



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**TAMÍRES PARTÉLLI CORREIA**

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE  
USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JUCU**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2016

TAMÍRES PARTÉLLI CORREIA

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE  
USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JUCU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Sidney Sara Zanetti  
Coorientador: Roberto Avelino Cecílio

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2016




**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DO  
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESPÍRITO  
SANTO**

TAMIRES PARTÉLLI CORREIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2016.



---

**Prof. Dr. Marco Aurélio Costa Caiado**  
IFES  
Examinador Externo



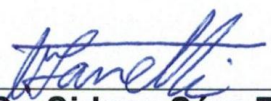
---

**Dr. Marcos Franklin Sossai**  
IEMA  
Examinador Externo



---

**Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio**  
UFES  
Coorientador



---

**Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti**  
UFES  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, pelo incentivo diário para o término dessa etapa, e por me apoiarem sempre e suportarem a ausência nos momentos difíceis da família;

Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL) da UFES, pelo aprendizado, desenvolvimento e amizade;

Ao meu orientador Sidney S. Zanetti e coorientador Roberto A. Cecílio, pela paciência, compreensão, discernimento e ensinamentos;

Ao Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra (UFRRJ), pelo incentivo para o ingresso na Pós Graduação e amizade;

Aos amigos do Programa (PPGCFL) e do Departamento, pelos momentos de descontração, força e apoio no mestrado;

Aos amigos do Lab. de Modelagem Hidrológica, por serem grandes parceiros de trabalhos, encontros, cafés, motivo de sorrisos e amparo nas horas de angústias;

Aos grandes amigos que contribuíram para realização deste trabalho: Carlos, Evandro, Helder, Giovanni, Laís, Elvis, Rosane, Natália, Stefânia, Marks, Andressa, Denise e Mari, por mais singelo que tenha sido cada gesto, sem vocês não teria conseguido concretizar a dissertação!

Aos meus amigos conquistados durante a graduação, em especial: Raíza, Andre, Úrsula, Oclízio, Carla, Ana Amélia, Renato, Camila, San, Lucas, Estela, Larissa, Sashia e Renata; e todos da turma 2009-I (UFRRJ). Aos demais amigos Ruralinos, e aqueles que participaram da ABEEF (Associação Brasileira dos Estudantes de Engenharia Florestal), que não se mantiveram distantes, e sempre acreditaram no meu potencial!

Em especial a Sara Ferrigo e ao Prof. Dr. Ricardo Minoti, pela oportunidade de participar do curso “Introdução à modelagem hidrológica”, oferecido Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/ENC/FT/UnB) e pelo Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas (Instituto de Geociências/UnB). O contato com vocês foi fundamental para ter iniciado este trabalho!

A FAPES pela concessão da bolsa de incentivo ao estudo;

A todos que, de alguma forma, contribuíram na realização deste trabalho!

*“Nunca o homem inventará nada mais simples nem mais belo do que uma manifestação da natureza. Dada a causa, a natureza produz o efeito no modo mais breve em que pode ser produzido.”*

*(Leonardo da Vinci)*

## RESUMO

CORREIA, Tamíres Partélli. **Aplicação do modelo SWAT para simulação de cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Jucu**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES. Orientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti. Coorientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

