uso e ocupação do solo	Área da sub-bacia (%)
Pastagem	37,94	Água	1,20
Mata Nativa	21,39	Afloramento Rochoso	0,73
Mata Nativa Estágio Inicial de Regeneração	15,35	Cultivos Permanentes	0,60
Café	8,17	Coco	0,22
Macega	4,84	Banana	0,17
Outros	4,17	Brejo	0,17
Cultivos Temporários	2,66	Solo Exposto	0,10
Eucalipto	2,27	-	-

A definição dos parâmetros relacionados com a vazão, a serem submetidos à análise de sensibilidade e calibração, bem como a escolha da faixa de variação de cada um foi realizada conforme instruções do SWAT-CUP e indicação na literatura de Van

Griensven e outros (2006), Cibin e outros (2010), Castro (2013) e Oliveira (2014), além do conhecimento da realidade da bacia em estudo.

Para alteração dos valores dos parâmetros, o SWAT-CUP disponibiliza três métodos: (1) adição, onde uma constante é adicionada ao valor inicial dos parâmetros; (2) a substituição direta do valor do parâmetro pelo valor amostrado dentro dos limites de faixa de variação estabelecidos; e (3) multiplicação, que altera os valores iniciais através de uma porcentagem de variação. Nesse estudo foram utilizados os métodos da substituição direta e multiplicação, comumente usados nos trabalhos de calibração com o SWAT-CUP (VAN GRIENSVEN et al., 2006; ABBASPOUR, 2015).

Tabela 9 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Processo	Parâmetro	Descrição	Método	Faixa de variação
Água Subterrânea	ALPHA_BF	Fator alfa de recessão do escoamento base (dias)	SD	0 – 1
	EPCO	Fator de compensação de absorção de plantas*	M	0 – 1
	GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)	SD	0 – 450
	GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água à zona insaturada*	SD	0,02 – 0,2
	GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para ocorrer retorno de fluxo (mm)	SD	0 – 5000
	REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para percolação até o aquífero profundo (mm)	SD	0 – 500
	RCHRG_DP	Coeficiente de percolação do aquífero*	SD	0 – 1
Escoamento Superficial	CN2	Número da curva inicial para a condição de umidade II*	M	-0,5 – 0,2
	SLSUBBSN	Média do comprimento de declive (m)	M	-0,5 – 1
	SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)	SD	0 – 10
	CNCOEF	Utilizado para calcular o coeficiente de retenção para cálculos do número da curva diária dependentes da evapotranspiração das plantas*	SD	0,5 – 2

Continua

Continuação

Tabela 9 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Processo	Parâmetro	Descrição	Método	Faixa de variação
Evapotranspiração	CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm)	SD	0 – 20
	ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo*	SD	0 – 1
	SOL_ALB	Albedo do solo*	M	0 – 1
Água do solo	FFCB	Armazenamento inicial de água do solo expressa como fração do teor de água na capacidade de campo (fração)	SD	0-1
	SOL_AWC	Capacidade de água disponível na camada de solo (mm água/mm de solo)	M	-0,3 – 2
	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	M	-0,5 – 1
Fluxo nos canais	CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm/h)	SD	-0,01 – 150
	CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal principal*	M	0 – 1
Manejo do solo	BIOMIX	Eficiência de mistura biológica do solo*	SD	0 – 1

*Adimensional; SD: Substituição direta; M: Multiplicação.
Conclusão.

Os valores alterados por multiplicação são aqueles onde há heterogeneidade espacial em função do tipo e uso do solo, variáveis em cada sub-bacia. A utilização desse método visa manter as relações espaciais desses parâmetros (VAN GRIENSVEN et al., 2006). Como exemplo tem-se o parâmetro CN2, cuja variação em valores reais seria de 1 a 100. Porém, como ele é baseado no tipo e uso do solo e nas condições hidrológicas e diferente para cada condição, uma mudança nessa faixa causaria um impacto de grande magnitude em algumas classes de uso. Desta forma, avalia-se a porcentagem em que cada valor de CN2 deve ser alterada, em cada tipo e uso do solo, para que a melhor previsão da variável de saída seja gerada pelo modelo. Da mesma forma ocorre com os parâmetros EPCO, SLSUBBSN, SOL_ALB, SOL_AWC, SOL_K e CH_N2.

Em relação aos processos de águas subterrâneas, os parâmetros ALPHA_BF e GW_DELAY controlam a retenção de água no solo durante todo o caminho percorrido pelas águas sub-superficiais até atingir os cursos d'água, sendo ambos relacionados

ao período do processo. ALPHA_BF é o tempo que a água precisa para fluir da área do subsolo até os rios. Aumento desse fator leva a respostas mais rápidas do fluxo de águas subterrâneas. O GW_DELAY regula o tempo de atraso para que ocorra a recarga do aquífero raso. Aumento dessa variável conduz a um processo de recarga mais lento. O RCHRG_DP é a fração de percolação para o aquífero profundo, influenciada fortemente pela distância entre o aquífero raso e o profundo. Representa parte da água, advinda da zona de raízes, que é utilizada para a recarga do aquífero profundo. Para a profundidade limite GWQMN, o fluxo de água subterrânea que atinge os canais irá ocorrer apenas se a profundidade de água no aquífero raso for igual ou maior do que o parâmetro GWQMN. Assim como a percolação até o aquífero profundo, só é realizada quando a quantidade de água no aquífero raso é igual ou maior do que o limite REVAPMN (SWAT, 2012).

As águas podem mover-se da zona de aquífero raso até a zona insaturada. Isto ocorre em função da evaporação de águas da franja capilar. Este procedimento é representado no SWAT pelo coeficiente de “revap” da água subterrânea (GW_REVAP). Para valores próximos a 0 este movimento é restrito, e quanto tende a estar perto de 1 a taxa de transferência do aquífero raso até a zona de raiz se aproxima da taxa de evapotranspiração. O fator EPCO representa a compensação de absorção da planta e ocorre quando as camadas superiores do solo não possuem água suficiente para atingir o nível de absorção requerido, o que pode ser compensado pelas camadas mais baixas do solo (GUSE et al., 2014; SWAT, 2012).

Entre os parâmetros relacionados com o escoamento superficial, o CN2 é diretamente proporcional a este processo. Redução no valor do número da curva resulta em menor quantidade de escoamento superficial. Neste trabalho optou-se por utilizar uma faixa de variação para o CN2, através do método da multiplicação, entre -0,5 e 0,25, com base nos valores médios encontrados na literatura (CIBIN et al., 2010; CASTRO, 2013; OLIVEIRA, 2014). O parâmetro SLSUBBSN é a distância em que o processo dominante do escoamento superficial é aquele que ocorre sobre uma camada fina sobre a superfície do solo, determinada pela média do comprimento do talude, que compreende o intervalo entre o seu ponto mais alto e o centro do canal. Como este parâmetro normalmente é superestimado, optou-se pela sua inclusão no grupo de parâmetros estudados. SURLAG representa o coeficiente de atraso do escoamento superficial, relacionado ao tempo de concentração da bacia. Quando o tempo é maior

que 1 somente uma porção do escoamento superficial chegará ao curso d'água no mesmo dia em que foi gerado. Este coeficiente controla a fração do total de água disponível que entra no canal principal em qualquer dia. O parâmetro CNCOEF altera cálculos relacionados com o número da curva que são dependentes da evapotranspiração das plantas (SWAT, 2012), apesar do método utilizado na modelagem da BHRM estar relacionado com a umidade do solo, e não em função das plantas, este parâmetro foi adicionado como teste da resposta da análise de sensibilidade.

FFCB, SOL_AWC e SOL_K estão relacionados com a quantidade de água no solo, que controla a percolação de águas para o subsolo, a ocorrência de fluxos superficiais e laterais, assim como a evaporação. O parâmetro SOL_AWC representa a capacidade de água disponível para cada camada do solo, que afeta o procedimento de percolação. O fator FFCB determina o quão seco ou molhado o perfil do solo está no início da simulação do modelo e varia entre 0 e 1. Caso um valor específico não for atribuído, o modelo calcula essa fração em função da média da precipitação anual. A condutividade hidráulica saturada (SOL_K) relaciona o fluxo de água do solo com o gradiente hidráulico e é uma medida da facilidade com que o movimento da água ocorre através do solo. Este parâmetro é inversamente proporcional à resistência da matriz do solo ao fluxo de água (GUSE et al., 2014; MORIASI et al., 2012; SWAT 2012).

O CANMX representa a capacidade de armazenamento de água no dossel. Este acúmulo é dependente do índice de área foliar, que varia para cada espécie de cultura. A precipitação só atinge o solo quando o armazenamento do dossel está completamente preenchido e a água do solo somente é utilizada no processo de evaporação quando não há estocagem nas folhas. Esse procedimento é caracterizado pelo coeficiente ESCO, que determina a contribuição de cada camada do solo para a evaporação, ajustando a demanda evaporativa. A demanda é calculada pela diferença entre os limites superiores e inferiores da camada do solo. Quanto maior o ESCO menor é esta diferença e, conseqüentemente, o consumo evaporativo é mais baixo e no caso inverso uma maior quantidade de água, proveniente das camadas mais profundas do solo, pode evaporar. Como não ocorre compensação entre camadas para completar a demanda evaporativa, a evaporação real é reduzida caso o solo não possa fornecer a quantidade de água requerida para este processo (GUSE et al.,

2014). O SOL_ALB, expresso como uma fração, é a proporção da quantidade de radiação solar refletida por um objeto à quantidade incidente sobre ele. O valor para o albedo deve ser relatado quando o solo está perto ou é exatamente a capacidade do campo (SWAT, 2012).

Para avaliação do comportamento da variável vazão nos canais principais, foram escolhidos dois parâmetros principais, a condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_K2) e o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal (CH_N2). O parâmetro CH_K2 é dependente da contribuição das águas subterrâneas e da composição do leito do canal. Para rios perenes com alimentação contínua de águas do subsolo a condutividade efetiva é igual a 0. O coeficiente de Manning é tabelado e dependente das características do canal (SWAT, 2012).

Com o intuito de comparar as duas técnicas de análise de sensibilidade do SWAT-CUP (global e *one-at-a-time*) utilizou-se os mesmos 20 parâmetros com seus respectivos limites, que através de 5 simulações foram alterados um de cada vez no programa, enquanto os outros permaneceram constantes com os valores iniciais adotados para a simulação do modelo. Depois avaliou-se a sensibilidade dos parâmetros a partir de uma visualização gráfica de como os valores de saída de vazão foram alterados para cada parâmetro.

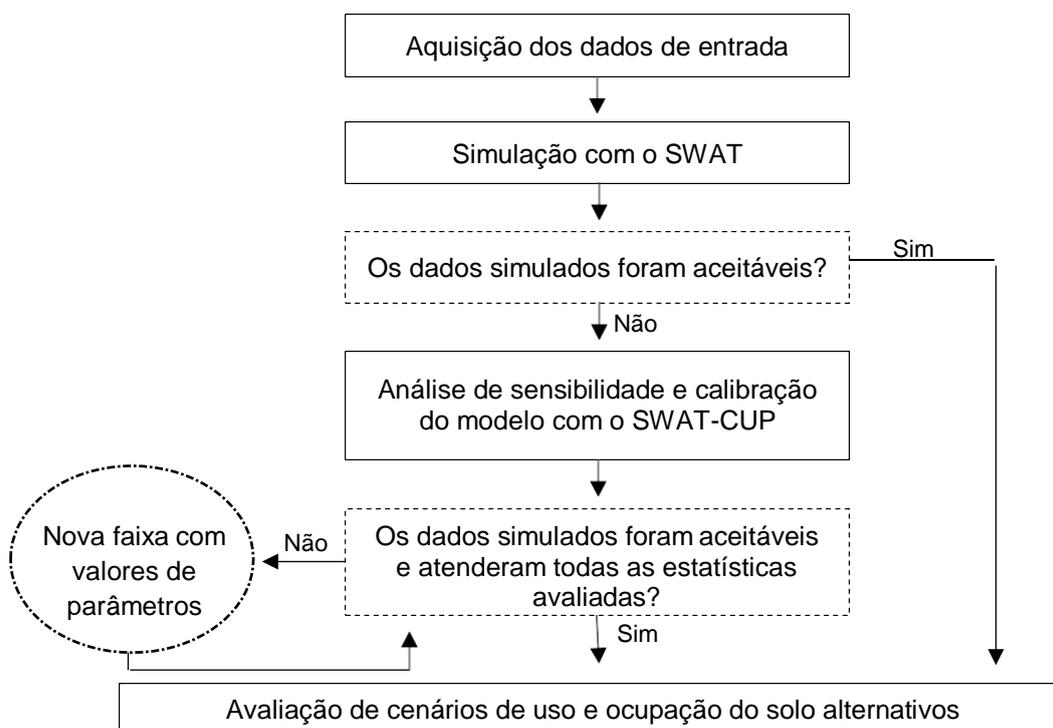
Após a seleção dos parâmetros para a análise de sensibilidade, o algoritmo de otimização SUFI-2 foi escolhido para realizar a calibração. A função objetivo utilizada nesse processo foi a Nash-Stucliffe (NS), que busca maximizar o valor da fórmula do coeficiente NS, encontrando a relação mais próxima entre dados simulados e observados. As iterações foram realizadas com 700 simulações cada. Número alto de simulações é recomendado por Abbaspour (2015) quando se tem pequenas séries de dados climáticos e de variáveis de saída medidos, sendo este o caso desse estudo, que conta com uma série de três anos (2014-2016), onde um deles foi utilizado para aquecimento do modelo. Apesar de alguns autores defenderem o uso de uma série extensa de dados climáticos, como Castro (2013) que cita que o ideal é utilizar dados com ao menos vinte anos de medições, diversas pesquisas realizaram a calibração do SWAT com séries menores. Aragão e outros (2012) calibrou a sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim, em Sergipe com uma série de três anos (1985-1988) e concluiu que o modelo SWAT foi capaz de reproduzir os resultados observados. Em uma bacia hidrográfica rural no sudeste do Espírito Santo, Moreira (2017) realizou testes de

calibração com tamanhos distintos de séries, e observou que o teste com uma série longa de 29 anos de dados observados não foi satisfatório, enquanto que a simulação com três anos demonstrou melhor desempenho, porém destacou que isso não foi um bom desempenho. Sun e outros (2017), obteve resultados de calibração satisfatórios para períodos curtos de registros como uma semana, um mês, três meses e seis meses em quatro bacias hidrográficas na China com diferentes características geofísicas e clima.

Seguindo a metodologia de Silva e outros (2015a), para a redução dos parâmetros utilizados na calibração utilizou-se apenas aqueles que, após a análise de sensibilidade da primeira interação com o SWAT-CUP, apresentaram p-value menor que 0,05. Para a calibração automática, foram realizadas mais interações com o novo conjunto de parâmetros, que ocorreram até que as condições ótimas de calibração fossem alcançadas, considerando o valor da função objetivo, os índices estatísticos (NS, PBIAS, R^2) e as estatísticas de incertezas de previsão do modelo (p-factor e r-factor).

Nesse estudo optou-se por não realizar a etapa de validação do modelo, considerando o tamanho da série de dados disponível.

Figura 13 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da metodologia do trabalho.



Fonte: o autor.

4.1 Cenários de uso e ocupação do solo

Com o intuito de avaliar como alterações no padrão de uso do solo refletem nos valores da modelagem final do SWAT, sobretudo no comportamento de parâmetros que governam os processos hidrológicos relacionados ao fluxo de vazão na BHRM, foram alterados os usos na sub-bacia 2, levando em consideração cenários passíveis de ocorrerem na bacia hidrográfica. Como o processo de calibração para identificar a eficiência do modelo só foi realizada na sub-bacia 2, única com registros de vazões, esta foi a que teve mapas alterados, considerando que o SWAT realiza simulações separadas para cada sub-bacia.

De acordo com o mapa original de uso do solo, três principais usos: Mata Nativa, Eucalipto e Pastagem, foram considerados para o processo de alteração do cenário atual da bacia. Dessa forma, aplicou-se três hipóteses de composição total da área da sub-bacia 2. Um cenário com Eucalipto, um de Mata Nativa e o terceiro composto por Pastagem.

O modelo hidrológico SWAT foi rodado para as três situações, que posteriormente foram submetidas à análise de sensibilidade manual no modelo. Os parâmetros utilizados foram os mesmos referentes à análise automática global, com exceção do parâmetro CNCOEF, devido ao fato do método utilizado para o cálculo do CN2 ter considerado a umidade do solo e não a absorção de plantas.

Esta etapa ocorreu através da alteração dos parâmetros dentro do próprio banco de entrada do SWAT. Alguns trabalhos com análise de sensibilidade manual (LELIS et al., 2012; MAMO e JAIN, 2013) optaram por alterar os parâmetros iniciais em uma determinada porcentagem de seu próprio valor. Porém, Lenhart e outros (2002) apontou duas desvantagens desta abordagem: (a) pequeno valor inicial pode levar a uma menor variação na saída do modelo, assim como valores altos podem acarretar variações maiores, (b) o modelo SWAT possui um intervalo válido de variação dos parâmetros. Se o parâmetro inicial estiver localizado próximo ao seu limite inferior ou superior a variação pode ocasionar valores fora da faixa aceitável. Dessa forma, os autores propuseram alterar os parâmetros em $\pm 25\%$ considerando os limites propostos pelo modelo.

Essa metodologia foi adotada para a simulação dos cenários na BHRM, com ressalvas para os parâmetros CN2 e SLSUBBSN, que foram alterados em função dos valores

iniciais, pois sendo o primeiro variável por uso e tipo de solo e o segundo por declividade, proporcionalidade entre essas características teve que ser mantida. Cabe observar que o CN2 para a combinação entre Mata Nativa e solo LVA ultrapassou o limite inferior adotado pelo modelo. O arquivo de documentação dos parâmetros de entrada e saída do modelo SWAT (SWAT, 2012), apresenta uma tabela na qual os valores de CN2 para alguns tipos e uso de solo excederam o limite de 35 a 98 inicialmente proposto para o banco de dados de entrada do modelo. Tucci (2015) apresentou um valor médio do número da curva, 26, para bacias rurais com florestas densas. Jha (2009) explica que a maioria dos parâmetros iniciais do modelo SWAT são fisicamente baseados, ou seja, através de informações reais disponíveis, porém variáveis importantes como o CN2 não são definidas fisicamente. Sendo assim, optou-se por extrapolar o limite válido para esse parâmetro, alterando essa faixa no banco de dados de entrada do modelo.

Avaliou-se os valores médios de saída do modelo para vazão, escoamento superficial, quantidade de água que atravessa a sub-bacia e contribui para a vazão no canal principal (produção de água) e fluxo de base (água subterrânea) que corresponde à soma do fluxo lateral de água com a contribuição subterrânea. Com o intuito de quantificar os efeitos sobre os valores de saída do modelo das alterações nos parâmetros de entrada, após as rodagens do modelo foi aplicado o Índice de Sensibilidade (IS) para cada parâmetro, para os três cenários de uso e ocupação do solo. Esse índice foi proposto por Lenhart e outros (2002):

$$IS = \frac{\frac{y_2 - y_1}{y_0}}{\frac{2\Delta x}{x_0}} \quad (18)$$

Onde, y_1 e y_2 são os valores de saída do modelo em resposta às alterações x_1 e x_2 no parâmetro de entrada; y_0 é a média entre y_1 e y_2 ; Δx é a variação do parâmetro; e x_0 a média entre os valores mínimos e máximos (x_1 e x_2 , respectivamente) de entrada utilizados. O índice (IS) é um valor adimensional.

O índice de sensibilidade representa a mudança normalizada que ocorre na saída do modelo em resposta à mudança normalizada realizada na entrada dos dados, que permite uma média de comparação das sensibilidades por parâmetros de entrada que tem diferentes ordens de magnitude. Quanto mais distante de zero forem os valores

adquiridos, maior é a sensibilidade do modelo ao parâmetro de entrada, enquanto que os valores próximos a zero indicam que o modelo apresenta uma sensibilidade baixa ao respectivo parâmetro. Quando houver um sinal negativo do IS, demonstra-se que a elevação no valor deste dado de entrada acarreta uma diminuição da estimativa do modelo, ou seja, os valores de saída são inversamente proporcionais aos valores de entrada (NEARING et al., 1990; ZANETTI et al., 2005; MAMO E JAIN, 2013).

Para comparar a sensibilidade entre os parâmetros utilizou-se o critério proposto por Lenhart e outros (2002) apresentado na Tabela 10 a seguir, considerando os valores absolutos do índice.

Tabela 10 - Classificação da Sensibilidade dos Parâmetros

Índice (IS)	Sensibilidade
$0,00 \leq IS < 0,05$	Pequena ou insignificante
$0,05 \leq IS < 0,20$	Média
$0,20 \leq IS < 1,00$	Alta
$IS \geq 1,00$	Muito Alta

Fonte: Adaptado de Lenhart e outros (2002).

Foi desenvolvida análise dos dados de saída de vazão simulados pelo SWAT para os diferentes cenários, em diferentes escalas de tempo (mensal e diária), com o objetivo de verificar como as alterações no uso e ocupação do solo considerados poderiam afetar os regimes hídricos simulados para a BHRM.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de Sensibilidade

5.1.1 Análise Global

A sensibilidade global dos parâmetros referentes à variável vazão, calculada no SWAT-CUP na forma de valores estatístico, é apresentada na Tabela 11, a seguir:

Tabela 11 - Sensibilidade global dos parâmetros da variável vazão.

Parâmetro	T-stat	P-value	Parâmetro	T-stat	P-value
CN2	-38,04	0,000000	SOL_AWC	2,94	0,003358
RCHRG_DP	-18,78	0,000000	CNCOEF	-1,92	0,054635
GWQMN	17,44	0,000000	BIOMIX	1,42	0,155042
ALPHA_BF	-8,84	0,000000	GW_REVAP	1,29	0,194546
FFCB	-7,49	0,000000	CH_N2	1,09	0,275568
ESCO	-7,40	0,000000	REVAPMN	0,84	0,400065
GW_DELAY	6,97	0,000000	EPCO	-0,54	0,584937
CH_K2	6,21	0,000000	SOL_ALB	0,52	0,602666
SLSUBBSN	3,98	0,000073	SURLAG	-0,37	0,704693
SOL_K	-3,17	0,001546	CANMX	-0,24	0,808777

A sensibilidade de cada parâmetro é calculada a partir da avaliação de como alterações nos valores desse parâmetro geram mudanças na função objetivo considerada no estudo. Segundo o manual do SWAT-CUP quanto maior o t-stat, em valores absolutos, e menor o p-value, mais sensível é o parâmetro, sendo o p-value a principal estatística a ser avaliada (ABBASPOUR, 2015).

Do total de 20 parâmetros avaliados na BHRM, 11 apresentaram sensibilidades globais relevante em termos da função objetivo, apresentando um p-value menor que 0,05, ou seja, provocaram alterações com maiores ordens de magnitude nos resultados da função objetivo avaliada (NS).

O parâmetro que apresentou maior sensibilidade foi o número da curva inicial para a condição de umidade II (CN2). Este parâmetro é relacionado com o escoamento superficial e representa uma situação na qual a umidade do solo está próxima a capacidade de campo (MORO, 2005). Segundo Cibin e outros (2010), este parâmetro exerce a principal influência na geração do escoamento em uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU). Desta forma, sensibilidade maior desse parâmetro é esperada para a maioria das bacias hidrográficas. Na modelagem da bacia do rio Mangaraí, para a determinação do escoamento superficial o SWAT utilizou a formulação modificada do Método do Número da Curva (CN), sendo verificada a importância desse parâmetro na determinação do volume de escoamento direto. Cabe observar que este resultado está de acordo com os apresentados em muitos artigos e documentos apresentados na literatura. Ferrigo (2014) avaliou a frequência com que esse parâmetro aparece nas primeiras posições de sensibilidade em diversos estudos e constatou que em 75% dos trabalhos analisados o CN2 esteve entre os cinco parâmetros mais sensíveis. Schmalz e Fohrer (2009), avaliando diversos estudos concluíram que, independentemente das diferentes características de bacias hidrográficas e para condições climáticas variáveis, o número da curva é o parâmetro que sempre apresenta maior sensibilidade nas simulações com o modelo SWAT. Apenas trabalhos que utilizaram a formulação de Green and Ampt para o cálculo do escoamento superficial (ME et al., 2015; SHEN et al., 2012) não identificaram sensibilidade para o CN2.

Os três próximos parâmetros identificados pelo SWAT-CUP como sensíveis são relacionados com o processo de águas subterrâneas: coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (RCHRG_DP), profundidade limite de água no aquífero raso necessária para ocorrer retorno de fluxo (GWQMN) e fator alfa de recessão do escoamento base (ALPHA_BF). Além desses, o intervalo de tempo para recarga do aquífero (GW_DELAY) também se apresentou sensível. Von Sperling (2014) afirma que em regiões como o sudeste brasileiro, que tem por característica sazonalidade bem definida, o escoamento de base é o elemento que mantém a vazão de um curso d'água perene durante estiagens prolongadas. Este fato pode explicar, em parte, a alta relação desses parâmetros com os processos que ocorrem na bacia.

Esses parâmetros também foram considerados sensíveis em estudos realizados em diversas bacias hidrográficas com características de planícies. Os parâmetros

relacionados com águas subterrâneas considerados em outras pesquisas estão sumarizados na tabela a seguir.

Tabela 12 - Parâmetros de processos sub-superficiais considerados sensíveis em outros estudos.

Bacia Hidrográfica e Localização	Parâmetros com maior sensibilidade	Autores
Warnow – Nordeste da Alemanha	ALPHA_BF; GWQMN; RCHRG_DP	Koch e outros (2013)
Narew – Nordeste da Polônia	ALPHA_BF; GWQMN; GW_DELAY	Piniewski e Okruszko (2011)
Stör, Treene e Kielstau – Nordeste da Alemanha	GW_DELAY; GWQMN; ALPHA_BF; RCHRG_DP	Schmalz e outros (2008); Guse e outros (2014)
Rio Kikuletwa - Tanzania	GWQMN; RCHRG_DP; ALPHA_BF	Ndomba e outros (2008)
Submédio do Vale do São Francisco – Nordeste do Brasil	ALPHA_BF; GW_DELAY; GWQMN	Silva e outros (2015b)
Rio Mundaú – Nordeste do Brasil	RCHRG_DP	Andrade e outros (2017)

Apesar de boa parte dos parâmetros relacionados com o processo de movimento da água no subsolo apresentarem sensibilidade, três deles não se enquadraram nas estatísticas da análise global, sendo eles GW_REVAP, EPCO e REVAPMN.

Outros parâmetros que apresentaram o p-value menor que 0,05 foram aqueles relacionados com a quantidade de água no solo: FFCB, SOL_K e SOL_AWC. Esses fatores interferem na produção de escoamento superficial, que pode ser acelerada ou retardada, conforme a quantidade de água inicial no solo antes do evento de precipitação. Bonumá e outros (2013) ressaltaram a importância de utilizar o parâmetro FFCB na etapa de calibração, apesar de geralmente não ser ajustado em aplicações do modelo SWAT, por motivo dele contribuir com a melhoria da simulação do escoamento. Este parâmetro foi utilizado nessa etapa da modelagem nos trabalhos de Bosh e outros (2004), Bärlund e outros (2007), Green e outros (2007), Moriasi e outros (2011) e Marek e outros (2016) que avaliaram bacias hidrográficas com uso e ocupação do solo envolvendo áreas agricultáveis e mata nativa, como a bacia do Mangaraí.

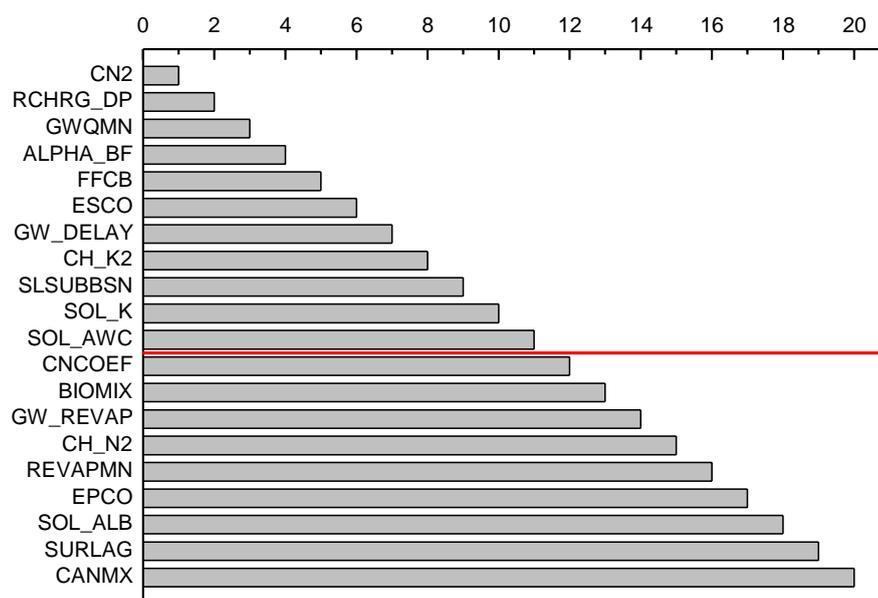
De acordo com Sloan e Moore (1984) apud Me e outros (2015) a quantidade de água disponível na camada do solo (SOL_AWC) afeta o fluxo de água lateral durante a modelagem no SWAT, tornando-se um parâmetro particularmente sensível na determinação do fluxo de base através desse modelo. No presente estudo o método

da multiplicação, com limites variando entre -0,3 e 2, em termos de porcentagem seria uma variação de -30% a 200%. O comportamento da capacidade de água disponível é influenciável tanto para o escoamento superficial como para o fluxo de base. Maiores valores de SOL_AWC indicam maiores capacidades do solo em manter a água, o que acarreta em menor disponibilidade de água para esses dois processos, diminuindo suas respectivas quantidades (JHA, 2011). Este comportamento, aliado à alta variação, pode explicar o nível de sensibilidade adquirido para esse parâmetro. O SOL_K é uma variável responsável pelo fluxo horizontal da água na zona saturada, com uma maior influência na velocidade da drenagem do solo em épocas de estiagem (FERRIGO, 2014).

ESCO e SLSUBBSN, que contribuem diretamente para a geração do escoamento superficial, são outros parâmetros selecionados para a calibração. De acordo com Kannan e outros (2007) alterações nos valores do coeficiente de compensação de evaporação de água no solo (ESCO) afetam todos os componentes do balanço hídrico. Locais que apresentam maiores médias de radiação solar, e consequentemente temperaturas mais elevadas (característica da região da bacia do Mangaraí), ocorrem maiores perdas de evaporação, tornando o fluxo sensível ao ESCO (CIBIN et al., 2010). Bonumá e outros (2015) destacam a necessidade da calibração desse parâmetro por não ser uma propriedade diretamente mensurável. Estes parâmetros tiveram sensibilidade também relatada nos estudos de Moriasi e outros (2012) e Oliveira (2014).

Para a ocorrência do fluxo no canal principal, apenas a condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_K2) apresentou influência nos resultados finais, sendo o coeficiente de Manning (CH_N2) parâmetro menos importante na simulação da sub-bacia em questão. A sensibilidade dos parâmetros é apresentada na Figura 14, com um *ranking* de 1 a 20, onde 1 representa alta sensibilidade e 20 nenhuma sensibilidade. A linha em destaque divide os parâmetros com $p\text{-value} < 0,05$ (acima da linha) daqueles com valores maiores (abaixo da linha, que não foram considerados sensíveis).

Figura 14 - Ranking de sensibilidade dos parâmetros para a BHRM.



Fonte: o autor.

Dentre aqueles que não apresentaram interferência nos valores da função objetivo utilizada com a calibração automática no SWAT-CUP, o CNCOEF era esperado que não ocasionasse mudanças significativas pelo fato do modelo ter utilizado o método de cálculo do número da curva diário em função da umidade do solo e não em relação à evapotranspiração da planta (SWAT, 2012). A eficiência de mistura biológica (BIOMIX) pode não ter sido considerado como sensível devido à pouca variabilidade de cultivos agrícolas na região, onde predominam-se plantações de café, coco e banana. Cultivos temporários, que representam pequena área da bacia, não foram incorporadas na modelagem, devido à falta de informações sobre características de manejo do solo, rotação de culturas e revolvimento do solo que poderiam fazer com que este parâmetro influenciasse em maior magnitude os cálculos do programa.

O albedo do solo (SOL_ALB) também não apresentou relevância no estudo da sensibilidade, provocando pouca influência na modelagem, devido à quantidade pouco significativa de solo exposto. Carvalho (2014) citou a baixa frequência de utilização desse parâmetro em processos de calibração em regiões brasileiras. É importante ressaltar que dos parâmetros que afetam diretamente a evapotranspiração (CANMX, EPCO, ESCO e SOL_ALB) apenas o ESCO apresentou relevância significativa. Cabe observar que na pesquisa de Nossent e outros (2011), realizada na bacia hidrográfica Kleine Nete, na Bélgica, nenhum desses parâmetros citados anteriormente mostraram-se importantes.

Devido ao tamanho da bacia hidrográfica do Mangaraí ser relativamente pequena, as distâncias para o canal principal são menores e conseqüentemente há um menor tempo de concentração na bacia, o que dificulta o potencial de atenuação do escoamento superficial. Isto pode explicar o fato do coeficiente de retardo do escoamento superficial (SURLAG) não apresentar sensibilidade no presente estudo (CIBIN et al., 2010; ME et al., 2015). Neitsch e outros (2009) explicam que o retardo do escoamento só ocorre em grandes sub-bacias, com tempos de concentração superiores a um dia. Para o parâmetro de armazenamento máximo do dossel (CANMX) são relatados na literatura maiores sensibilidade quando as sub-bacias apresentam em grande parte a mata nativa como ocupação do solo, como no caso apresentado por Lelis e outros (2012) em estudo na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, no município de Viçosa-MG. Em uma sub-bacia de ocupação predominante por mata, o CANMX foi o mais sensível, enquanto nas outras sub-bacias não exerceu tamanha influência. Para a BHRM, a sub-bacia modelada possui significativa quantidade de mata nativa, cerca de 21% da área total. Contudo, o uso predominante é de pastagens, o que pode esclarecer a menor sensibilidade dentre todos os parâmetros para o CANMX no presente estudo.

Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros selecionados para análise de sensibilidade e calibração em estudos realizados no Estado do Espírito Santo - Brasil, bem como as ordens de sensibilidade encontradas. As informações apresentadas na tabela indicam que, apesar da proximidade das regiões, cada bacia hidrográfica possui peculiaridades, corroborando com as afirmativas de Cibin e outros (2010), Jha (2011), Schmalz e Fohrer (2009), entre outros, de que para qualquer projeto com modelagem, os resultados das análises de sensibilidade são diferentes, sendo influenciados por diversos fatores, sendo imprescindível sua realização para que se possa atingir melhores níveis de calibração.

De uma forma geral, pode-se observar a partir dos parâmetros considerados sensíveis que os processos relacionados com escoamento superficial e subsuperficial (águas subterrâneas) são os principais na BHRM.

Após a definição dos 11 parâmetros que demonstraram maior influência na função objetivo: CN2, RCHRG_DP, GWQMN, ALPHA_BF, FFCB, ESCO, GW_DELAY, CH_K2, SLSUBBSN, SOL_K e SOL_AWC, foi realizado o processo de calibração. Os

passos de tempo utilizados foram mensal e diário, objetivando comparação do desempenho do modelo SWAT para esses dois períodos de simulação.

Tabela 13 - Sensibilidade dos parâmetros em bacias hidrográficas do Espírito Santo.

Região	Ordem de sensibilidade (maior para menor)	Autor
Microbacia experimental – Aracruz	CN2; CANMX; CH_K2; CNCOEF; ALPHA_BF; SURLAG; ESCO; CH_N2; SOL_ALB; RCHRG_DP; FFCB; EPCO; SOL_AWC; BIOMIX; GWQMN; REVAPMN; GW_REVAP; GW_DELAY; SOL_K.	Oliveira (2014)
Córrego do Galo – Domingos Martins	ALPHA_BF; CH_N2; CN2; ESCO; SOL_AWC; SOL_K; SURLAG.	Pereira e outros (2014)
Bacia do Rio Santa Maria da Vitória – Região Metropolitana de Vitória	ESCO, SOL_AWC, CANMX, CN2, SOL_K, GWQMN, CH_K2, GW_REVAP, ALPHA_BF, REVAPMN, CH_N2, EPCO, GW_DELAY, BIOMIX, SOL_ALB, SURLAG e SLSUBBSN.	Brito (2015)
Subbacia hidrográfica do Rio Perdido – Santa Teresa e São Roque do Canaã	CN2; SLSUBBSN; SOL_AWC; CH_K2; SOL_K; ALPHA_BF; GW_DELAY.	Tesch (2015)
Bacia Hidrográfica do Rio Jucu	ALPHA_BF; GW_DELAY; CN2; SOL_K; ESCO; EPCO; CH_K2; SOL_AWC; BIOMIX; GWQMN; CANMX; SURLAG; SOL_ALB; SLSUBBSN; GW_REVAP; CH_N2; REVAPMN.	Moreira (2017)

5.1.2 Análise one-at-a-time

O SWAT-CUP permite a opção de realização de análise de sensibilidade na qual cada parâmetro é alterado por vez, enquanto todos os outros permanecem constante com os valores iniciais adotados para simulação com o modelo. Após cada simulação o programa retorna um gráfico com as informações da variável de saída escolhida. Nesse trabalho optou-se por comparar a influência nos valores de vazão e avaliar a diferença de sensibilidade para aqueles considerados sensíveis na análise de sensibilidade global (na qual foi identificada sensibilidade em valores da função objetivo). Os gráficos obtidos com esse procedimento são apresentados no Apêndice A desse trabalho.

No geral, a tendência foi bem próxima à encontrada na análise de sensibilidade global, porém com algumas ressalvas. Os parâmetros que demonstraram maiores diferenças na vazão quando alterados foram: CN2, GWQMN, CH_K2, GW_DELAY, RCHRG_DP, GW_REVAP, ESCO e SOL_AWC. Alguns puderam ser considerados mediamente sensíveis, são eles: SLSUBBSN, SOL_K e ALPHA_BF. Uma grande quantidade de parâmetros não provocou qualquer alteração, retornando vazões idênticas para os

cinco valores utilizados na análise. A Tabela 14 mostra todos os parâmetros e respectivas sensibilidades.

Tabela 14 - Sensibilidade dos parâmetros - Método *one-at-a-time*.