A bacia hidrográfica do rio Jucu, juntamente com a bacia do rio Santa Maria da Vitória, são responsáveis por 50% do abastecimento de água no estado do Espírito Santo, e pela produção de 11% da energia elétrica do estado, e abrigam remanescentes florestais importantes para a preservação da biodiversidade. Devido à importância dessa área para conservação e manutenção dos mananciais, faz-se necessário o uso de ferramentas que visam a otimização dos usos da terra e entendimento do comportamento da dinâmica da água na bacia hidrográfica. Entre as técnicas utilizadas para representar os processos hidrológicos, destaca-se a modelagem. Dentre os diversos modelos hidrológicos, ressalta-se o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), um modelo físico e semi-distribuído. O presente estudo teve como objetivo principal simular cenários do uso e ocupação da terra, utilizando o modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu, localizada no estado do Espírito Santo. Foram definidos 6 cenários para avaliar a vazão mínima, média e máxima, sendo eles: com 20% de área de floresta nativa na bacia (F20) (cenário 1); cenário 2: com 36% de área de floresta nativa na bacia (uso da terra atual) (F36); cenário 3: com 50% de área de floresta nativa na bacia (F50); cenário 4: com 100% de área de floresta nativa na bacia (F100); cenário 5: com 100% da área da bacia ocupada com cultivo de eucalipto (E100); cenário 6: com 100% da área da bacia ocupada com pastagens (P100). O modelo foi calibrado e validado para a escala diária e mensal, utilizando índices estatísticos: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado, coeficiente de determinação e o índice PBIAS, que indicaram o desempenho satisfatório nas fases calibração e validação do modelo. Todos os cenários comprovaram a sensibilidade do modelo às alterações de uso da terra na bacia. Para o estudo das vazões mínimas de referência ( $Q_{7,10}$  e  $Q_{90}$ ), que diz respeito a disponibilidade de água na bacia hidrográfica, os maiores valores foram encontrados para os cenários 4 (F100), 3 (F50), 5 (E100), 2 (F36), 1 (F20) e 6 (P100), respectivamente, em ordem decrescente. O estudo das vazões mínimas é de extrema importância para avaliar

como as florestas são importantes para manter a água dentro do sistema, principalmente nos períodos secos. Já para as vazões máximas (vazões de enchentes), os maiores valores ocorreram nos cenários 6 (P100), 5 (E100), 1 (F20), 2 (F36), 3 (F50) e 4 (F100), respectivamente, também em ordem decrescente. Em relação ao cenário atual (F36), observou-se que houve aumento na vazão média nos cenários 6 (P100) e 1 (F20), e decréscimo da vazão média nos cenários 4 (F100), 3 (F50) e 5 (E100). O estudo permitiu mostrar a importância das florestas para manter uma maior regularidade dos cursos de água, associado com maiores vazões mínimas e menores vazões máximas em cenários com mais floresta, tendo ficado evidente que somente a avaliação da vazão média não é suficiente para análise do comportamento hídrico na bacia.

**Palavras-chave:** rio Jucu, modelagem hidrológica, SWAT.



## ABSTRACT

The Jucu river watershed, along with the Santa Maria da Vitoria river basin are responsible by 50% of the water supply in the Espírito Santo state, and the production of 11% of the electricity in the state. The Jucu river watershed has important remaining forests for biodiversity preservation. Due to the importance of this area for the conservation and maintenance of water sources, it is necessary to use tools that aiming the optimizing of land use and understanding of behavior of the water dynamics in the watershed. Among the techniques used to represent the hydrological processes, stands out modeling. Among the several hydrological models, it emphasizes the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool), a physical model and semi-distributed. This study had the main goal to simulate scenarios of use and occupation of land, using the SWAT model in the Jucu river watershed, located in the Espírito Santo state. Were defined 6 scenarios to evaluate the minimum, average and maximum flow, as follows: 20% of native forest area in the basin (F20) (scenario 1); scenario 2: 36% of native forest area in the basin (current use of land) (F36); scenario 3: 50% of native forest area in the basin (F50); scenario 4: 100% of native forest area in the basin (F100); scenario 5: 100% of the basin area occupied with eucalyptus cultivation (E100); scenario 6: 100% of the basin area occupied by pastures (P100). The model was calibrated and validated for daily and monthly scale, with statistical indices: Nash efficiency coefficient and Sutcliffe, Nash efficiency coefficient and modified Sutcliffe, determination coefficient and PBIAS index, which showed satisfactory performance in the calibration and validation phase of the model. All the scenarios demonstrated a sensitivity of the model to land use changes in the basin. For the study of minimum reference flows ( $Q_{7,10}$  and  $Q_{90}$ ), the highest values were found for the scenarios 4 (F100), 3 (F50) 5 (E100), 2 (F36) 1 (F20) and 6 (P100), respectively, in descending order. The study of minimum flows is extremely important to assess how important the forests to keep the water within the system, especially in dry periods. In relation to the current scenario (F36), it was observed that there was an increase in the average flow in the scenarios 6 (P100) and 1 (F20), and decrease of the average flow in the scenarios 4 (F100), 3 (F50) and 5 (E100). Regarding maximum flows, the highest values occurred in the scenarios 6 (P100), 5 (E100), 1 (F20), 2 (F36) 3 (F50) and 4 (F100),

respectively, also in descending order. The study allowed to show the importance of the forests to maintain a higher water courses regularity, associated with higher minimum flows and lower maximum flows in scenarios with more forest, having become evident that only the assessment of the average flow is not sufficient for the analysis of water behavior in the basin.