Nível de Sensibilidade	Parâmetro
Alto	CN2; GWQMN; CH_K2; GW_DELAY; RCHRG_DP; GW_REVAP; ESCO; SOL_AWC
Baixo	SLSUBBSN; SOL_K; ALPHA_BF
Nenhum	BIOMIX; CANMX; CH_N2; CNCOEF; EPCO; FFCB; REVAPMN; SOL_ALB; SURLAG

Em relação àqueles parâmetros considerados principais na análise global (acima da linha vermelha na Figura 14, a *one-at-a-time* não apresentou sensibilidade para quatro deles: FFCB, SOL_K, ALPHA_BF e SLSUBBSN, além de considerar sensível o GW_REVAP, que na global não foi avaliado como muito importante. Outra informação relevante é o fato dos parâmetros FFCB, SOL_K, ALPHA_BF e SLSUBBSN apresentarem sensibilidade na global, sendo indicados para o processo de calibração, mas não demonstrarem qualquer alteração em relação à variável vazão pela metodologia *one-at-a-time*. O fato desses processos afetarem um evento específico do ciclo hidrológico (escoamento superficial) e do modelo avaliar a variável de saída em função de médias pode ter gerado a baixa alteração.

Uma das utilidades da realização da sensibilidade de cada parâmetro por vez é quando não se tem registros de vazões medidas e quando se utiliza cenários alternativos na bacia. Anh e outros (2015) avaliaram a diferença da sensibilidade de parâmetros entre o método baseado na variável de saída (quando não há valores obtidos em campo) com aquele que avalia a precisão do modelo em termos de critérios estatísticos comparando com a variável medida. Os autores realizaram calibração manual para a bacia do rio Cong, no Vietnã, em um ponto de monitoramento com características de agricultura e floresta nativa, além de declividade muito próximas das encontradas na BHRM. Em relação às duas metodologias os autores encontraram seis parâmetros com a mesma sensibilidade em ambas: ESCO, CN2, GWQMN, RCHRG_DP, SOL_AWC e GW_REVAP. Porém, no método de precisão quatro parâmetros a mais foram considerados influentes: CH_K2, SURLAG, GW_DELAY e REVAPMN. O estudo concluiu que o procedimento que relaciona os parâmetros com dados medidos identificou melhor os parâmetros

chave, quando comparado com a avaliação das variáveis de saída do modelo apenas, resultando em melhor simulação da vazão no rio Cong.

Da mesma forma, ocorreu para a BHRM, tendo sido identificados outros parâmetros que se mostraram importantes posteriormente no processo de calibração. Quanto à análise global é importante ressaltar que na calibração automática todos os parâmetros estão em constante alteração, podendo cada interação considerar diferentes parâmetros sensíveis (ABBASPOUR, 2015).

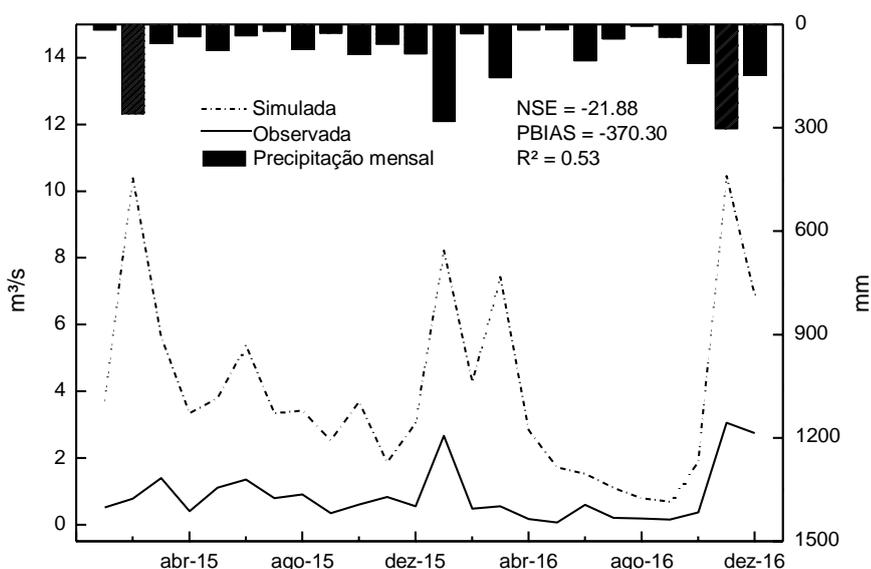
5.2 Calibração do modelo

5.2.1 Simulação Mensal

Após a primeira simulação de vazões mensais realizada com o modelo SWAT, avaliou-se a relação entre as vazões simuladas e as observadas em campo, para o período 2015-2016, para uma observação preliminar do desempenho do modelo, para verificação da necessidade ou não de calibração, bem como para definição dos critérios para sua realização. A Figura 15 apresenta as vazões simuladas (linha tracejada) e observadas em campo (linha contínua) e os níveis de precipitações mensais na bacia, para observação da resposta do modelo à eventos de chuva e do seu desempenho, considerando os valores de vazões medidos. A vazão média simulada foi 4,00 m³/s, com valor máximo 10,47 m³/s e mínimo 0,69 m³/s. Em relação aos valores observados no rio Mangaraí, a média foi 0,86 m³/s, e as vazões máxima e mínima 3,06 m³/s e 0,07 m³/s, respectivamente.

Através da análise dos resultados obtidos com o modelo sem calibração prévia dos parâmetros foi constatada inadequação, que pode ser observada tanto pela comparação visual (vazões simuladas e observadas), onde pode ser verificado que as vazões foram superestimadas quanto pelos valores dos índices estatísticos NSE, PBIAS e R², que foram iguais a -21,88, -370,3 e 0,53, respectivamente. Nesse estudo foi utilizado para análise de resultados relativos aos índices estatísticos o padrão apresentado por Moriasi e outros (2007), pelo qual é necessário que NSE > 0,5, PBIAS ± 25% e R² > 0,5, para que a modelagem seja considerada satisfatória. Desta forma, os resultados da primeira modelagem com o SWAT não foram adequados. Por consequência, foi procedida calibração do modelo com os parâmetros considerados sensíveis na análise de sensibilidade global, através da interface SWAT-CUP.

Figura 15 – Precipitações pluviométricas, vazões medidas e simuladas (sem calibração).



Fonte: o autor.

Diversos trabalhos de modelagem de bacias hidrográficas, em diversas regiões brasileiras, utilizando o modelo hidrológico SWAT (BALDISSERA, 2005; FUKUNAGA, 2012; MALLUTA, 2012; FERRIGO, 2014; OLIVEIRA, 2014; SILVA, 2015), concluíram pela necessidade de calibração dos parâmetros, inclusive por motivo da grande quantidade de variáveis que influenciam nos resultados da modelagem, diferentes, em função das características das bacias hidrográficas. Através da avaliação dos resultados, constatou-se que os valores de iniciais do modelo não foram capazes de gerar vazões representativas da bacia estudada. Esta tendência de superestimação da vazão pelo SWAT foi observada em diversas pesquisas. Aragão e outros (2013) e Carvalho (2014) atribuem esse fato, principalmente, aos altos valores iniciais de CN2, definidos para solos americanos e diferentes daqueles correspondentes a solos brasileiros, que elevam as estimativas de geração de escoamento superficial.

Oliveira (2014) estudando uma microbacia experimental em Aracruz – ES, observou que todas as vazões estimadas foram superiores às observadas, evidenciando a discrepância em intervalos de maiores precipitações, Carvalho (2014) destacou a tendência de superestimação em meses com maior quantidade de chuvas e subestimação em períodos de estiagem, na bacia do Alto Jardim no Distrito Federal, atribuindo esse comportamento às características de solo da região do bioma Cerrado. Ferrigo (2014) pontuou resultado parecido com o comentado anteriormente,

para a mesma região de estudo, porém em épocas de estiagem as vazões simuladas se mantiveram praticamente constante.

A aplicabilidade do modelo na região de interesse, é condição obrigatória para a avaliação de cenários futuros alternativos e idealísticos (OLIVEIRA, 2014). Desta forma, no presente estudo foi realizada etapa de calibração com o SWAT-CUP, rodando interações até que os resultados apresentassem considerável melhora nos valores simulados. Foram necessárias cinco interações para o alcance do objetivo. Como resultados, que podem ser observados na Figura 16: o coeficiente de eficiência de NSE foi igual a 0,72, o PBIAS 9,4 e o R^2 0,73. Os valores enquadram nas categorias “bom”, para o NSE, e “muito bom” para o PBIAS, na classificação de desempenho do modelo. A negatividade do percentual PBIAS indica que o modelo, na maior parte do período simulado, subestimou as vazões.

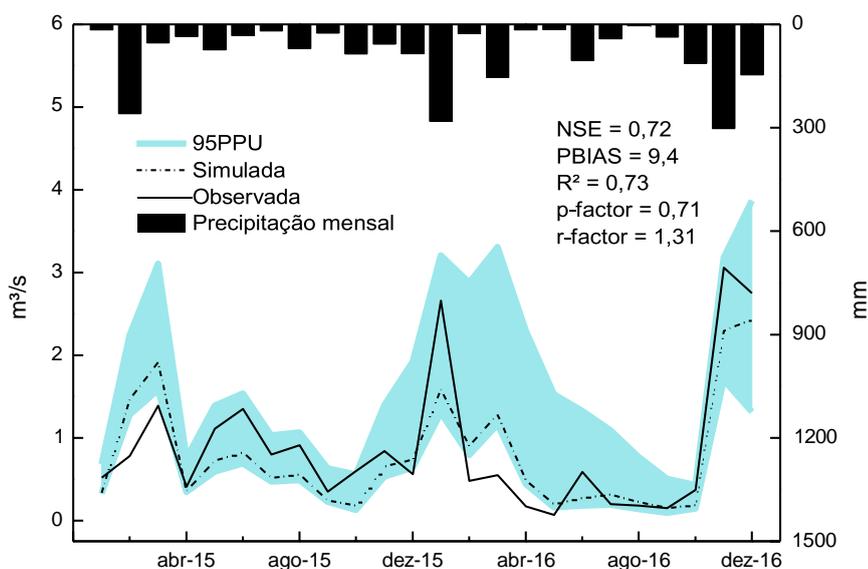
A vazão média simulada foi 0,79 m³/s, enquanto que a observada foi 0,87 m³/s. Os valores máximo e mínimo simulados foram 2,43 e 0,15 m³/s, respectivamente, enquanto que os valores observados máximo e mínimo foram 3,06 m³/s e 0,07 m³/s.

Comparando o valor do NSE obtidos com o modelo SWAT no estado do Espírito Santo, apresentados na Tabela 15, observa-se a calibração para a BHRM pode ser considerada satisfatória principalmente para o passo de tempo mensal.

Tabela 15 - Valores do coeficiente NSE obtidos em bacias hidrográficas no Espírito Santo.

Autor	Passo de tempo da simulação	NSE
Oliveira (2014)	Diária	0,40
Pereira e outros (2014)	Diária	0,65
Brito (2015)	Mensal	0,83
Moreira (2017)	Mensal	0,53

Figura 16 - Precipitações pluviométricas, vazões medidas e simuladas (com calibração).



Fonte: o autor.

A delimitação em azul no gráfico da Figura 16 representa a faixa de incertezas (95PPU) calculada pelo SWAT-CUP. A banda reproduz os diferentes valores de vazões calculados para os limites dos parâmetros que se enquadraram no bom ajuste da função objetivo. Observa-se que a faixa é variável com o tempo. A maior diferença ocorreu no mês de dezembro-2016, com limite inferior 1,31 m³/s e superior 3,87 m³/s, acarretando diferença de 2,56 m³/s. Faixa contínua entre janeiro e maio de 2016 mostra maiores diferenças entre valores observados e simulados. Menores diferenças entre os limites (incertezas menores) foram observadas para o período de abril a novembro de 2015.

Em relação às estatísticas de incertezas, Abbaspour e outros (2015) ressaltam que devido ao SUFI-2 ser um algoritmo iterativo, as incertezas são reduzidas com o decorrer das iterações, resultando em banda de 95PPU mais estreita (r-factor), que por consequência retorna um menor valor de p-factor, ou seja, uma menor quantidade de valores observados se enquadra na faixa 95PPU. Desta forma, os autores destacam a importância de se atingir equilíbrio entre esses dois índices, considerando-se aceitável para a previsão da vazão valores de p-factor > 0,7 e r-factor < 1,5. A análise de incertezas na BHRM apresentou um r-factor igual a 1,31 e p-factor de 0,71, ou seja, 71% dos dados observados em campo estão inclusos na faixa de incerteza de predição.

No período de fevereiro a maio de 2016, foram registradas as menores vazões no rio Mangaraí, onde à exceção de março, com significativa precipitação, os outros meses (fevereiro, abril e maio) apresentaram os menores valores, resultando em baixas vazões. O estudo citado no parágrafo anterior, avaliando diversos cursos d'água na Europa, identificou que rios com vazões inferiores demonstraram particularmente maiores incertezas. Yang e outros (2008) também relataram maior nível de incerteza em aplicação do SWAT em períodos de recessão na bacia Chaohe, no norte da China. Begou e outros (2016) observou em seus estudos na bacia de Bani, no continente africano, que apesar de alcançar bons indicadores p-factor e r-factor (0,61 e 0,59, respectivamente) as incertezas foram maiores nos períodos de pico e de recessão.

A avaliação das incertezas utilizando r-factor e p-factor no Brasil ainda é incipiente. Chaves (2016) avaliou a bacia do Córrego do Sarandi, no Distrito Federal, através do SWAT e obteve p-factor 0,65 e r-factor 1,38, para dados diários. Bressiani (2016), na bacia hidrográfica Piracicaba, considerando duas estações de medições, obteve para a primeira p-factor 0,37 e r-factor 0,14, enquanto que para a segunda p-factor 0,59 e r-factor 0,41. É importante salientar que no estudo citado as simulações foram horárias (sub-diárias). A autora considerou a primeira estação com bom valor de r-factor, porém destacou a baixa porcentagem de valores observados dentro da 95PPU, enquanto que para a segunda estação considerou os valores intermediários. Franco (2017), em simulações mensais, para cinco estações em diferentes pontos de monitoramento na bacia do Rio Iguaçu (PR e SC), obteve valores médios de p-factor entre 0,86 e 0,60 e r-factor entre 1,20 e 0,53. Todos esses estudos citados possuem algumas características em comum, como existência da pastagem, usos agricultáveis, matas nativas, eucaliptos e áreas urbanas. Algumas destas classes de uso do solo podem ser encontradas também na BHRM.

Relativamente aos limites adotados para os parâmetros que foram empregados na etapa de calibração, após as interações até que se atingisse nível satisfatório, avaliou-se os finais do processo que melhoraram as previsões do modelo quanto à vazão. Como indicado por Abbaspour (2015) é interessante que se examine uma faixa de parâmetros e não um conjunto único de soluções, principalmente por se tratar de uma modelagem inversa, que consiste na utilização de dados de saída mensuráveis para obter parâmetros de difícil mensuração direta. O autor afirma que, como este tipo de transformação na natureza não é de fácil identificação, a calibração com o algoritmo

SUFI-2 não produz uma solução única e sim um amplo espaço solucionável para o modelo. Outra razão para esse tipo de abordagem é a não-singularidade (*non-uniqueness*) dos parâmetros, ou seja, vários conjuntos de parâmetros podem produzir resultados similares e diferentes soluções ótimas para a calibração.

Tabela 16 - Parâmetros e seus limites utilizados na calibração do modelo.

Parâmetro	Valores iniciais do SWAT	Limites iniciais	Limites calibrados
ALPHA_BF	0,048	0 - 1	0,44 – 0,81
CH_K2	0	-0,01 - 150	124 – 187
CN2	*	-0,25 – 0,25	-0,77 – -0,53
ESCO	0,95	0 – 1	0,67 – 0,85
FFCB	0	0 – 1	0,29 – 0,50
GW_DELAY	31	0 – 450	99 – 167
GWQMN	1000	0 – 5000	2101 – 2963
RCHRG_DP	0,05	0 – 1	0 – 0,09
SLSUBBSN	*	-0,5 – 1	0,05 – 0,51
SOL_AWC	*	-0,3 – 2	0,88 – 1,12
SOL_K	*	-0,5 – 1	-0,46 – 0,15

* Variável por uso e ocupação, declividade e tipo de solo, respectivamente.

Considerando os valores obtidos, é notável a grande variação do CN2, importante parâmetro do modelo SWAT. Em termos de porcentagens este parâmetro precisou ser diminuído em torno de 53 e 77%. Com os valores de entrada iniciais utilizados pelo modelo, o escoamento superficial produzido era alto, elevando os picos de vazão, e o decréscimo no valor do número da curva era esperado para reduzir a produção de escoamento superficial. Porém, como a sub-bacia apresenta baixo tempo de concentração e está localizada no exutório este valor foi sujeito a grande diminuição para atendimento às demandas de ajuste. Carvalho (2014) discorre sobre a constante superestimação do escoamento superficial pelo SWAT. Guimarães (2016) também faz esta afirmação. A autora, avaliando três sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória, no Espírito Santo, obteve -38, -46 e -50% dos valores do número da curva. Na bacia hidrográfica do Ribeirão da Jaguará em Minas Gerais, Neto (2013) calibrou valores próximos a -25%, com uma discretização menor da bacia.

Franco (2017), calibrando a vazão de diferentes estações de monitoramento ao mesmo tempo, apresentou uma faixa entre -1 e 20%.

A variação observada na BHRM pode ser considerada alta se levarmos em consideração outros resultados obtidos na literatura. Como comentado anteriormente isso pode ter ocorrido devido ao baixo tempo de concentração da bacia. Alguns estudos (SUN e CORNISH, 2005; FEYEREISEN et al., 2007; ZHANG et al., 2007) calibraram o valor do CN2 para cada uso do solo separadamente, porém Abbaspour e outros (2007a) apontam que calibrar um modelo com base em dados medidos no exutório com o algoritmo SUFI-2 pode gerar resultados equivocados para vários tipos de uso do solo na bacia. Para condicionar a função objetivo, afim de que se possa atingir melhores resultados, uma quantidade maior de dados medidos seriam necessários. Cabe observar que, pelo fato de contar com poucos dados e da calibração ser realizada no ponto do exutório, não foi objetivo do presente trabalho calibrar o número da curva para cada tipo de ocupação.

No contexto geral, avaliando-se os altos valores obtidos para o CN2, pode-se afirmar que é necessária atenção para a variação desse parâmetro durante todo o processo da calibração, tentando condicioná-lo para valores mais condizentes com a realidade.

Pela análise da Figura 15 (primeira simulação) é evidente a necessidade de redução dos valores da variável vazão para alcance de melhor desempenho do modelo na comparação com valores medidos em campo. O aumento na grandeza SOL_AWC é uma das alternativas pois, à medida que a capacidade de água disponível no solo é aumentada ocorre redução na produção de água na bacia, bem como no escoamento superficial e no fluxo de base e, conseqüentemente, influenciando positivamente para melhores valores da função objetivo NSE. Quando ocorre o contrário e os valores dessa capacidade são menores, o perfil do solo satura mais rapidamente, resultando em mais escoamento, menos evapotranspiração e maior fluxo de base (FEYEREISEN et al., 2007). Neste caso (SOL_AWC) a variação desse parâmetro ficou entre 0,88 - 1,12.

Os parâmetros CN2 e SOL_AWC, juntamente com o CH_K2 foram os que tiveram os limites alterados em maiores proporções. Considerando a análise de sensibilidade, estes três estão inclusos naqueles que influenciaram em maior magnitude os valores da função objetivo, demonstrando importante ligação e concordância entre as etapas de análise de sensibilidade e calibração do modelo. O aumento nos valores de

condutividade hidráulica (CH_K2) ocasiona em taxa de perda muito alta. O valor inicial de entrada no SWAT desse parâmetro é característico de rios perenes e com contribuição contínua de águas subterrâneas (ARNOLD et al., 2012). Na modelagem relativa ao rio Mangaraí a condutividade ficou em torno de 150 mm/h, valor semelhante ao calibrado por Neto (2013) na microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela em Minas Gerais.

O coeficiente de compensação de evaporação da água no solo (ESCO) sofreu redução. Quando isso ocorre, isto significa que o modelo é capaz de extrair água de camadas mais profundas do solo para ser utilizada como demanda evaporativa (ARNOLD et al., 2012). Conseqüentemente, uma menor quantidade de água é contabilizada para a vazão. Por isto a tendência de diminuição neste caso, para atingir melhor ajustamento da modelagem. Oliveira (2014) obteve redução para 0,7 no valor deste coeficiente em uma microbacia experimental no município de Aracruz-ES, valor dentro dos limites atingidos na calibração da BHRM.

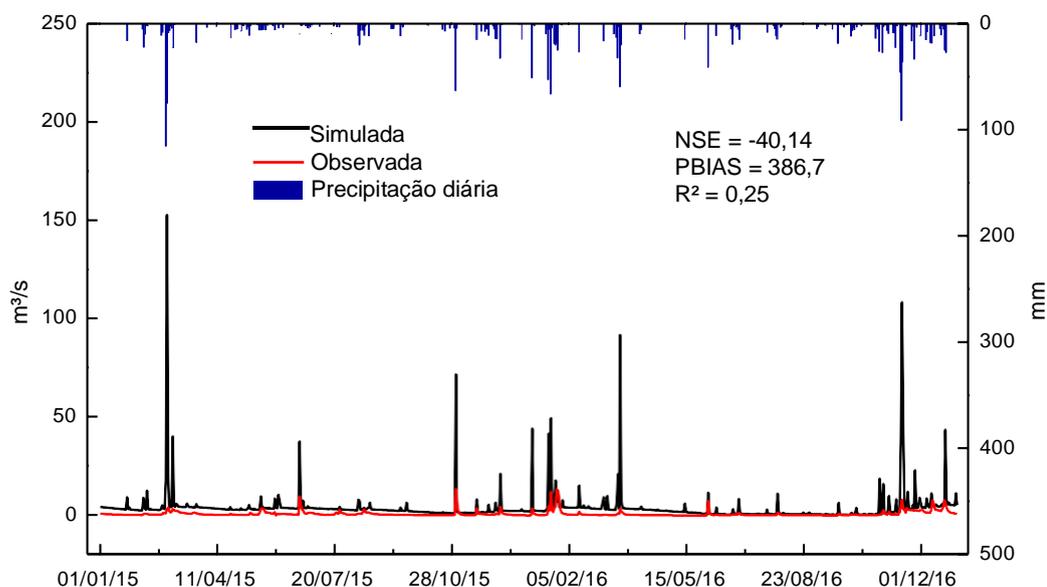
Os demais parâmetros sofreram pequenas alterações e mantiveram-se dentro da faixa inicial de limites estabelecidos para modificação, variando de forma normal. Observa-se que os valores da condutividade hidráulica (SOL_K), que mede a facilidade com que a água se move no solo, obtidos no presente estudo demonstra tendência de diminuição para os tipos de solo encontrados na bacia. Avaliando, no geral, o comportamento dos parâmetros na calibração observou-se concordância entre suas variações e o objetivo de minimizar as vazões simuladas, para melhor ajuste às vazões observadas em campo.

Em qualquer técnica de calibração é importante que haja ciência sobre o fato dos parâmetros sempre estarem altamente condicionados às diversas variáveis, seja pelo procedimento utilizado, pela função objetivo escolhida e pelos pesos atribuídos a elas, quanto por erros atrelados à medição do conjunto de dados envolvidos em todo o processo. Sendo assim, qualquer solução encontrada para o modelo é uma solução condicionalmente otimizada, e mesmo pequenas alterações em qualquer uma dessas variáveis pode conduzir a novas soluções ótimas. Por isso os resultados obtidos nessa calibração precisam estar em constante investigação e relacionados sempre com possíveis erros durante todo o processo (BEVEN, 2009; ABBASPOUR, 2015).

5.2.2 Simulação Diária

Como era esperado, em virtude dos valores dos parâmetros iniciais do modelo não serem adequados para a realidade da bacia, a primeira simulação com o modelo SWAT, utilizando o passo de tempo diário, não foi satisfatória, mantendo picos altíssimos de vazão. A média simulada foi 4,05 m³/s, com máximo 152,2 m³/s e mínimo 0,37 m³/s. As vazões observadas apresentaram média 0,87 m³/s, com máxima e mínima 31,9 e 0,05 m³/s, respectivamente. Os valores foram muito discrepantes. O valor do coeficiente de Nash e Stucilffe (NSE) foi -40,14, PBIAS 336,7, demonstrando grande superestimação e R² apenas 0,25. A Figura 17 apresenta os valores das vazões observadas e simuladas e dos níveis de precipitação que incidiram sobre a bacia nos anos 2015 e 2016. O SWAT chegou a simular para um dia vazão próxima a 160 m³/s, valor extremamente fora da realidade na área da sub-bacia do rio Mangaraí.

Figura 17 - Relação entre os dados simulados pelo modelo (sem calibração) e os observados em campo para a simulação diária e a precipitação.



Fonte: o autor.

Avaliando esse primeiro hidrograma de simulação diária, percebe-se grande discrepância entre os picos de vazão simulados e aqueles observados. Ferrigo (2014) ao observar essa mesma tendência, levanta um ponto pertinente em relação à obtenção das vazões diárias. A metodologia para determinação da vazão média diária, comumente utilizada e que foi aplicada durante as campanhas no rio Mangaraí, ocorre da seguinte forma: as cotas nas réguas são medidas em três horários distintos, às sete da manhã, ao meio dia e às cinco da tarde. A cota média diária é obtida pela

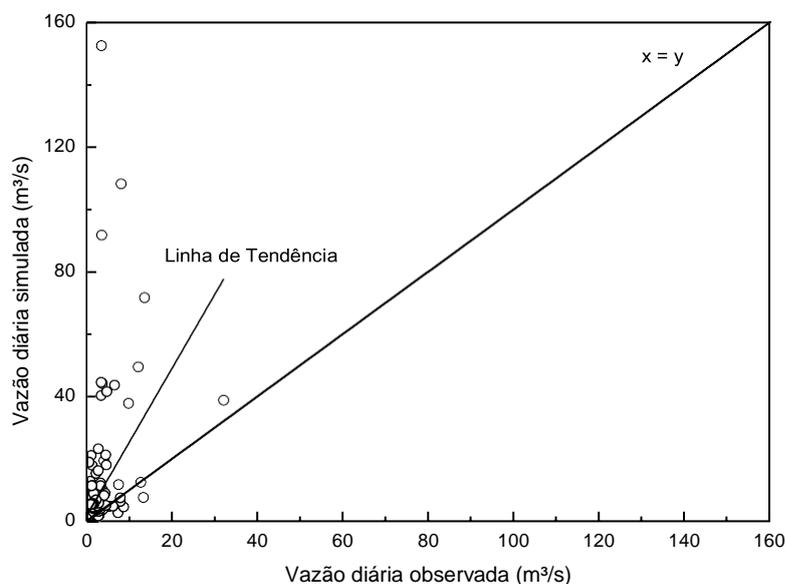
média medida nesses três horários, sendo a vazão média diária obtida com o uso de curva-chave. Segundo a própria Ferrigo (2014), em pequenas bacias hidrográficas, como a BHRM, o tempo de concentração é pequeno e isto aliado ao fato da incerteza quanto ao exato momento da medição, ou seja, se ocorreu antes, depois ou durante o evento de precipitação, representam limitações importantes para simulações de ordem diária em pequenas bacias hidrográficas.

Jain e Sudheer (2008) demonstraram que analisar apenas um indicador de ajuste como o NSE não é adequado para determinar a qualidade total de uma modelagem, e enfatizam que um gráfico de dispersão deve ser utilizado como critério adicional. No gráfico de dispersão entre os dados simulados e observados na BHRM (Figura 18), a reta $y: x$ serve para dar noção da proximidade das vazões da modelagem com as medidas em campo. De acordo com Ritter e Muñoz-Carpena (2013), quanto maior a concordância entre valores observados e simulados, mais os pontos tendem a se concentrar próximo a uma reta 1:1. A distribuição dos valores em torno dessa reta permite concluir que a simulação dos fluxos durante as condições de baixas vazões apresentou melhores resultados do que para altas vazões. Os valores das maiores vazões simuladas encontram-se muito distantes da reta 1:1. Porém, boa parte das vazões pouco superiores à média observada ($0,87 \text{ m}^3/\text{s}$) também espalham-se de forma longínqua à reta. Além disso, considerando a reta de tendência dos dados, o coeficiente angular encontra-se muito diferente do esperado (1:1), que representaria um ajuste perfeito.

Considerando o hidrograma apresentado na Figura 17 e a dispersão dos dados, decidiu-se utilizar o SWAT-CUP para a calibração dos parâmetros com o objetivo de alcance de melhores resultados nas simulações.

Os resultados do processo de calibração diária podem ser observados no hidrograma apresentado na Figura 19. A média simulada diminuiu para $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$, se aproximando da observada, $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão máxima, $8,37 \text{ m}^3/\text{s}$, foi bem inferior à observada, $31,90 \text{ m}^3/\text{s}$. A mínima, $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, foi superior, à medida, $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$. Desta forma, após a calibração, os picos de vazões simulados diminuíram significativamente.

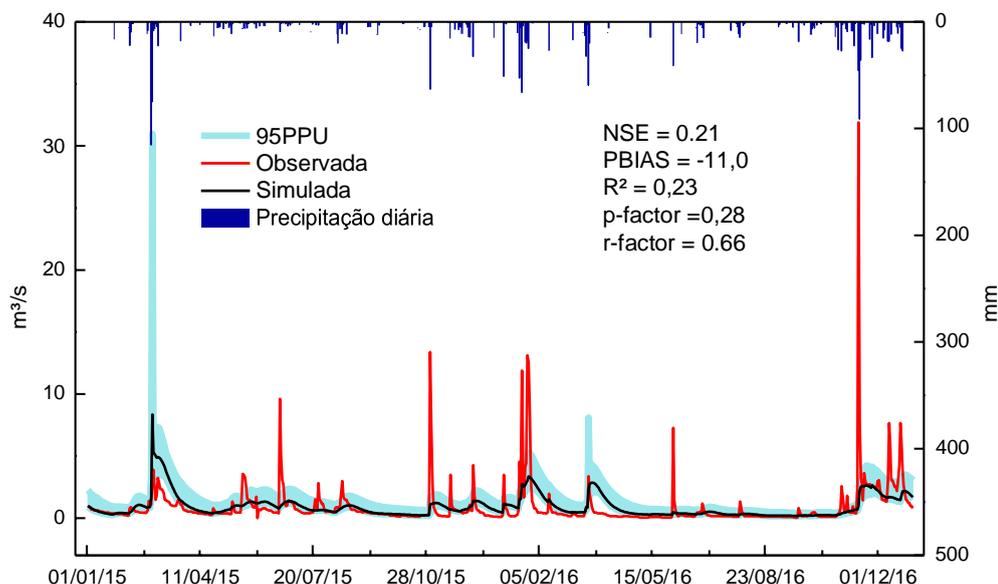
Figura 18 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas (sem calibração).



Fonte: o autor.

A literatura (MORIASI et al., 2007; GREEN et al., 2006) recomenda que o NSE pode ser menos rigoroso para simulações diárias. Neste estudo optou-se por utilizar um critério de $NSE > 0,4$. Benaman e outros (2005) atribuíram a dificuldade na precisão da modelagem com o passo de tempo diário, à grande variabilidade temporal de componentes hidrológicos, como precipitação e vazão. No caso da sub-bacia avaliada da BHRM, que se encontra no exutório da bacia e apresenta área relativamente pequena, a dificuldade em se representar tal variabilidade é ainda maior. Le Moine e outros (2007), comparando diferentes valores do coeficiente NSE para diversos tamanhos de bacias hidrográficas demonstraram que há menos falhas de modelos hidrológicos na representação de bacias maiores do que de pequenas e médias e concluíram que quanto maiores as bacias hidrográficas melhores os desempenhos dos modelos. Tais fatos podem explicar os baixos índices estatísticos de ajuste para a BHRM, principalmente o coeficiente de determinação R^2 , 0,23 e o de eficiência NSE, 0,21. Dos indicadores, apenas o percentual de viés PBIAS apresentou boa correlação, demonstrando pequena superestimação por parte do modelo.

Figura 19 - Relação entre os dados simulados pelo modelo e os observados em campo após a calibração para a simulação diária.



Fonte: o autor.

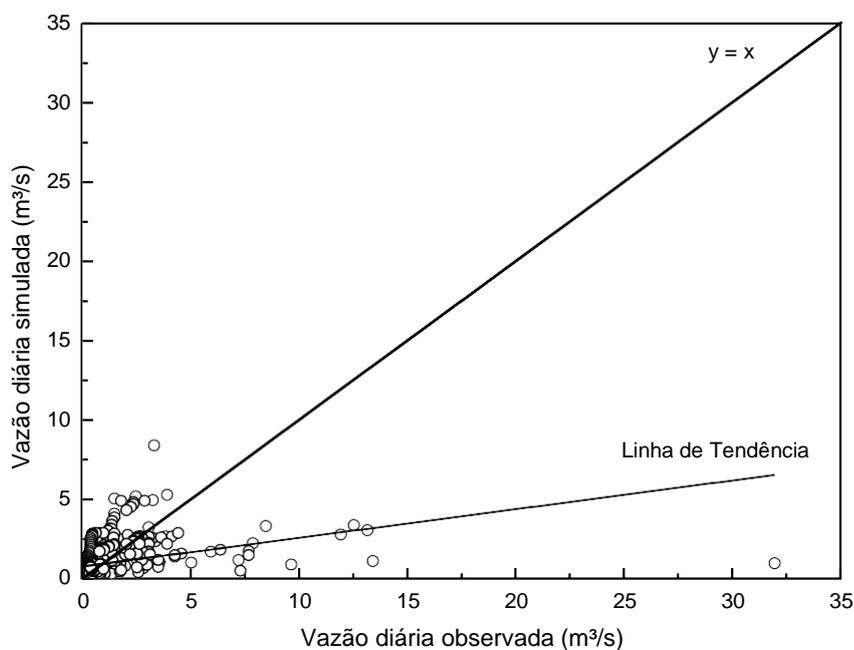
Marcon (2013) simulou os processos hidrológicos da pequena bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí no Rio Grande do Sul (50 Km²), entre junho de 2008 e dezembro de 2009, e não considerou satisfatórios os valores de NSE igual a 0,36 e R² 0,38, para a simulação diária na sub-bacia Rancho do Amaral (4,45 Km²). Saha e outros (2014), aplicando o modelo SWAT na bacia do rio Yass (1597 Km²) na Austrália, compararam diferentes técnicas de calibração (manual e automática), utilizando os passos de tempo mensal e diário. Os autores obtiveram bons resultados para a calibração mensal, enquanto que para a simulação diária o coeficiente de Nash-Stucliffe (NSE) foi apenas 0,12, considerado insatisfatório.

Van Liew e outros (2007), para uma bacia hidrográfica rural nos EUA, majoritariamente composta por pastagens e apresentando áreas agricultáveis e de mata nativa, o NSE não ultrapassou 0,30 para uma das sub-bacias avaliadas. Nesse caso, a baixa eficiência na modelagem foi explicada pela dificuldade do SWAT em reproduzir os eventos de precipitação a curto prazo, sendo afirmado que seria necessária calibração para um período de tempo computacional menor do que um dia. É afirmado ainda que pelo fato do modelo não ter conseguido identificar com precisão as condições antecedentes de umidade do solo imediatamente antes dos eventos na bacia hidrográfica, a partição de precipitação e do escoamento com o método do número da curva SCS foi afetada.

Para a BHRM isto pode ter ocorrido para o maior pico de chuva, registrado em 26/02/2015, precipitação 115,3 mm. A grande incerteza (faixa azul, 95PPU) observada nesse dia corrobora com essa análise.

Considerando a banda de incertezas, as estatísticas não apresentaram bons resultados. O r-factor ficou dentro do padrão ($>1,5$), porém apenas 28% dos dados observados englobaram a faixa de 95PPU. Abbaspour (2015) salienta que, quanto mais interações ocorrem, a faixa de incertezas (r-factor) diminui e, conseqüentemente, menor quantidade de valores das vazões medidas em campo se encaixa dentro do 95PPU. A necessidade de um maior número de interações, na busca por melhores resultados para os índices estatísticos, ocasionou o baixo valor de p-factor.

Figura 20 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas (após calibração).



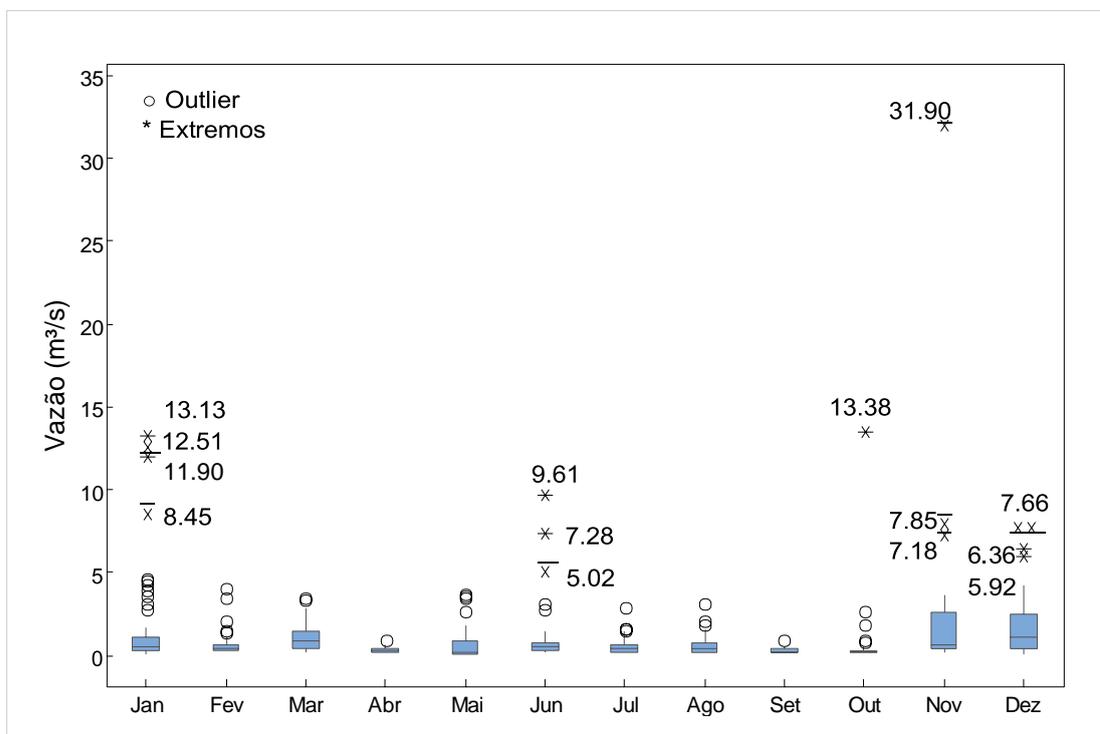
Fonte: o autor.