**Keywords:** Jucu river, hydrological modeling, SWAT.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	OBJETIVO GERAL.....	12
3.	REVISÃO DE LITERATURA .....	13
	3.1 Modelos hidrológicos.....	13
	3.2 O modelo SWAT .....	16
	3.3 Sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT.....	20
	3.4 Influência do uso da terra nas vazões de cursos d'água.....	22
4.	MATERIAL E MÉTODOS .....	25
	4.1 Área em estudo .....	25
	4.2 Edição do banco de dados do SWAT .....	26
	4.2.1 Modelo Digital de Elevação .....	28
	4.2.2 Dados de uso da terra .....	29
	4.2.3 Dados de solos .....	30
	4.2.4 Dados meteorológicos e de vazão.....	34
	4.3 Aplicação do SWAT .....	35
	4.3.1 Etapa de simulação do modelo: SWAT Simulation.....	36
	4.3.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação .....	36
	4.4 Análise estatística do desempenho do modelo hidrológico .....	40
	4.5 Simulação de cenários .....	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
	5.1 Análise pré-calibração.....	44
	5.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação .....	49
	5.3 Validação do modelo.....	62
	5.4 Simulação de cenários.....	68
6.	CONCLUSÃO.....	76
7.	REFERÊNCIAS.....	77

## 1.INTRODUÇÃO

A disponibilidade dos recursos hídricos em quantidade e qualidade tem uma grande importância sob os aspectos de abastecimento humano, equilíbrio ambiental e desenvolvimento econômico. Com isso, a dinâmica das vazões e o conhecimento dos fatores que afetam seu comportamento no tempo e no espaço são temas de estudo de fundamental importância para o planejamento ambiental e gestão sustentável da água em bacias hidrográficas (SOUZA; SANTOS, 2013; YANG et al., 2012).

O uso e manejo inadequados da terra, rápido crescimento populacional, a expansão dos núcleos urbanos e industriais, a degradação dos recursos naturais e a escassez da água trazem consequências e prejuízos ambientais, econômicos e sociais, sendo necessário o conhecimento dos efeitos da variação do uso da terra sobre a disponibilidade da água em bacias hidrográficas (BLAINSKI et al., 2011; PISINARAS et al., 2010).

A lei federal nº 9.433/1997 instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos, tendo como objetivos a utilização racional dos recursos hídricos, prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos e seguridade à atual e futuras gerações sobre a disponibilidade de água, em padrões de qualidade e quantidade adequados. A bacia hidrográfica é adotada como unidade de planejamento, política e gestão dos recursos hídricos, para manutenção da qualidade da vida humana, da biodiversidade da fauna e flora, bem como do desenvolvimento das atividades econômicas (PERAZZOLI et al., 2013; PEREIRA et al., 2013).

Na gestão dos recursos hídricos, a modelagem hidrológica constitui uma importante ferramenta, pois possibilita entender como funciona a dinâmica da água, além de prever os impactos das alterações no uso da terra sobre a disponibilidade hídrica, auxiliando, desta forma, no planejamento de uso destes recursos (ARNOLD et al., 2012; FAN; SHIBATA, 2015; WANGPIMOOL et al., 2013; BECKERS, 2009; GRUMBACH; MARCIAL 2008; LIRONG; JIANYUN, 2012). Dentre os diversos modelos hidrológicos existentes, destaca-se o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD et al., 2012), o qual é de domínio público, capaz de diagnosticar o impacto das práticas de gestão da terra em bacias hidrográficas, com diferentes tipos de uso (BONUMÁ et al., 2015). Já passam de 1000 os trabalhos realizados no

mundo, utilizando a ferramenta SWAT para diferentes aplicações (JOSEPH; GUILLAUME, 2013).