No gráfico de dispersão da Figura 20, para vazões mais baixas observa-se proximidade maior entre os pontos. Vazões maiores apresentam linha de tendência fora da ideal. Porém, a comparação da dispersão dos dados calibrados com aqueles sem calibração indica melhora nas previsões de vazões diárias, apesar do coeficiente NSE não atingir índice aceitável.

Segundo Ritter e Muñoz-Carpena, 2013, quando a qualidade de um ajuste entre dados simulados e observados é avaliada com base em um só indicador, como o NSE, é preciso que modeladores estejam cientes que o erro do modelo não está linearmente

associado com o valor obtido para o NSE e que esse valor é afetado por outliers (valores atípicos na série de dados), viés do modelo e dados repetidos. Com o objetivo de avaliar fatores que interferem negativamente na obtenção de bons valores de NSE, Mccuen e outros (2006) identificaram que outliers em variáveis medidas apresentaram interferências mais significativas nos resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Sendo assim, buscou-se identificar a presença de outliers na série de dados de vazões medidas no rio Mangaraí entre os anos de 2014-2016. Para tal, plotou-se o gráfico *Box-Plot* (Figura 21) das vazões médias diárias observadas na bacia, para cada mês da série. O *Box-Plot* é um gráfico estatístico que representa a distribuição de um conjunto de dados baseando-se em alguns parâmetros: mediana, 1º e 3º quartil, mínimos e máximos, para que se possa identificar os valores atípicos (outliers) e extremos na série (CAPELA e CAPELA, 2011). Para a série da BHRM, levando em conta a média de vazão ($1,18 \text{ m}^3/\text{s}$), a distribuição da maioria dos dados, 25%-75% (caixa retangular), e os limites dos quartis (linha vertical), foi considerado que valores maiores que $5 \text{ m}^3/\text{s}$ poderiam ser outliers.

Figura 21 - Box-Plot das vazões médias diárias observadas na BHRM em cada mês da série.

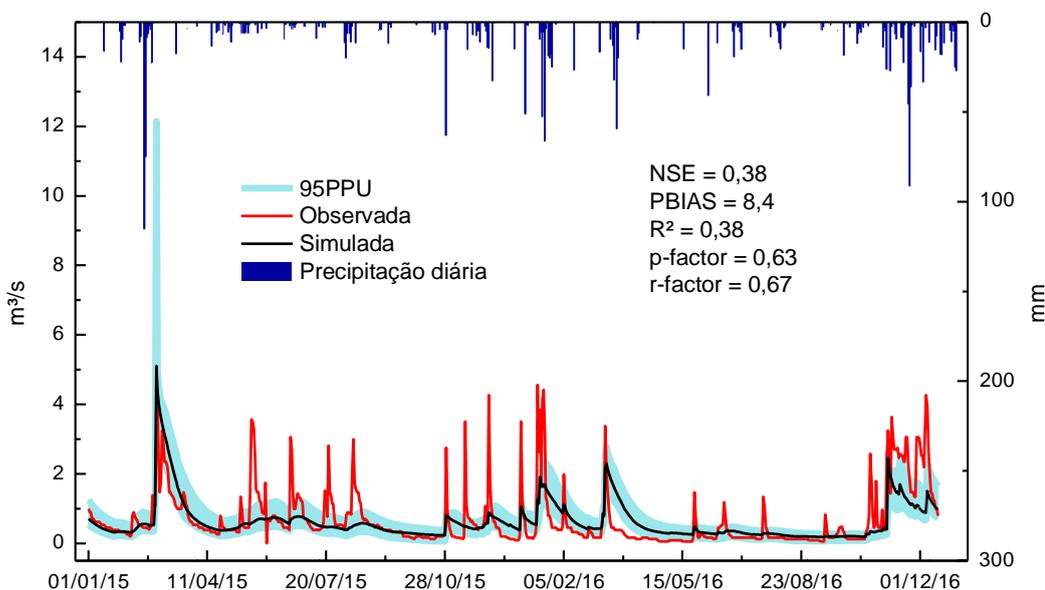


Fonte: o autor.

Devido à pequena quantidade de dados disponíveis, optou-se nesse trabalho por avaliar apenas os valores mais altos (asteriscos) como outliers, sendo que os demais valores representados no gráfico também como outliers (círculos) foram considerados

representativos da série de dados. Os valores mais altos foram removidos da série observada e um novo processo de calibração foi realizado no SWAT-CUP. O resultado dessa nova etapa de calibração é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Relação entre os dados simulados pelo modelo e os observados em campo (sem outliers) após a calibração para a simulação diária.



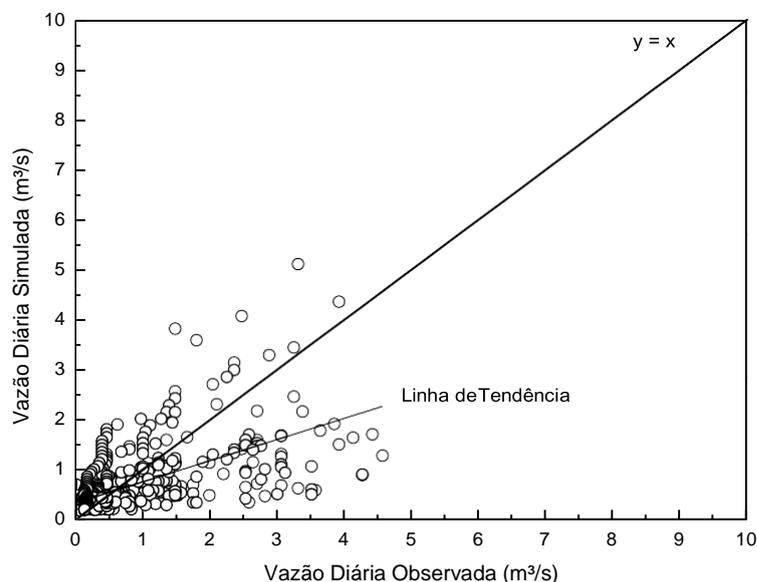
Fonte: o autor.

Observando o hidrograma pós-processo de calibração, sem a presença dos valores considerados extremos, o valor do coeficiente NSE passou de 0,21 para 0,38, o PBIAS de -11,0 para 8,4, com a simulação do modelo característica de subestimação, porém dentro da faixa considerada “muito boa” nos critérios de ajustes. O R^2 também aumentou em relação ao anterior, apresentando valor 0,38. Os valores do NSE e R^2 , se considerados os critérios adotados, se situaram fora do considerado satisfatório. Porém, o valor 0,38 ficou próximo do aceitável para a simulação diária, 0,4. O PBIAS assim como para a simulação com os extremos, apresentou um bom comportamento. Outro aspecto que melhorou consideravelmente foi o relacionado com as incertezas. O p-factor passou de 0,28 para 0,63, ou seja, 63% dos dados observados se enquadraram na faixa de incertezas. O r-factor não sofreu alteração significativa, passando de 0,66 para 0,67.

Sood e Ritter (2010) para simulação de escoamento superficial mensal com o SWAT, na sub-bacia Millsboro Pond, nos EUA, identificaram melhora no coeficiente NSE após a retirada de apenas dois outliers da série medida. O índice passou de 0,28 para 0,55. Gosain e outros (2005) apresentaram uma melhora de 0,61 para 0,84 no coeficiente

de regressão R^2 com a remoção de outliers, em simulação de vazões mensais na bacia do rio Palleru na Índia.

Figura 23 - Gráfico de dispersão dos dados de vazões diárias simuladas e observadas após calibração sem outliers.



Fonte: o autor.

A dispersão dos dados mostrou maior proximidade da reta 1:1, principalmente os relacionados à vazão diária observada, em virtude da retirada dos valores considerados extremos. A maioria dos dados ficaram muito próximos de vazões entre 0 e 2 m³/s, com poucos valores atingindo níveis maiores de vazão. A vazão média simulada foi 0,61 m³/s, enquanto a média observada 0,67 m³/s. O SWAT calculou um valor máximo de 5 m³/s e mínimo de 0,17 m³/s, enquanto esses valores medidos correspondentes foram 4,56 m³/s e 0,05 m³/s.

O gráfico de dispersão corrobora com os índices estatísticas na demonstração da melhora nas vazões simuladas pelo modelo. Para esse estudo de caso foi observado que o modelo SWAT não foi capaz de atingir os picos de valores considerados extremos, e ficou a impressão que se retirados os outros valores considerados outliers apresentados no *box-plot*, a simulação poderia apresentar resultados mais satisfatórios. Esta característica demonstra a dificuldade do modelo SWAT em lidar com bacias hidrográficas pequenas, com baixo tempo de concentração, a partir da sua discretização diária.

5.3 Simulação de cenários

5.3.1 Análise de sensibilidade manual

Após a etapa de calibração, foi possível avaliar cenários alternativos para a bacia hidrográfica. Com esse propósito, considerou-se a sub-bacia calibrada em três situações, com a área total da sub-bacia composta por: (a) Eucalipto, (b) Mata Nativa e (c) Pastagem. Esses cenários foram submetidos à análise de sensibilidade manual dentro do modelo SWAT.

Com o intuito de comparar a análise de sensibilidade dos parâmetros para diferentes cenários de uso e ocupação, foi empregado o índice de sensibilidade (IS) para cada simulação do modelo, observando-se os valores de saída para diferentes processos: vazão, escoamento superficial, produção de água e fluxo de base. Os índices obtidos são mostrados na Tabela 17, a seguir:

Tabela 17 - Índices de sensibilidade de cada parâmetro por cenários de uso e ocupação do solo.

Parâmetro	Mata Nativa				Eucalipto				Pastagem			
	Q	ES	PA	FB	Q	ES	PA	FB	Q	ES	PA	FB
ALPHA_BF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GW_DELAY	-0,05	0,00	-0,05	-0,09	-0,05	0,00	-0,04	-0,10	-0,04	0,00	-0,04	-0,09
GWQMN	-0,95	0,00	-0,52	-2,06	-0,98	0,00	-0,41	-1,83	-0,83	0,00	-0,62	-1,81
GW_REVAP	-0,06	0,00	-0,07	-0,09	-0,06	0,00	-0,05	-0,09	-0,06	0,00	-0,04	-0,10
RCHRG_DP	0,01	0,00	0,01	-0,55	0,01	0,00	0,02	-0,54	0,01	0,00	0,01	-0,52
REVAPMN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EPCO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FFCB	0,01	0,13	0,09	0,06	0,01	0,11	0,08	0,06	0,01	0,10	0,08	0,07
SOL_AWC	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01
SOL_K	0,01	-0,30	0,00	0,18	0,01	-0,25	0,01	0,20	0,00	-0,22	0,00	0,19
CN2	0,01	1,37	0,04	-1,14	0,16	2,10	0,22	-1,95	0,19	2,16	0,27	-2,16
SLSUBBSN	0,00	0,18	-0,02	-0,19	-0,01	0,12	-0,03	-0,22	0,00	0,12	-0,02	-0,21
SURLAG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CANMX	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02	-0,03	-0,04

Continua

Continuação

Tabela 17 - Índices de sensibilidade de cada parâmetro por cenários de uso e ocupação do solo.

Parâmetro	Mata Nativa				Eucalipto				Pastagem			
	Q	ES	PA	FB	Q	ES	PA	FB	Q	ES	PA	FB
ESCO	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
CH_K2	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CH_N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BIOMIX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Q: vazão; ES: Escoamento Superficial (mm); PA: Produção de água (mm); FB: Fluxo de base (mm).

Conclusão.

Na interpretação do índice de sensibilidade, quanto mais próximo a zero o parâmetro mais baixa é a sensibilidade, parâmetros iguais a zero podem ser considerados sem sensibilidade, e quanto maior os valores em módulo mais sensível é o parâmetro. Segundo o critério de avaliação de Lenhart e outros (2002), valores menores que 0,05 possuem sensibilidade baixa ou insignificante, entre 0,05-0,20 média, para a faixa de 0,20-1,00 a sensibilidade é alta e para valores maiores que 1,00 muito alta. Valores negativos indicam que com o aumento da grandeza do parâmetro o valor de saída diminui, ou seja, são inversamente proporcionais.

Considerando a análise de sensibilidade manual, pode-se destacar de forma geral a maior influência dos parâmetros: CN2 e GWQMN para os três cenários simulados. Em todas as metodologias (global, *one-at-a-time* e manual) de análise de sensibilidade dos parâmetros na modelagem da BHRM, os dois parâmetros demonstraram alta sensibilidade.

Mamo e Jain (2013) também identificaram o CN2 como o parâmetro com maiores índices de sensibilidade através de análise manual no SWAT em uma bacia hidrográfica localizada na Etiópia (1600 Km²), com índices 3,91 para a produção de água e 4,14 para o escoamento superficial e atenuação -2,46 para o fluxo de base. Para os cenários considerados na bacia do rio Mangaraí, os maiores valores encontrados foram 0,27 para a produção de água, 2,16 para escoamento e -2,16 para o fluxo de base, todos para o cenário pastagem. Isto pode estar relacionado com maior produção de escoamento no cenário pastagem em virtude da maior compactação do solo e consequente diminuição da infiltração de água utilizada como fluxo de base.

A profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer retorno de fluxo (GWQMN) representou o único parâmetro a manifestar sensibilidade alta no critério de avaliação para a variável vazão, com índice médio dos três cenários -0,92.

O armazenamento inicial de água no solo (FFCB) é outro parâmetro a ser destacado com a análise de sensibilidade manual. Principalmente devido à ligação com o escoamento superficial, quanto maior o armazenamento mais rapidamente o solo irá saturar durante eventos de precipitação, resultando na antecipação e elevação do escoamento. Do mesmo modo, a média do comprimento de declive (SLSUBBSN) apresentou sensibilidade mediana para os processos de escoamento superficial e fluxo de base. A condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K) seguiu a mesma tendência.

Na análise de sensibilidade manual foi observado que quando ocorreram alterações em um dos processos um outro foi afetado praticamente na mesma ordem de magnitude. Como exemplo, quando o parâmetro CN2 demonstrou sensibilidade 2,16 no escoamento superficial do cenário pastagem, o fluxo de base foi atenuado nessa mesma proporção.

Considerando as médias para os cenários, os parâmetros envolvidos com o fluxo subterrâneo: GW_DELAY (-0,09) e GW_REVAP (-0,09) influenciaram mediamente o fluxo de base, sendo que apenas o segundo demonstrou esse grau de sensibilidade para a variável vazão (-0,06). O coeficiente de percolação do aquífero (RCHRG_DP) apresentou alta sensibilidade quanto ao fluxo de base (-0,53) e insignificante quanto aos outros processos. Isto pode ter ocorrido devido ao fato deste coeficiente afetar processos nas camadas de solo mais profundas.

Considerando os baixos índices para todas as condições avaliadas, SOL_AWC e CANMX juntam-se aos parâmetros ALPHA_BF, REVAPMN, EPCO, SURLAG, ESCO, SOL_ALB, CH_K2, CH_N2 e BIOMIX no conjunto de parâmetros com baixa sensibilidade, através da análise manual. Também não foram considerados sensíveis na análise de sensibilidade global para a ocupação atual da bacia os parâmetros: BIOMIX, CH_N2, REVAPMN, EPCO, SOL_ALB, SURLAG e CANMX, demonstrando que para a BHRM esses fatores não interferiram de forma crítica nos processos simulados tanto para o cenário atual quanto para os cenários fictícios. Por outro lado, os parâmetros ALPHA_BF, SOL_AWC, ESCO e CH_K2 foram considerados sensíveis na análise global, que identifica influência em termos da função objetivo.

Aplicando o SWAT na bacia hidrográfica Aswa, no norte de Uganda com características rurais, Nyeko (2015) não identificou qualquer sensibilidade para os parâmetros BIOMIX, SOL_ALB, SURLAG, EPCO e CH_N2 através de análise de sensibilidade com técnica manual. Na avaliação dos parâmetros do modelo SWAT para uma bacia predominantemente florestal na região do Himalaia (69,41 Km²), Kushwaha e Jain (2013) encontraram índices de sensibilidade iguais a zero para produção de água, escoamento superficial e fluxo de base para os parâmetros CH_N2, REVAPMN e SURLAG. A não sensibilidade encontrada para esses parâmetros nos dois estudos citados também foi observada na BHRM.

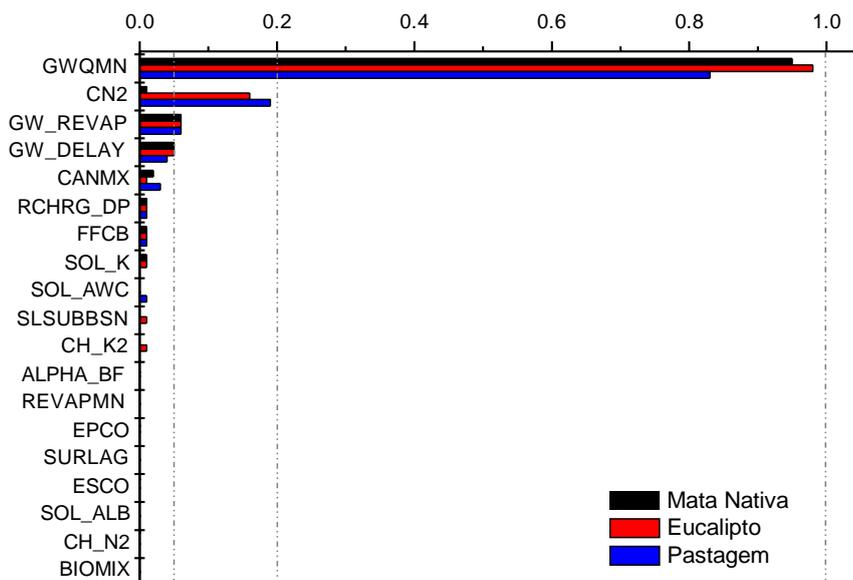
Lenhart e outros (2002) atribuíram em seu estudo a subestimação da sensibilidade dos parâmetros de canal e rugosidade da superfície (CH_K2 e CH_N2) ao pequeno tamanho da bacia hidrográfica considerada (2 Km²).

Quanto ao coeficiente de compensação de evaporação da água no solo (ESCO), foi observado durante a análise de sensibilidade manual que ele só gera respostas mais significativas quando está próximo de 1. Valores inferiores a 0,75 (limite máximo utilizado na análise) não demonstraram influência nos processos analisados.

As figuras apresentadas a seguir mostram os índices de sensibilidade dos parâmetros (em valores absolutos) em cada processo hidrológico para os três cenários aplicados. As linhas verticais marcam os limites das classes de sensibilidade: baixa ou insignificante, média, alta e muito alta.

Para a variável vazão nenhum parâmetro atingiu sensibilidade muito alta. GWQMN, CN2 e GW_REVAP foram os parâmetros mais importantes. O primeiro apresentou alta sensibilidade, enquanto os últimos apresentaram sensibilidade média. Destaca-se a diferença entre as sensibilidades correspondentes ao parâmetro CN2 para os cenários Pastagem e Eucalipto para Mata Nativa, sendo que para o cenário Mata Nativa a sensibilidade foi classificada como baixa enquanto que para os outros dois cenários foi classificada como média. Em análise de sensibilidade manual realizada por Lelis e outros (2012) na bacia hidrográfica do ribeirão Bartolomeu-MG, na sub-bacia composta por mata nativa o CN2 foi bem menos influente do que em outras sub-bacias com uso urbano e pastagens. Em um ranking determinado pelos autores, enquanto nas áreas menos permeáveis o valor do número da curva foi o quinto parâmetro mais sensível, na mata nativa foi apenas o décimo primeiro.

Figura 24 - Índice de sensibilidade dos parâmetros entre os cenários em relação à vazão.



Fonte: o autor.