No estado do Espírito Santo, a bacia do rio Jucu é uma das mais importantes, pois corresponde a 2.220 km<sup>2</sup> (4, 81% da área do estado). Junto com a bacia do rio Santa Maria da Vitória, a bacia do rio Jucu comportam cerca de 50% da população do estado e fornece grande parte da água para a região metropolitana da Grande Vitória, além de gerar parte da energia hidroelétrica da região. As diversas atividades realizadas nos municípios que constituem as bacias representam 62% do PIB de todo o estado (SOPRONI et al., 2007).

Devido à isso, o estado tem incentivado a elaboração de projetos, dos quais destaca-se o projeto do IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), intitulado “Florestas para Vida” - FPV, que visa à conservação e recuperação do bioma Mata Atlântica no estado, em que a fase piloto do projeto será implantada nas bacias do Jucu e de Santa Maria da Vitória.

Esse estudo possibilita a identificação de uma ferramenta robusta (SWAT) que fornece suporte para o gerenciamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Jucu, com um estudo hidrológico associado com a vegetação, por meio da simulação de cenários.

## **2.OBJETIVO GERAL**

O presente estudo tem como finalidade calibrar e validar o modelo SWAT, e verificar o efeito de alterações do uso da terra no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Jucu.

### 3.REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Modelos hidrológicos

A modelagem hidrológica é uma ferramenta necessária para entender o comportamento dos processos hídricos dentro de uma bacia hidrográfica e para estimar o balanço hídrico (ZANETTI et al., 2009). Os modelos podem apoiar decisões sobre diferentes estratégias de manejo e mudança de uso da terra, indicar efeitos de alterações climáticas, alocação de água e controle da poluição (ABBASPOUR, 2007). Os eventos naturais são dependentes de um grande número de fatores; quanto mais complexo se torna o sistema e os fenômenos, maior a necessidade de prever eventos e maior ainda é a utilidade dos modelos matemáticos (TUCCI, 2005).

Os modelos matemáticos começaram a ganhar magnitude depois da segunda guerra mundial, quando houve uma grande demanda de projetos com necessidade de quantificar os componentes hidrológicos (escoamento, infiltração, precipitação e outros), para dimensionamento de obras hidráulicas, como barragens, redes de drenagem, diques e reservatórios. Na década de 80, já com o alarme de escassez dos recursos naturais, preocupação ambiental, rápido crescimento populacional e desenvolvimento industrial a todo vapor, houve necessidade de aprimorar ferramentas que permitissem análises mais exatas do sistema hídrico e pudessem também subsidiar tomadas de decisão (ARRIAGA et al., 2013; MACHADO; VETTORAZZI, 2003).

Os modelos foram aprimorados para sanar perguntas sobre: o efeito do desmatamento na produção de água, na erosão e no escoamento superficial; a qualidade da água e a produção de sedimentos, com o efeito da urbanização e da agricultura; e o clima de uma região, com as alterações da superfície da terra. O entendimento dessas questões, juntamente com as respostas bem embasadas são fundamentais para um bom planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, para assegurar uma forma de uso dos recursos naturais que seja sustentável para futuras gerações (ZANETTI et al., 2009).

Para Barth et al. (1987), um modelo é a organização de um sistema natural, expresso por meio de equações matemáticas, para a obtenção de resultados de diferentes ocorrências para um ou mais sistemas. Maidment (1993) simplifica ainda mais o conceito de modelos aplicado à hidrologia: representação matemática do fluxo de água e seus componentes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo. Para Paim (2012), o modelo é fundamental para entender e representar o comportamento hidrológico em uma bacia e propor condições diferentes daquelas vistas na realidade.

Para Tucci (2005), um modelo é a simplificação e tradução de um sistema para uma linguagem simples, buscando diferentes repostas a partir de diferentes entradas. Os modelos podem ser classificados como:

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

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

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

- Conceitual ou empírico: neste, os dados simulados são ajustados aos dados observados, desprezando-se os processos físicos envolvidos; já naquele, parte-se da fundamentação, considerando os processos físicos.