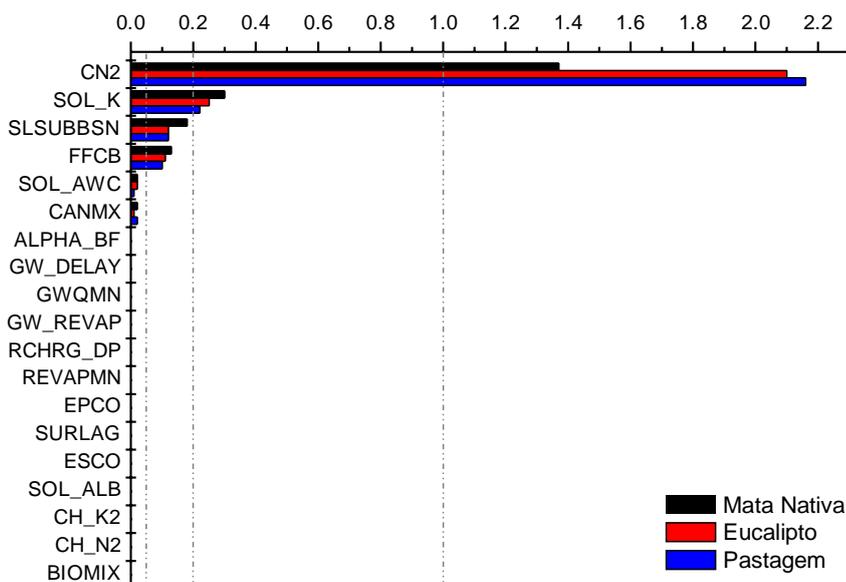
De acordo com Balbinot e outros (2008) a cobertura florestal influencia na dinâmica do escoamento superficial, pois a interceptação da precipitação por parte das árvores amortece, direciona e retém a água no ambiente, o que redistribui a forma como ela chega no solo. Essas características levam a uma menor variabilidade da vazão, retardando os picos de cheias. Tais fatores explicam a pequena alteração nos valores das vazões anuais no cenário Mata Nativa, que refletiram em baixos índices de sensibilidade dos parâmetros.

Apesar de mesmo nível de classificação, para o parâmetro GWQMN a sensibilidade foi maior para o cenário Eucalipto, com valores próximos para Mata Nativa e pouco menor para Pastagem. É preciso destacar que a sensibilidade para os parâmetros GW_DELAY, GW_REVAP, RCHRG_DP e FFCB foi semelhante para os três cenários.

À exceção dos três primeiros parâmetros apresentados na Figura 24, os demais se encaixam na categoria de baixa sensibilidade ou insignificante. Devido ao fato das diferenças entre os índices, para estes parâmetros entre os cenários, se situarem na ordem da segunda casa decimal, as sensibilidades podem ser consideradas semelhantes.

A análise da sensibilidade correspondente às médias de vazões não mostrou diferenças entre os cenários. Por este motivo foi desenvolvida análise de sensibilidade quanto aos processos formadores das vazões, separadamente.

Figura 25 - Índice de sensibilidade dos parâmetros entre os cenários para o escoamento superficial.



Fonte: o autor.

A Figura 25 apresenta o comportamento dos parâmetros para o escoamento superficial na bacia. Pode-se dizer que dentre os 19 parâmetros escolhidos para a análise desse processo uma menor quantidade deles é considerada sensível, porém foram os que apresentaram os maiores índices absolutos de sensibilidade.

Lenhart e outros (2002) também identificaram em seu estudo os três primeiros parâmetros do gráfico como influentes no escoamento superficial. Com o CN2 e SOL_K apresentando sensibilidade alta e SLSUBBSN sensibilidade média.

Para os três cenários o CN2 apresentou sensibilidade muito alta, porém com a Pastagem sendo aproximadamente 35% superior ao cenário de Mata Nativa, devido à característica de menor escoamento em florestas. Em virtude da característica típica de menor área foliar do Eucalipto em relação às outras espécies florestais (LIMA, 1996), o que permite que mais água atinja o solo, esse cenário também apresentou um índice de influência maior que a Mata Nativa.

A condutividade hidráulica do solo (SOL_K), a média de declive (SLSUBBSN) e o armazenamento de água no solo (FFCB) que não haviam revelado influência significativa para a variável vazão, apresentaram sensibilidade considerável no escoamento superficial. O SOL_K foi a maior delas, sendo diferenciada para os cenários. Representando a atenuação do escoamento superficial com o aumento da sua grandeza, esse parâmetro obteve um índice de sensibilidade 25% maior para Mata Nativa em comparação com a Pastagem.

Apesar da sensibilidade média para os parâmetros SLSUBBSN e FFCB no escoamento, a diferença entre os cenários não foi significativa, apenas com a Mata Nativa apresentando índices pouco superiores aos demais cenários. Um aumento na média do declive e na quantidade de água inicial do solo demonstraram interferência semelhante no escoamento superficial em todos os cenários. A sensibilidade desses parâmetros nesse processo ocorre pelo fato de inclinações maiores e maior quantidade de água no solo favorecerem o aumento do escoamento superficial, um devido à gravidade e outro em função da rápida saturação dos poros do solo.

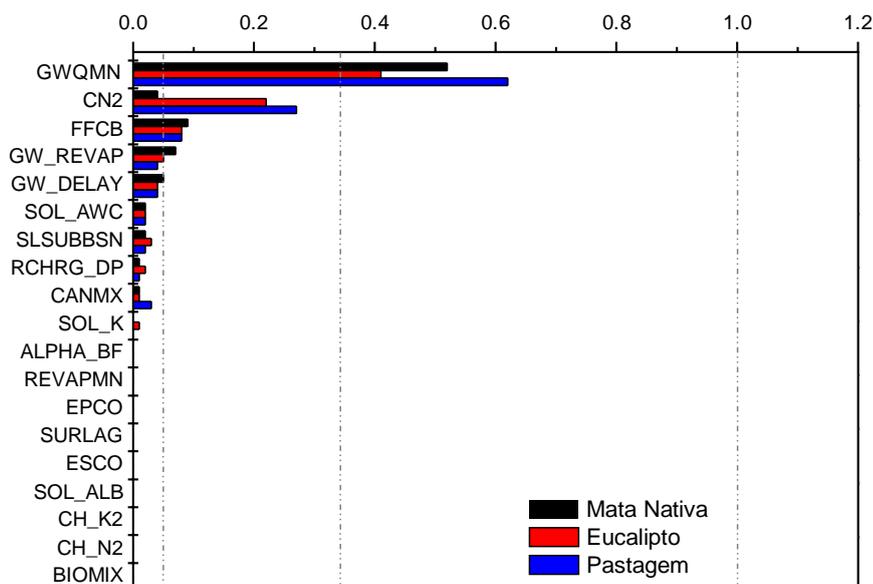
Como o escoamento superficial é um processo que antecede a percolação de água, relacionado apenas com as características de superfície da bacia, era esperado que os parâmetros relacionados ao fluxo subterrâneo não influenciassem esse processo.

A produção de água na bacia consiste na quantidade de água que percorre a sub-bacia e contribui para a vazão no canal principal. No modelo SWAT esse processo é calculado somando o escoamento, o fluxo de base e diminuindo as perdas por transmissão e abstrações em lagoas. Devido a esse conjunto de fatores, na Figura 26 um maior número de parâmetros demonstrou influência na variável de saída do modelo. Os dois primeiros parâmetros são os mesmos identificados na análise da vazão, com o CN2 apresentando o mesmo comportamento para os cenários. No entanto o índice de sensibilidade do GWQMN foi maior para o cenário de Pastagem, cerca de 30% em relação ao Eucalipto e 15% para a Mata Nativa. O FFCB teve sensibilidade média e não diferiu entre os cenários.

O coeficiente de ascensão da água a zona de saturação (GW_REVAP) apresentou sensibilidade média para a Mata Nativa e baixa para Eucalipto e Pastagem. Esse parâmetro representa o movimento da água entre o aquífero raso e a zona insaturada, quando o material presente acima do aquífero está seco, a água da zona denominada franja capilar (que separa a área insaturada da saturada) irá evaporar e ser substituída pela água subjacente ao aquífero. Em áreas com árvores de raízes profundas pode haver uma remoção de água direta do aquífero por parte dessas raízes. Sendo assim, esse processo pode ser mais significativo em bacias onde há um crescimento de plantas com raízes maiores (SWAT, 2012).

GW_DELAY, SOL_AWC, SLSUBBSN, RCHRG_DP e CANMX foram parâmetros com sensibilidade insignificante e não diferentes para os cenários.

Figura 26 - Índice de sensibilidade dos parâmetros para cada cenário para a produção de água.



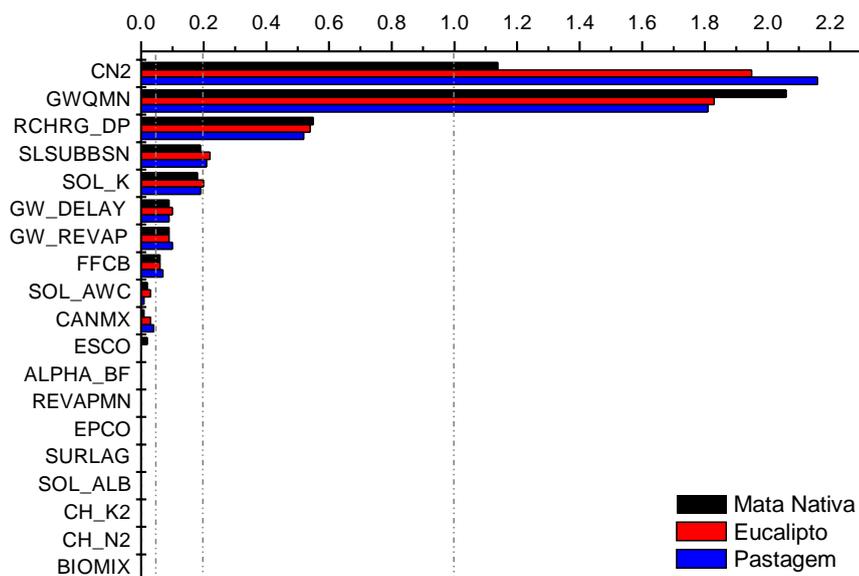
Fonte: o autor.

Seguindo a tendência do processo de produção de água, o fluxo de base (Figura 27) apresentou altos índices absolutos de sensibilidade para CN2 e GWQMN. Onde para o primeiro a Mata Nativa foi inferior aos outros dois cenários, e no segundo apresentou sensibilidade superior. Entretanto, todos os índices considerados com alta sensibilidade.

A presença de parâmetros relacionados à bacia (SLSUBBSN) e solo (SOL_K), que influenciam em grande magnitude o escoamento superficial (Figura 25) a frente (alta sensibilidade) de parâmetros do próprio fluxo subterrâneo, GW_DELAY e GW_REVAP (sensibilidade média) evidencia como o aumento no escoamento superficial influencia fortemente na atenuação do fluxo de base.

O escoamento de base foi o único processo em que o coeficiente de percolação do aquífero (RCHRG_DP) apresentou índices consideráveis de sensibilidade (alta). Avaliando como os fenômenos de escoamento subterrâneos são calculados, esse parâmetro está presente na maioria dos cálculos para o modelo SWAT. Porém ele não diferiu significativamente entre os cenários, por se tratar de variações internas na camada do solo.

Figura 27 - Índice de sensibilidade dos parâmetros para cada cenário para o fluxo de base.



Fonte: o autor.

Avaliando todos os gráficos apenas GWQMN e CN2 apresentaram maiores diferenças em suas sensibilidades entre Mata Nativa, Pastagem e Eucalipto, mas com todos os valores englobados na mesma classificação, tendo como exceção o CN2 na variável vazão. O número da curva é determinado pelo uso e tipo do solo, por isso as maiores diferenças. A profundidade limite de água no aquífero raso para que ocorra retorno de fluxo (GWQMN) teve sua sensibilidade interferida em maior escala para o fluxo de base. Houve maior redução desse processo para a Mata Nativa, quando comparada com Eucalipto e Pastagem.

Para o armazenamento máximo de água no dossel (CANMX) a sensibilidade foi baixa para os quatro processos, esperava-se que esse parâmetro fosse mais sensível na sub-bacia de Mata Nativa, pelo fato da maior concentração de vegetação. Porém a sensibilidade foi menor do que Pastagem e Eucalipto, contudo a diferença foi mínima. Considerando a desproporção na segunda casa decimal e o fato de estarem inclusos na mesma categoria de sensibilidade, avalia-se que praticamente não houve disparidade entre os cenários quando a alteração do parâmetro ocorreu em função do seu limite válido.

Avaliando as características dos parâmetros e os processos que eles influenciaram identificou-se uma coerência, processos de fluxo de base foram influenciados por parâmetros subterrâneos, enquanto parâmetros utilizados nas formulações do escoamento superficial afetaram diretamente esse processo. Entretanto, pode-se

dizer que em escala de bacia hidrográfica dada a complexidade do ambiente todos os recursos estão interligados e o comportamento de um gera alteração em outro. Esse sistema compensatório pode ter contribuído para os índices de sensibilidade tão próximos em alguns parâmetros.

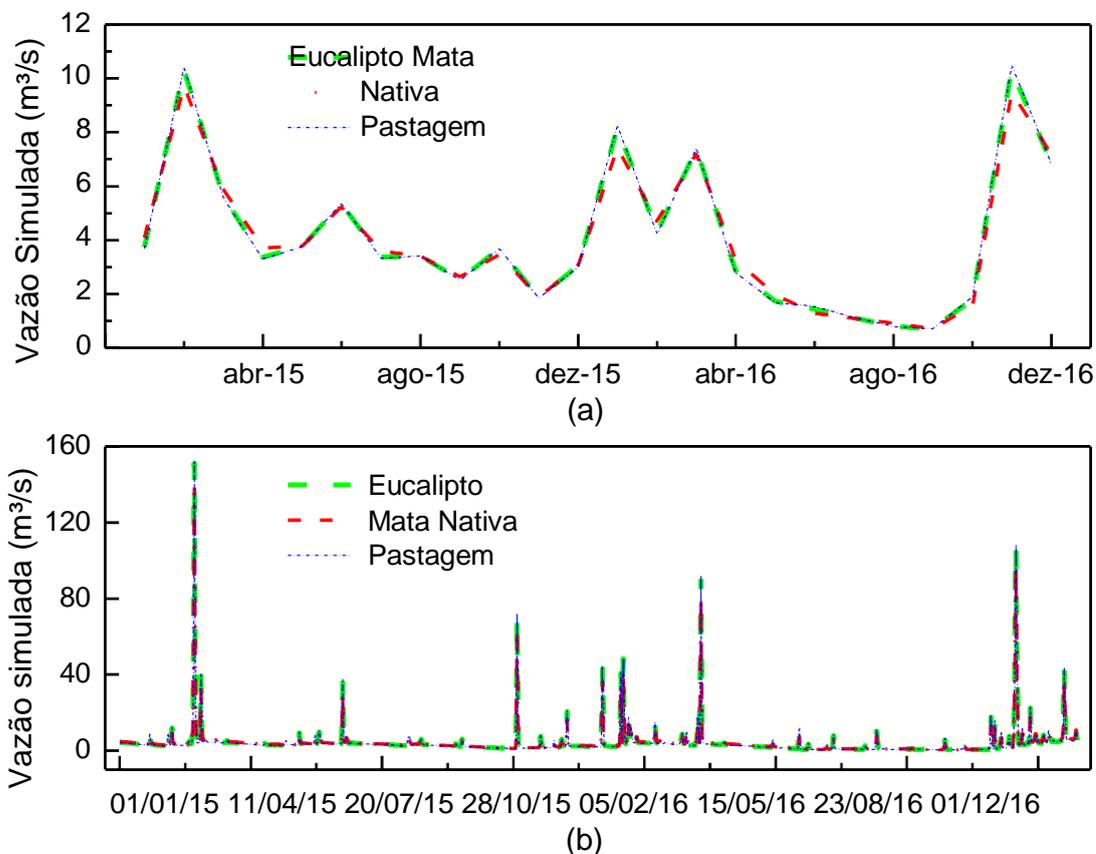
Dessa forma, a análise manual demonstrou ser um pouco limitada para a determinação dos parâmetros relevantes do modelo em comparação com a análise automática, que identificou parâmetros que foram importantes na calibração do modelo. À vista disso, a escolha criteriosa e adequada de uma análise interfere para que os processos posteriores sejam eficazes. Normalmente uma combinação entre análises, quando possível, para obter maior clareza nos parâmetros e confirmar a sua real relevância na modelagem é o melhor caminho a seguir.

5.3.2 Variáveis hidrológicas simuladas

Após aplicação do modelo, através da análise das vazões simuladas pelo SWAT com os passos de tempo mensal e diário observa-se que os três cenários não apresentaram grandes diferenças, sendo alguns valores, principalmente mensais, praticamente idênticos. Para vazões diárias a maioria dos valores apresentou diferenças apenas nas segundas ou terceiras casas decimais. Como pode ser constatado no gráfico da Figura 28, tanto para a simulação mensal quanto para a diária os comportamentos para os três cenários foram muito próximos. É possível observar sobreposição das linhas de valores simulados. Excepcionalmente, o cenário Mata Nativa, para os meses de abril-2015 e maio-2016 os valores foram pouco maiores e para janeiro e novembro de 2016 valores um pouco menores.

No gráfico (b) a maior diferença entre os cenários ocorreu em 27 de fevereiro de 2015, dia posterior à maior precipitação na bacia (153 mm) e conseqüentemente, vazões máximas simuladas para os três cenários. Para Pastagem a vazão foi 152,8 m³/s, um pouco superior ao cenário Eucalipto (151 m³/s) e cerca de 10% (14,1 m³/s) a mais que a simulada para o cenário de Mata Nativa (138,7 m³/s). É importante evidenciar que as simulações dos cenários ocorreram considerando os parâmetros iniciais do modelo, e não os valores calibrados. Por isto as altas vazões simuladas para os cenários apresentados. A tendência do modelo seguiu um comportamento padrão em função dos eventos de precipitação. Elevadas chuvas retornaram as maiores vazões, com as vazões para o cenário cobertura de Pastagem superiores, para o cenário Eucalipto intermediárias e o para o cenário de Mata Nativa as menores vazões.

Figura 28 - Simulação com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de uma sub-bacia da BHRM. (a) simulação mensal e (b) simulação diária.



Fonte: o autor.