Pinto (2011) destaca a importância do processo de modelagem para simulação de cenários. Como exemplo, cita a possibilidade de simulação de cenários para diferentes tipos de manejos e práticas conservacionistas, de maneira bem rápida, para avaliar a qualidade e quantidade da água no sistema.



Existem diversos tipos de modelos: os que envolvem somente um processo; mais de um processo, formando um complexo com muitas variáveis; modelos adequados para microbacias; ou os modelos mais apropriados para grandes bacias. A decisão sobre qual modelo deve ser utilizado envolve vários fatores, indo desde a facilidade do usuário com o modelo, até a disponibilidade de dados, além da proposta do projeto.

O processo de modelagem envolve uma série de etapas, que comprados com experimentos práticos, necessita de muito menos investimentos. O primeiro processo é transformar os modelos matemáticos em computacionais e traduzir para uma interface amigável (nem todos os desenvolvedores se preocupam com uma interface mais interativa); a segunda etapa é a obtenção de dados para alimentar o modelo e o preenchimento de falhas dos dados. Se o modelo for distribuído, como lembra Mendes e Cirilo (2001), é necessário um grande número de variáveis de entrada, e o ajuste e validação desses modelos são mais complexos. A próxima etapa é o conhecimento do comportamento do modelo frente aos dados de entrada e, em seguida, a redução das incertezas do modelo. Um dos grandes empecilhos da modelagem é a escassez de dados para entrada no modelo.

A maior parte das aplicações com modelos hidrológicos no Brasil está ainda interessada na eficiência do modelo para representar as bacias hidrográficas satisfatoriamente, visto que os modelos hidrológicos mais utilizados não foram desenvolvidos para as condições brasileiras (BRESSIANI et al., 2015).

De acordo com Viessman Júnior e Lewis (2002), as principais etapas da modelagem incluem: o objetivo do estudo; disponibilidade e acurácia dos dados; recursos para execução do projeto; escolha do modelo, baseado nos tipos de modelos disponíveis; preparação dos dados; identificação do bom funcionamento do modelo, de acordo com o esperado; análise de sensibilidade e seleção dos parâmetros mais sensíveis do modelo; calibração e ajuste dos parâmetros; verificação do modelo, para avaliar a calibração; e confecção de relatórios, documentação de acordo com a especificação do trabalho.

De acordo com Fukunaga (2012), Zanetti (2007), Ferrigo (2012) e Oliveira (2014a), existem muitos tipos de modelos disponíveis na literatura, tais como: DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model); SWAT (Soil and Water Assessment Tool); WEPP (Water Erosion Prediction Project); VIC (Variable Infiltration Capacity); TOPMODEL; SHE (System Hydrologic Europe); HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center' Hydrologic Modeling System); ANSWERS (Areal

Non-point Source Watershed Response Simulation); CASC2D (Cascade Two-Dimensions); Hidrobacia; AGNPA (agricultural Non-Point Source Pollution Model); KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model); QUAL2E; EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator); SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins; CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System); GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems); SWMM (Storm Water Management Model); MIKE SHE (European Hydrological System Model); HBV-EC (Hydrologis kaBryåns Vatten balans avdelning-Environment Canada); HELP (Hydraulic Evaluation of Landfill Performance); (HSPF) Hydrologic Simulation Program-Fortran; InHM (Hydro Geo Sphere; Integrated Hydrology Model); MIKE-SHE; MODHMS; PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model); UBC-UF (Peak Flow Model); UBCWMM (University of British Columbia Watershed Model); WaSiM-ETH (Wasserhaushalts-Simulations-Model); Water Balance Model for BC (based on QUALHYMO model); WATFLOOD.

### 3.2 O modelo SWAT

O modelo SWAT teve origem a partir do modelo SWRRB, que tinha como principal objetivo a avaliação da qualidade da água. O SWRRB possui algumas limitações; por exemplo, número máximo de 10 sub-bacias delimitadas, utilizado somente para bacias médias ou pequenas e o transporte de água e sedimentos seguia diretamente para a descarga da bacia. Esses entraves foram superados com o desenvolvimento de outro modelo, o ROUTO (Routing Outputs Outled), que assumiu os resultados das análises do SWRRB e traçou caminhos do fluxo de vazão para canais e reservatórios. Porém, o SWRRB e o ROUTO eram programas independentes, dificultando o processamento, e necessitavam de muito espaço de armazenamento para as saídas dos modelos no computador. Por esses e outros motivos, os dois modelos foram fundidos em um único, o SWAT, no início da década de 90 (NEITSH, 2011). Atualmente, o SWAT encontra-se em sua oitava versão - SWAT (2012).

O SWAT é utilizado para dados distribuídos sobre topografia, solo, cobertura e gestão do uso do solo, dinâmica da água, sedimentos, nutrientes, pesticidas e bactérias fecais. Atualmente, a bacia hidrográfica modelada é dividida espacialmente em sub-bacias, utilizando dados do Modelo Digital de Elevação (MDE), de acordo com a densidade especificada para cada uso da terra, declividade e tipo de solo. As novas sub-bacias formadas são subdivididas em HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica), com características similares de cobertura da terra, tipo de solo e topografia (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2005, 2011).

A partir de 2005, a declividade foi incluída para gerar as HRU's, além de incluídas as opções de reservatórios e delimitação dos rios da bacia. Essas modificações foram importantes para simular: o escoamento e processos de erosão; o movimento da água no solo; a evapotranspiração; o crescimento e a produtividade das plantas; os nutrientes do solo e a ciclagem de carbono; os pesticidas e as bactérias; a degradação e o transporte para cada HRU e sub-bacia. O SWAT simula uma grande variedade de estruturas e práticas agrícolas, incluindo preparo do solo, adubação e aplicação de adubos orgânicos, subsuperfície de drenagem, irrigação, lagoas e pântanos.

O SWAT é um modelo gratuito com uma documentação extensiva e redes de contatos estruturadas, disponível no website <http://swatmodel.tamu.edu>. No site também são disponibilizados todos os manuais e fundamentação teórica que descreve todas as equações, bem como as entradas e saídas do modelo (NEITSCH et al., 2011). Em 15 de abril de 2013, foi lançada a última atualização do SWAT, versão 2012, disponível até o momento.

Os arquivos de entrada para o SWAT são definidos em três diferentes níveis de detalhe: bacia hidrográfica, sub-bacia e HRU. O modelo divide a bacia hidrográfica em sub-bacias e depois em HRU, que representam a discretização de porções de áreas das sub-bacias com a mesma classe de solo, além de um tipo de uso e manejo da terra (NEITSCH et al., 2005).

Características únicas como reservatórios ou fontes pontuais devem ter dados de entrada fornecidos pelo usuário para simulação de bacias hidrográficas (FERRIGO, 2012). O SWAT normalmente produz resultados diários para cada sub-bacia de saída. Esses são somados para fornecer resultados em escala mensal e anual.

O SWAT é um modelo bem versátil, que envolve vários componentes do ciclo hidrológico, e serve como ferramenta para subsidiar tomadas de decisão

(PANHALKAR, 2014; ULLRICH; VOLK, 2009). Uma extensa gama de diferentes tipos de análise pode ser realizada com o SWAT, incluindo as alterações climáticas e mudanças no uso da terra (cenários), melhores estratégias de irrigação e transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas (poluentes).

O modelo SWAT tem embasamento físico, necessitando de informações específicas sobre clima, solo, topografia, vegetação e uso da terra. Para qualquer aplicação do modelo SWAT, é importante uma quantificação consistente do balanço hídrico, pois ela é a força motriz de tudo o que ocorre na bacia hidrográfica. O ciclo hidrológico no SWAT pode ser dividido em duas principais seções. A primeira é a fase terrestre, que controla elementos do canal principal de cada sub-bacia, como água, nutrientes, sedimentos e pesticida (Figura 1). A segunda é a fase equivalente à de movimentação da água e sedimentos até a rede de canais da bacia hidrográfica, bem como sua descarga.