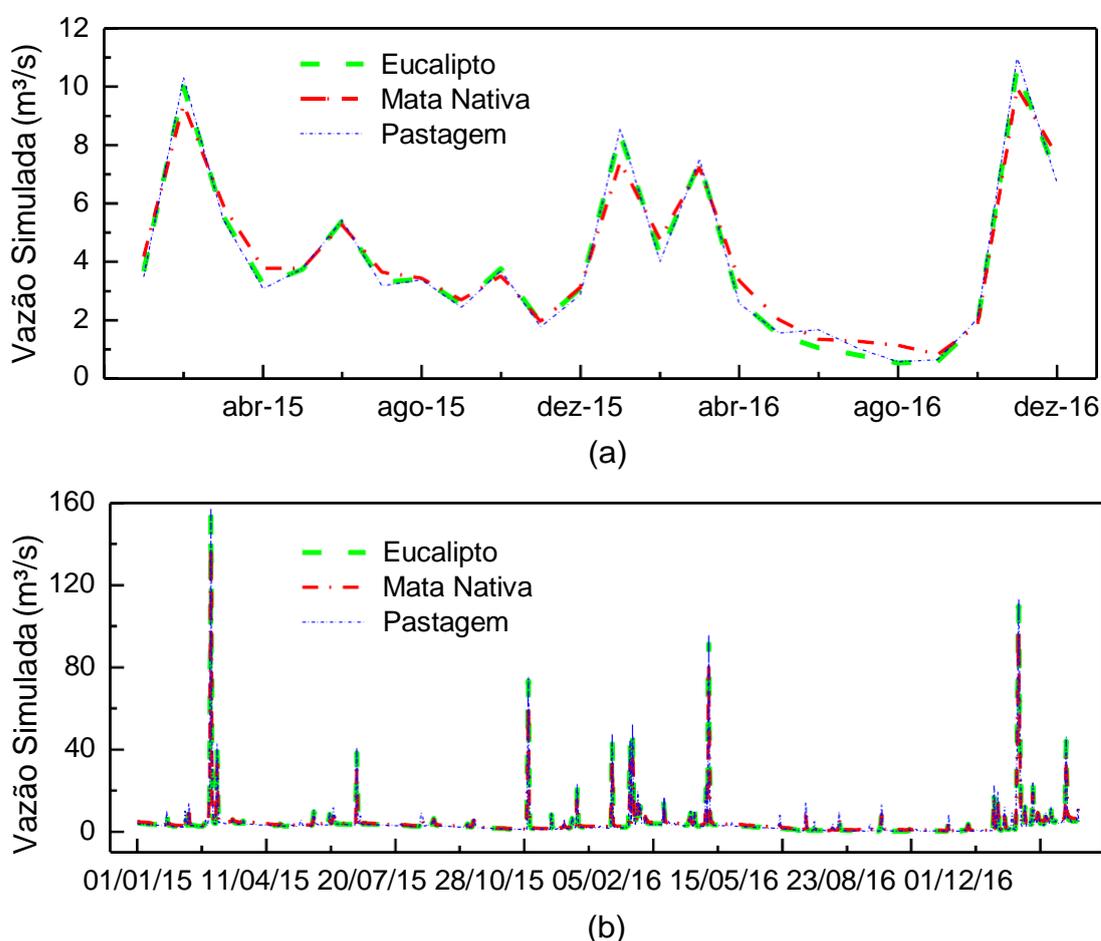
Para as épocas de seca as vazões simuladas considerando cenário Mata Nativa foram ligeiramente superiores às demais. Isto ocorre geralmente em bacias hidrográficas, pois em épocas sem precipitação o fluxo base é o principal mantenedor de vazões e bacias sob a influência de florestas tendem a apresentar maiores taxas de infiltração.

A umidade antecedente e a permeabilidade do solo são os principais elementos influenciadores da infiltração de água no solo. Em virtude desses fatores associados com os macroporos e da elevada quantidade de matéria orgânica em solos de mata nativa as taxas de infiltração nestas são maiores quando comparadas com as correspondentes a pastagens (BEST et al., 2003; BACELLAR, 2005).

Os gráficos da Figura 28 mostram que as vazões médias correspondentes aos três cenários, no caso de simulação mensal não diferem significativamente. Quanto às vazões diárias, valores muito próximos são apresentados em épocas de estiagem e moderadamente superiores simulados em tempos chuvosos, com as médias se apresentando próximas.

Considerando o tamanho relativamente pequeno da sub-bacia (15 Km²) que teve as características de ocupação alteradas, optou-se por aplicar os cenários para o contexto de toda a bacia hidrográfica do rio Mangaraí (164 Km²) e avaliar se houve maior interferência na vazão do ponto localizado no exutório da bacia. Considerou-se os mesmos critérios de cenários utilizados anteriormente (cobertura total de Eucalipto, cobertura total de Mata Nativa e cobertura total de Pastagem) e os gráficos das simulações (mensal e diária) da variável vazão para cada cenário encontram-se na Figura 29.

Figura 29 - Simulação com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de toda a BHRM. (a) simulação mensal e (b) simulação diária.



Fonte: o autor.

Através da nova simulação observou-se que houve menor sobreposição de valores quando comparada com a alteração dos cenários apenas para uma sub-bacia. Para as médias mensais, gráfico (a), o período entre abril e setembro de 2016 foi o que demonstrou maiores diferenças entre os cenários, com a Mata Nativa apresentando maiores vazões nesse período de recessão, seguindo a tendência da simulação

apenas com uma sub-bacia, porém com diferenças um pouco mais evidentes entre os cenários. Os demais meses demonstraram entre os cenários variações similares com aquelas obtidas quando foram alterados apenas na sub-bacia.

Na simulação da vazão diária, para o maior pico e maior discrepância entre os cenários (27/02/2015) nesta segunda abordagem, o cenário Pastagem apresentou diferenças um pouco superiores para os demais cenários quando comparadas com a primeira abordagem. Com vazão igual a 157,5 m³/s, foi aproximadamente 2,6% maior que o Eucalipto (153,4 m³/s) e 13% maior que a Mata Nativa (138,9 m³/s). Porém, apesar de ser levemente superior, quando comparada com as diferenças obtidas para essa data no gráfico (b) da Figura 28 não se identifica uma alteração relevante. O mesmo comportamento pode ser observado para os demais dias do período simulado.

Oliveira (2014) em análise de cenários de uso com eucalipto para diferentes manejos, pastagem e vegetação nativa em uma microbacia experimental (2,84 Km²) em Aracruz-ES, também não observou diferenças entre as vazões médias simuladas e afirmou que alterações de cenários não influenciaram na resposta hídrica da bacia. A autora ressaltou que os parâmetros relativos aos usos utilizados no modelo SWAT, podem não se mostrar representativos para as condições tropicais brasileiras. Dentre os usos avaliados nessa microbacia, pastagem foi o único uso que apresentou valores de vazões ligeiramente superiores aos obtidos para os outros cenários. Foram observadas algumas diferenças entre resultados para manejos distintos de eucalipto. A autora utilizou uma série de dados de 27 anos (1987-2014).

Perazzoli e outros (2013) utilizaram o SWAT para simular diferentes cenários na bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia - SC (30,74 Km²). Os autores compararam o cenário atual da bacia com cenários nos quais 95,85% da área seriam alterados para usos de agricultura, mata nativa e pastagem. Da mesma forma como observado no presente trabalho para a BHRM, não foram registradas diferenças significativas entre os valores de vazões simulados considerando os 4 cenários, para o período 2001-2010.

Diversas pesquisas voltadas para avaliação de cenários comparam valores simulados de escoamento superficial, evapotranspiração, produção de água e recargas subterrâneas separadamente ao invés de vazões, como podem ser citados os trabalhos de Fohrer e outros (2001), Ghaffari e outros (2010), Baker e Miller (2013) e Lu e outros (2015).

Para a BHRM, os valores referentes à alguns desses processos para a simulação considerando a condição atual e os três cenários são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Simulação das variáveis hidrológicas para os cenários aplicados na BHRM.

Ano	Precipitação (mm)	Cenários	Processos			
			ES	ET	FB	PA
2015	815	Atual	242	144	358	616
		Eucalipto	262	132	332	608
		Mata Nativa	226	131	370	612
		Pastagem	272	148	310	595
2016	1244	Atual	423	469	296	730
		Eucalipto	455	489	260	725
		Mata Nativa	417	413	337	766
		Pastagem	494	453	246	749

ES: Escoamento Superficial (mm); ET: Evapotranspiração real (mm); PA: Produção de água (mm); FB: Fluxo de base (mm).

Para 2016 foram simulados maiores valores de quantidades de água para a maioria dos processos. Esse panorama é justificado pela maior precipitação registrada neste ano. Quanto ao escoamento superficial, os maiores valores foram simulados para o cenário Pastagem, correspondendo a 100 mm (15%) a mais que o simulado para o cenário Real, 48 mm (6,68%) a mais que o simulado para o cenário Eucalipto e 122 mm (19%) a mais que o correspondente ao cenário de Mata Nativa. De acordo com Silva e outros (2016) solos compostos por pastagem tendem a reduzir a infiltração devido à compactação resultante do pisoteio de animais.

Quanto ao fluxo subterrâneo, o cenário Mata Nativa correspondeu aos maiores valores, corroborando com a afirmação de que este processo é superior para este tipo de cenário, principalmente em épocas secas.

A sub-bacia 2 apresenta principalmente os usos Pastagem (37,94%), Mata Nativa (21,39%) e Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração (15,35%). Somadas as áreas para estes dois tipos de mata, a área praticamente se iguala à de Pastagem. Outros usos (Cultivos Agrícolas, Macega, Eucalipto, entre outros) ocupam pequena área. Este fato pode ter contribuído para que valores de vazões simuladas para os diferentes cenários ficassem próximos.

Lu e outros (2015) não observaram grandes impactos na simulação hidrológica em escala de sub-bacia no rio Fenhe, na China (3242 Km²), ao alterarem cenários de uso e ocupação. Afirmaram que esses impactos podem ser afetados pelas condições de precipitação (intensidade e distribuição). Além disso concluíram que diferentes combinações de uso e ocupação do solo podem produzir efeitos similares na hidrologia. As simulações realizadas no presente trabalho para a sub-bacia da BHRM indicaram condições semelhantes.

Fohrer e outros (2001) aplicaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica Dietzhölze (81,7 Km²), na Alemanha. Porcentagem de áreas de pastagens foi aumentada, ocorrendo diminuição de áreas de florestas. Os autores identificaram impacto relativamente pequeno no balanço hídrico anual na área, fato que atribuíram aos efeitos de compensação que ocorrem em bacias hidrográficas complexas. No entanto, o escoamento superficial, quando avaliado separadamente, demonstrou um aumento considerável, de 72 para 126 mm com a diminuição da mata nativa. Conseqüentemente, a evapotranspiração sofreu redução, visto que áreas com maiores concentrações de mata apresentam maiores armazenamentos de água nos dosséis (que poderá evaporar). Caso retirada a vegetação maior quantidade de água é destinada ao escoamento.

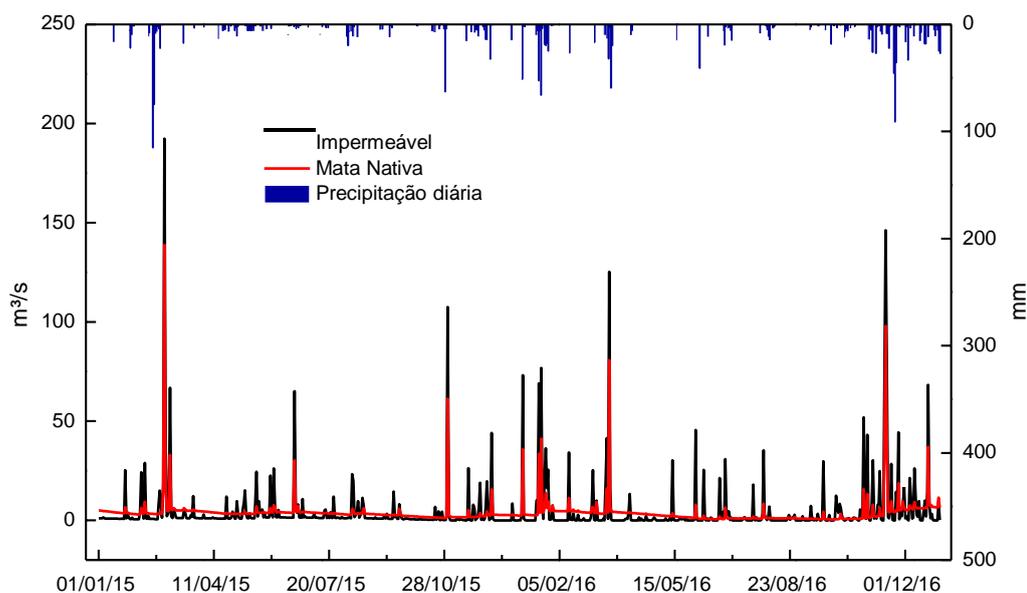
Fohrer e outros (2005), modelando bacia hidrográfica da Alemanha (Aar - 60 km²) encontraram resultados parecidos com o do estudo citado anteriormente. O impacto de mata nativa, pastagem e cultivos agrícolas nos componentes hídricos do modelo foi considerado relativamente moderado. Os autores opinam que o SWAT não processa as mudanças no uso do solo como um processo dinâmico, além de não considerar o efeito que causam nas propriedades do solo ou no microclima e indicam a necessidade de melhorias na parametrização das mudanças do solo.

Para a sub-bacia da bacia hidrográfica no rio Mangaraí, as alterações no uso e ocupação do solo não proporcionaram mudanças significativas nos resultados da modelagem. Isso pode ter ocorrido devido às características parecidas entre os cenários, basicamente rurais. O cenário Pastagem foi o que mais influenciou no escoamento superficial. O fator cobertura do solo, possivelmente devido às condições rurais das bacias, não afetou significativamente os resultados, podendo características dos solos e declividade (iguais para todos os cenários) ter contribuído para valores simulados semelhantes. O tamanho relativamente pequeno da sub-

bacia, o baixo tempo de concentração e a rápida saída das águas podem ter contribuído para esse comportamento.

Com o intuito de melhor analisar o desempenho do modelo quanto às simulações, buscou-se considerar cenários extremos na bacia. Para a BHRM foram considerados cenários com 100% de Mata Nativa e com solo totalmente impermeável. Resultados das simulações são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Vazões diárias simuladas para cenários extremos na BHRM.



Fonte: o autor.

Os cenários extremos conduziram a maiores diferenças nas vazões simuladas. Para a maior precipitação (26/02/2015) o cenário Mata Nativa resultou em vazão 138,9 m³/s enquanto que no cenário com solo impermeável foi 192,5 m³/s, diferença superior a 38%. O comportamento geral das simulações foi semelhante ao observado para os cenários Pastagem, Mata Nativa e Eucalipto, com diferenças significativas de vazões para períodos de maiores precipitações e diferenças muito pequenas nos períodos de estiagem.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os parâmetros que tiveram maior influência na modelagem da bacia hidrográfica do rio Mangaraí, segundo a análise de sensibilidade global, foram aqueles relacionados diretamente com os escoamentos superficial e subterrâneo. Sendo eles: CN2, RCHRG_DP, GWQMN, ALPHA_BF, FFCB, ESCO, GW_DELAY, CH_K2, SLSUBBSN, SOL_K e SOL_AWC. O parâmetro apresentando maior sensibilidade e importância para determinação do volume de escoamento superficial direto da vazão do rio Mangaraí foi o CN2, ou seja, o número da curva inicial para a condição de umidade II.

Na comparação entre duas técnicas de análise de sensibilidade, a análise *one-at-a-time* não considerou os parâmetros FFCB, SOL_K e SLSUBBSN importantes para a variável vazão, enquanto que a global atribuiu relevância para essas propriedades, que demonstraram utilidade na calibração do modelo.

Apesar de serem avaliações distintas, a sensibilidade global tende a ter maior robustez, por comparar valores observados em campo e atribuir à modelagem critérios estatísticos de maior confiabilidade. Desta dessa forma esse tipo de análise se credencia com maior confiabilidade, sendo a *one-at-a-time* utilizada apenas para uma primeira avaliação do comportamento dos parâmetros.

Considerando índices estatísticos, o modelo hidrológico SWAT apresentou melhores resultados nas simulações de vazões mensais do que nas relativas às vazões diárias do rio Mangaraí. A presença de valores atípicos (outliers) na série de dados medidos demonstrou grande influência nos resultados das estatísticas de avaliação da qualidade do ajuste para a simulação diária.

Na análise de sensibilidade manual dos parâmetros para cada cenário, as variações dos dados de saída da variável vazão em resposta às alterações nos parâmetros de entrada do modelo demonstraram semelhanças para os cenários considerados. Na análise separada de processos hidrológicos (escoamento superficial, produção de água e fluxo de base) percebeu-se maior diferença entre cenários, principalmente quanto ao valor do número da curva (CN2). Este parâmetro não afetou significativamente a vazão para o cenário de Mata Nativa mas apresentou influência média para os cenários de Pastagem e Eucalipto. Apesar de ter sido identificada classificação idêntica de sensibilidade para o CN2 nos diferentes cenários, para o

cenário Pastagem, em valores absolutos, no escoamento superficial o índice chegou a ser 35% do valor estimado para o cenário Mata Nativa.

Verificou-se que os processos (escoamento superficial, fluxo de base e produção de água) estão relacionados entre si e, dependendo das características da bacia, se auto influenciam.

Quanto à avaliação das variáveis hidrológicas de saída do modelo, os cenários alternativos na sub-bacia não diferiram entre si. Para a simulação de vazões mensais, resultaram valores praticamente idênticos para a variável vazão. Esse fato ocorreu devido ao SWAT utilizar médias dos valores diários para determinação dos valores simulados de vazões mensais e anuais.

Variações pontuais observadas nos dados de vazões diárias simuladas puderam ser observadas para eventos de precipitação. O cenário Pastagem apresentou as maiores vazões, seguido pelo do Eucalipto, com o cenário Mata Nativa apresentando os menores valores.

Para épocas de estiagem, o cenário Mata Nativa foi o que resultou em maiores vazões, o que era esperado pelo fato do fluxo de base ser maior para esse tipo de ocupação do solo.

Relativamente às outras variáveis (escoamento superficial; evapotranspiração, produção de água e fluxo de base), o cenário Pastagem resultou no maior escoamento superficial. O cenário Mata Nativa apresentou os maiores valores de fluxo de base e vazões na sub-bacia. O cenário Eucalipto resultou, em geral, em valores intermediários, considerando os valores obtidos para os cenários Mata Nativa e Pastagem.

Variabilidade de características no interior das bacias, considerando diferentes condições em suas sub-bacias, dificultam a adequada simulação de vazões em seus exutórios. Recomenda-se continuidade do monitoramento para formação de séries de variáveis de entrada mais longas, visando aperfeiçoamento da calibração e validação do modelo. Recomenda-se, ainda, monitoramento de vazões em outras sub-bacias da bacia do rio Mangaraí.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C.; SONNLEITNER, M. A.; SCHULIN, R. Uncertainty in estimation of soil hydraulic parameters by inverse modelling: example Lysimeter experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 501-509, 1999.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of hydrology**, v. 333, p. 413-430, 2007a.
- ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. SWAT-CUP Calibration and uncertainty programs for SWAT. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, MODELLING AND SIMULATION SOCIETY OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND (MODSIM), Oxley, 2007b.
- ABBASPOUR, K. C. **SWAT CUP: SWAT Calibration and uncertainty programs – A user manual**. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EWAG, 2015, 100 p.
- ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752, 2015.
- ADRIOLO, M. V.; SANTO, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., Belo Horizonte, 2008.
- ANDRADE, M. A.; MELO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.
- ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SRINIVASAN, R. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 2, p. 440-453, 2017.
- ANH, N. V.; FUKUDA, S.; HIRAMATSU, K.; HARADA, M. Sensitivity-based calibration of the Soil and Water Assessment Tool for hydrologic cycle simulation in the Cong Watershed, Vietnam. **Water Environmental Resources**, v. 87, n. 8, p. 735-750, 2015.
- ANTONGIOVANNI, L. L.; COELHO, A. L. M. Panorama sobre a desertificação no estado do Espírito Santo. Consultoria e relatório apresentados para o IEMA do Governo do Estado do Espírito Santo, Outubro, 2005.
- APRÍGIO, P. O.; BRANDÃO, J. L. B. Modelos hidrológicos para simulação da poluição difusa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., Maceió, 2011.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Modelagem do escoamento na sub-bacia do rio

Japarutuba-Mirim (SE) através do modelo SWAT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., João Pessoa, 2012.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINAVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, p. 1091-1102, 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

BACELLAR, L. A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo. br**, v. 1, p. 1-39, 2005.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of hydrology**, v. 846, p. 100-111, 2013.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 131-149, jan./abr. 2008.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT. 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso. 2005.

BARBAROTTO-JÚNIOR, J. L. Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis. 2014. 188 p. Dissertação (Mestrado – Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. 2014.

BÄRLUND, I.; KIRKKALA, T.; MALVE, O.; KÄMÄRI, J. Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, p. 719-724, 2007.

BASTOS, P. C. Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente. 2009. 138 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2009.

BEGOU, J. C.; JOMAA, S.; BENABDALLAH, S.; BAZIE, P.; AFOUDA, A.; RODE, M. Multi-site validation of the SWAT model on the Bani catchment: model performance and predictive uncertainty. **Water**, v. 8, p. 178-201, 2016.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and validation of Soil and Water Assessment Tool on an agricultural watershed in Upstate New York. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 10, n. 5, p. 363-374, set./out. 2005.

BEST A.; ZHANG, L.; MCMAHOM T.; WESTERN, A; VERTESSY R. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability. **CSIRO Land and Water Technical**. MDBC Publication: Austrália. Technical Report, 56 p. 2003.

BEVEN, K. **Environmental Modelling: an uncertain future?** 1. ed. New York: Routledge, 2009. 328 p.

BLAINSKI, E.; SILVEIRA, F. A.; CONCEIÇÃO, G. Utilização do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para estudos na microbacia hidrográfica do rio Araranguá/SC. In: Taller Internacional Red Riegos–CYTED, Florianópolis, 2008.

BONGANHA, C. A.; GUIGUER, N.; PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. C.; RIBEIRO, M. L. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. **Revista Analytica**, São Paulo, n. 30, p. 116-120, ago./set. 2007.

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. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29, n. 2, p. 189-200, 2013.

BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; MONTEIRO, J. A. F.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in brazilian watersheds and river basins. **Tópicos em Ciências do Solo**, v. 9, p. 241-290, 2015.

BOSH, D. D.; SHERIDAN, J. M.; BATTEN, H. L.; ARNOLD, J. G. Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed. **Transactions of the ASABE**, v. 47, n. 5, p. 1493-1506, 2004.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 29 ago. 2017.

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

BRESSIANI, D. A. Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting. 2016. 224 p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento) -Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2016.

BRIGHENTI, T. M. Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT. 2015. 116 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

BRITO, E. Estimativa da produção de sedimentos da bacia do rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático Soil and Water Assessment Tool (SWAT). 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.

BU, H.; MENG, W.; ZHANG, Y.; WAN, J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. **Ecological Indicators**, v. 41 p. 187–197, 2014.

CAPELA, M. V.; CAPELA, J. M. Elaboração de gráficos box-plot em planilhas de cálculo. In: CONGRESSO DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL DA REGIÃO SUDESTE–CNMAC, 1.,Uberlândia, 2011.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CARVALHO, C. V. A. Simulação de transportes e deposição de sedimentos siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia. 2002. 131 p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília. 2014.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. 2013. 141 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geociências) – Universidade de Brasília. 2013.

CECÍLIO, R. A.; DEMETRIUS D. S.; FERNANDO, F. P.; MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 7, n. 3, p. 415-422, 2003.

CHAVES, T. A. Integração de modelos hidrológico e econômico para a avaliação dos custos internos da erosão na agricultura em bacias hidrográficas. 2016. 141 p. Tese (Doutorado – Doutorado em Geografia) – Universidade de Brasília. 2016.

CHUNG, S.; GASSMANN, P. W.; GU, R. R.; KANWAR, R. S. Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. **Transactions of the ASABE**, v. 45, n. 4, p. 1135-1146, 2002.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1133-1148, 2010.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-39, jul./set. 2003.

CORREIA, T. C. Calibração de um modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do Ribeira de Quarteira. 2013. 97 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Algarve. 2013.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANA, P. C. G. Simulação da vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semi-árida da Paraíba. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo. Boletim Técnico, 45. Rio de Janeiro, 1978. 478 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

EPA, **Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models**. EPA/100/K-09/003. Washington, 2009.

EPA – United States Environmental Protection Agency. Learn About Models at EPA. Disponível em: <<https://www.epa.gov/modeling/learn-about-models-epa>>. Acesso em 7 de abr. 2017.

FARIA, D. A. Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água da bacia hidrográfica do Ribeirão Guaratinguetá (SP). 2012. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista. 2012.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informações geográficas: o paradigma geoestatístico por indicação. São José dos Campos. 1999. 213 p. Tese. (Doutorado em Computação Aplicada) – INPE. 1999.

FERNANDES, J. G. Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT. 2015. 186 p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco. 2015.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF. 2014. 165 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília. 2014.

FEYEREISEN, G. W.; STRICKLAND, T. C.; BOSCH, D. D.; SULLIVAN, D. G. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 843-855, 2007.

FOHRER, N.; HAVERKAMP, S.; ECKHARDT, K.; FREDE, H. G. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, n. 7-8, p. 577-582, 2001.

FOHRER, N.; HAVERKAMP, S.; FREDE, H. G. Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 659-672, 2005.

FONTAINE, T. A.; CRUICKSHANK, T. S.; ARNOLD, J. G.; HOTCHKISS, R. H. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the Soil Water Assessment Tool (SWAT). **Journal of Hydrology**, v. 262, n. 4, p. 209-223, 2002.

FRANCO, A. C. L. Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada. 2017. 166 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

FUKUNAGA, D. C. Estimativa de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT. 2012. 108 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: a review from 1999 until 2010. In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE & WORKSHOPS, Toledo/Espanha, 2011.

GARCIA, G. J.; GAMERO, H. G.; GARCIA, L. B. R.; VETTORAZZI, C. A.; KRÖENERT, R.; VOLK, M.; LAUCH, A.; MEYER, B. Impacto do uso da terra na erosão do solo e no

balanço de qualidade de água na bacia do rio Corumbataí – SP. **Holos Environment**, v. 6, n. 2, p. 118-136, 2006.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GHAFFARI, G.; KEESSTRA, S.; GHODOUSI, J.; AHMADI, H. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, northwest Iran. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 892-903, 2010.

GOSAIN, A. K.; RAO, S.; SRINIVASAN, R.; REDDY, N. G. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 673-628, 2005.

GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. Hydrological evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.

GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, R.; HARMEL, R. D. Soil and Water Assessment Tool hydrologic and water quality evaluation of poultry litter application to small-scale subwatersheds in Texas. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1199-1209, 2007.

GUIMARÃES, C. F. Simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). 2016. 114 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2016.

GUSE, B.; REUSSER, D. E.; FOHRER, N. How to improve the representation of hydrological processes in SWAT for a lowland catchment – temporal analysis of parameter sensitivity and model performance. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 2651-2670, 2014.

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 32, n. 2, p. 135-154, set. 1994.

HILL, M. C. **Methods and guidelines for effective model calibration**. Water-resources investigations report 98-4005. U.S. Geology Survey. Denver, 1998.

HUGGET, R. J. **Systems analysis in geography**. Oxford University Press, 1980. 218 p.

JAIN, S. K.; SUDHEER, K. P. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 10, p. 981-986, out. 2008.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v. 83, p. 55-66, 1995.

JHA, M. **Hydrologic simulations of the Maquoketa river watershed using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, 2009.

JHA, M. K. Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. **Water**, v. 3, p. 604-617, 2011.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 3-4, p. 456-466, jan. 2007.

KOCH, S.; BAUWE, A.; LENNARTZ, B. Application of the SWAT model for a tile-drained lowland catchment in north-eastern Germany on sub-basin scale. **Water Resources Management**, v. 27, p. 791-805, 2013.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89-97, 2005.

KUSHWAHA, A.; JAIN, M. K. Hydrological simulation in a forest dominated watershed in Himalayan region using SWAT model. **Water Resources Management**, v. 27, n. 8, p. 3005-3023, jun. 2013.

KUWAJIMA, J. I. Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP). 2012. 158 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos. 2012.

LE MOINE, N.; ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C. "Outlier" catchments: what can we learn from them in terms of prediction uncertainty in rainfall-runoff modelling? **IAHS PUBLICATION**, v. 313, p. 195-203, jul. 2007.

LEE, C. **Models in planning: an introduction to the use of quantitative models in planning**. Oxford: Pergamon Press, 1973. 154 p.

LEE, D.; KIM, N.; CHUNG, I. Comparison of runoff responses between SWAT and sequentially coupled SWAT-MODFLOW. IN: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE, 3., Zurich, 2005.

LEE, S.; HWANG, S.; LEE, S.; HWANG, H.; SUNG, H. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 2, p. 80-89, set. 2009.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 623-634, mar./abr. 2012.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, p. 645-654, 2002.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 2. ed., 1996, 301 p.

LOPES, N. H. Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. 2008. 164 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

- LU, Z.; ZOU, S.; QIN, Z.; YANG, Y.; XIAO, H.; WEI, Y.; ZHANG, K.; XIE, J. Hydrologic responses to land use change in the Loess Plateau: case study in the Upper Fenhe River Watershed. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1-10, 2015.
- LUBTZ, E. Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. 2009. 125 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau. 2009.
- MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 166 p. Tese (Doutorado – Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo. 2002.
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 27, p. 727-733, 2003.
- MACKAY, D. **Multimedia Environmental Models**. 2. ed. New York: CRC Press, 2001. 257 p.
- MADSEN, H. Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. **Journal of Hydrology**, v. 235, p. 276-288, 2000.
- MALLETA, B. V. Modelos de simulação de Monte Carlo: soluções para cálculo do value-at-risk. 2005. 71 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.
- MALLUTA, S. Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio Negrinho – SC com o modelo SWAT. 2012. 129 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.
- MAMO, K. H. M.; JAIN, M. K. Runoff and sediment modeling using SWAT in Gumera catchment, Ethiopia. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 3, p. 196-205, 2013.
- MARCON, I. R. Modelagem e cenários hidrológicos em bacia representativa da Mata Atlântica no sul do Brasil. 2013. 89 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. 2013.
- MAREK, G. W.; GOWDA, P. H.; EVETT, S. R.; BAUMHARDT, R. L.; BRAUER, D. K.; HOWELL, T. A.; MAREK, T. H.; SRINIVASAN, R. Estimating evapotranspiration for dryland cropping systems in the semiarid Texas high plains using SWAT. **Transactions of the ASABE**, v. 59, n. 2, p. 611-622, 2016.
- MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G. Evaluation of Nash-Sutcliffe Efficiency Index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, p. 597-602, nov./dez. 2006.
- ME, W.; ABELL, J. M.; HAMILTON, D. P. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 4127-4147, 2015.
- MENEZES, P. H. B. J. Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do lago Paranoá. 2010. 133 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília. 2010.
- MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, R. P.; FARIAS, M. S.; BELLO, I. P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da

água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 519-534, jul./set. 2016.

MONTEIRO, J. A. F.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 1419-1430, 2016.

MOREIRA, L. L. Análise de sensibilidade de parâmetros e de desempenho do modelo Soil And Water Assessment Tools (SWAT) na estimativa de vazões médias em bacias hidrográficas. 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VASQUES-AMÁBILE, G. G.; ENGEL, B. A. Shallow water table depth algorithm in SWAT: recent developments. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1705-1711, 2011.

MORIASI, D. N.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; TOMER, M. D. Evaluation of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) with the new tile drain equations. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 67, n. 6, p. 513-524, nov./dez. 2012.

MORO, M. A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos. 2005. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo. 2005.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models – Part I – a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NDOMBA, P.; MTALO, F.; KILLINGTVEIT, A. SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 33, p. 626-632, 2008.

NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J. M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **Transactions of the ASABE**, v. 33, n. 3, p. 839-849, 1990.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2009**. Texas Water Resources Technical Report n. 406. 2009.

NETO, J. O. M. Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT. 2013. 150 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras. 2013.

NOSENT, J.; ELSSEN, P.; BAUWENS, W. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, p. 1515-1525, 2011.

NYEKO, M. Hydrologic modelling of data scarce basin with SWAT model: capabilities and limitations. **Water Resources Management**, v. 29, p. 81-94, 2015.

OLIVEIRA, F. C.; SOARES-FILHO, B. S.; FARIA, S. D. Calibração de modelos ambientais a partir de meta-modelos baseados em classificadores. In: WORKSHOP

DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS, 1., Bento Gonçalves, 2009.

OLIVEIRA, L. T. Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES. 2014. 162 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2014.

OLIVEIRA, G. P. C. Modelagem hidrológica apoiada por sistemas de informações geográficas. 2015. 86 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais. 2015.

PENG, G.; LESLIE, L. M.; SHAO, Y. Environmental modelling and prediction. 1 ed. Heidelberg: Springer, 2002. 486 p.

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

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; ALMEIRA, A. Q.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ZONTA, J. H. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in southeast Brazil. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 34, n. 4, p. 789-799, jul./ago. 2014.

PIMENTEL, L. **Hidrologia: engenharia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 414 p.

PINIEWSKI, M.; OKRUSZKO, T. Multi-site calibration and validation of the hydrological component of SWAT in a large lowland catchment. In: **Modelling of hydrological processes in the Narew catchment**. Berlin: Springer-Verlag, 2011. p. 15-41.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: **Conceitos de Bacia Hidrográfica: Teorias e Aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002. p. 17-36.

PORTO, M. F. A. Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. p. 387-426.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte.

RITTER, A.; MUÑOZ-CARPENA, R. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 33-45, 2013.

ROCHA, E. O. Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT. 2013. 80 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. 2013.

ROSTAMIAN, R.; JALEH, A.; AFYUNI, M.; MOUSAVI, S. F.; HEIDARPOUR, M.; JALALIAN, A.; ABBASPOUR, K. C. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 5, p. 977-988, out. 2008.

- ROVEDA, S. M. M.; FRACETO, L. F.; ROVEDA, J. A. F. Modelagem Ambiental. In: **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Porto Alegre: Artmed, 2012. p. 177-197.
- SAHA, P. P.; ZELEKE, K.; HAFEEZ, M. Streamflow modeling in a fluctuant climate using SWAT: Yass River catchment in south eastern Australia. **Environmental Earth Science**, v. 71, p. 5241-5254, 2014.
- SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 1-19, set./dez. 2009.
- SANTOS, D. A. R.; MORAIS, F. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 3, n. 4, p. 617-629, 2012.
- SCHMALZ B.; TAVARES, F.; FOHRER, N. Modelling hydrological processes in mesoscale lowland river basins with SWAT - capabilities and challenges. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 5, p. 989-1000, out. 2008.
- SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. **Advances in Geosciences**, v. 21, p. 91-98. 2009.
- SCHULTZ, G. B.; SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos na bacia do Altíssimo rio Negro com o modelo SWAT. IN: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 9., Brasília, 2010.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; MELESSE, A. M.; DARGAHI, B. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana basin, Ethiopia. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 3, p. 357-367, 2010.
- SHEN, Z. Y.; CHEN, L.; CHEN, T. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 121–132, 2012.
- SHOEMAKER, L.; DAI, T.; KOENIG, J. **TMDL Model Evaluation and Research Needs**. USEPA (EPA Report 600/R-05/149). Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. 2005.
- SILVA, V. A.; MOREAU, M. S.; MOREAU, A. M. S. S.; REGO, N. A. C. Uso da terra e perda de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Colônia, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 310-315, 2011.
- SILVA, B. F. Análise dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia-GO. 2015. 134 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, 2015.
- SILVA, M. G.; NETTO, A. O. A.; NEVES, R. J. J.; VASCO, A. N.; ALMEIDA, C.; FACCIOLI, G. G. Sensitivity analysis and calibration of hydrological modeling of the watershed northeast Brazil. **Journal of Environmental Protection**, v. 6, p. 837-850, ago. 2015a
- SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; SOUZA, E. P.; ARAUJO, A. L. Aplicação do modelo SWAT na estimativa da vazão na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1615-1627, 2015b.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; MEDEIROS, I. C.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Efeitos de cenários de uso do solo na vazão e produção de sedimentos na bacia do rio Cobres, Portugal. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n.4, p. 609-622, 2016.

SOOD, A.; RITTER, W. F. Evaluation of best management practices in Millsboro Pond watershed using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 2, p. 403-412, 2010.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 74-81, jan./fev. 2009.

SUN, H.; CORNISH, P. S. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 795-807, 2005.

SUN, W.; WANG, Y.; WANG, G.; CUI, X.; YU, J.; ZUO, D.; XU, Z. Physically based distributed hydrological model calibration based on a short period of streamflow data: case studies in four Chinese basins. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 251-265, 2017.

SWAT – Soil and water assessment tool. SWAT Input/Output file documentation. Capítulo 3. Versão 2012. Disponível em <http://swat.tamu.edu/media/69308/ch03_input_cio.pdf>. Acessado em 2 de junho de 2017.

TENÓRIO, B.; SEIXAS, A. Delimitação e reconstrução tridimensional de bacias hidrográficas a partir de curvas de nível – atividade prática da disciplina de topografia. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., Recife, 2008.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, Araraquara, n. 20, p. 137-157, 2007.

TESCH, F. Avaliação da calibração do modelo *Soil and Water Assessment Tool* para a simulação de estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas. 2015. 123 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TONG, S. T. Y.; CHEN, W. Modeling the relationship between land use and surface water quality. **Journal of Environmental Management**, v. 66, p. 377-393, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2005. 678p.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Ministério do Meio Ambiente/SQA, Brasília, 2006. 302 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2015. 943 p.

- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.
- TURNER, R. E.; N. N. RABALAIS. Linking landscape and water quality in the Mississippi river for 200 years. **BioScience**, v. 53, n. 6, p. 563-572, jun. 2003.
- UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil And Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009. 144 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.
- VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Multiojective autocalibration for semidistributed water quality models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, p. 1348-1356, 2003.
- VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 4, p. 10-23, 2006.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSH, D. D.; ARNORLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, mar. 2007.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245p.
- VON SPERLING, M. Análise da incerteza em estudos ambientais. Aplicações na modelagem da qualidade de água de rios. **Bio Engenharia Sanitária e Ambiental**. Encarte Técnico, Ano II, n. 1, p. 2-10, 1993.
- VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade de rios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 592 p.
- WANG, X. Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. **Journal of Environmental Management**, v. 61, p. 25–36, 2001.
- WHITE, I. D.; MOTTERSHEAD, D. N.; HARRISON, S. J. **Environmental systems: an introductory text**. Psychology Press, 1998. 616 p.
- WU, Y.; CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorous loads in the Dongjiang river basin in south China using SWAT. **Frontiers of Earth Science**, v. 3, n. 3, p. 273-278, 2009.
- WU, H.; CHEN, B. Evaluation uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods. **Ecological Engineering**, v. 76, p. 110-121, 2015.
- XU, C. **Hydrological Models**. Uppsala University – Department of Earth Sciences Hydrology. 2002.
- YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1-2, p. 1-23, ago. 2008.
- YU, S.; XU, Z.; WU, W.; ZUO, D. Effect of a land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 202-212, 2016.

ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, V. P. S.; SOUSA, E. F.; SILVA, J. M. A.; ALMEIDA, F. T. Análise de sensibilidade do modelo hidrobacia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., Canoas, 2005.

ZHANG, X.; SRINAVASAN, R.; HAO, F. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT model. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 901-910, 2007.

ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; JAMES, A. Moving SWAT model calibration and uncertainty analysis to an enterprise Hadoop-based cloud. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p. 140-148, out. 2016.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Gráficos da Análise de Sensibilidade *one-at-a-time* (SWAT-CUP) para a variável vazão.