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

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (PREC_i - SURQ_i - ET_i - PERCO_i - BFi) \quad (1)$$

Em que:

$SW_t$  = conteúdo final de água no solo (mm);

$SW_0$  = conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm);

$t$  = tempo (dias);

$PREC_i$  = precipitação diária (mm);

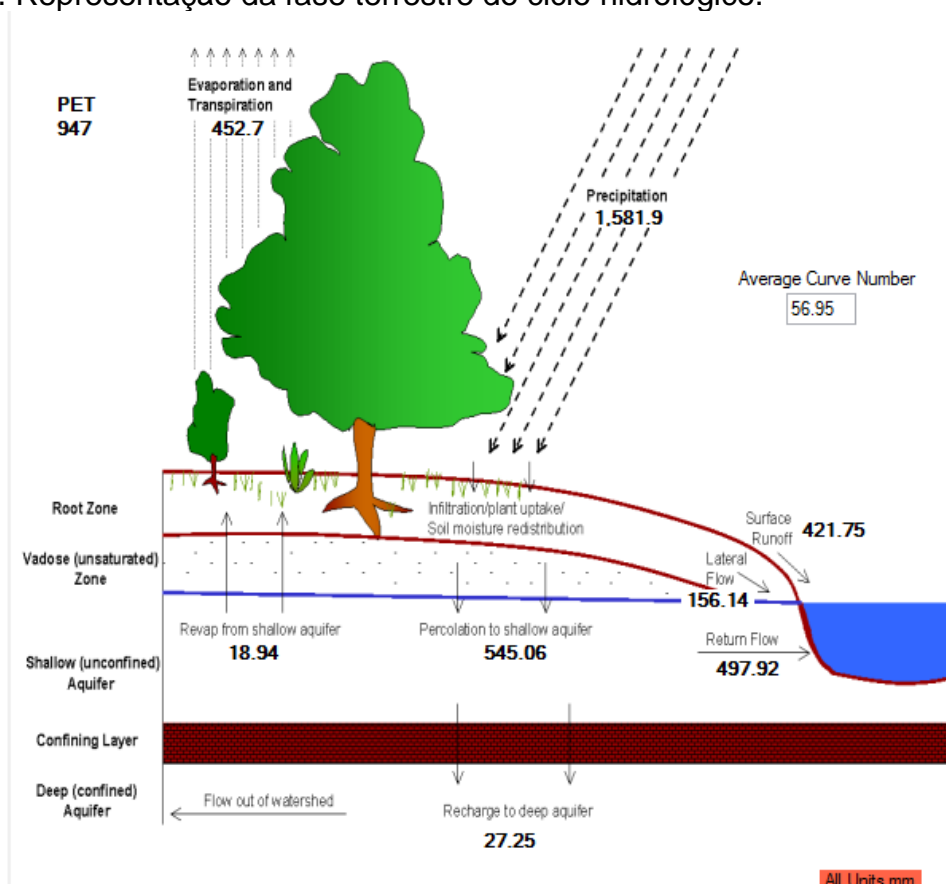
$SURQ_i$  = escoamento superficial diário (mm);

$ET_i$  = evapotranspiração diária (mm);

$PERCO_i$  = percolação diária (mm); e

$BF_i$  = fluxo de retorno diário, ou ascensão capilar (mm).

Figura 1. Representação da fase terrestre do ciclo hidrológico.



Fonte: ARNOLD et al. (2012), adaptado pela autora.

O balanço hídrico no SWAT é estimado em 4 volumes: superficial; subsuperficial; aquífero raso; e aquífero profundo. O SWAT subdivide o ciclo hidrológico em: interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento lateral, evapotranspiração e percolação (MELO; NETO, 2013).

O primeiro estudo do SWAT no Brasil foi realizado em 1999, e até 2010 já se registravam mais de 70 trabalhos com diferentes aplicações (GARBOSSA et al., 2011). Bressiani et al. (2015) identificaram mais de 100 estudos publicados entre 1999 e 2015, sobre a aplicação do SWAT nas bacias hidrográficas brasileiras, principalmente nas regiões sul e sudeste. Os autores constataram uma tendência crescente de aplicação do modelo para simulação de cenários e transporte de sedimentos. Como fator limitante ao estudo, esses pesquisadores indicaram a falta de acesso aos dados de entrada do modelo e a qualidade dos dados quando disponibilizados.

### 3.3 Sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT

Para um modelo ser bem robusto e adequado a qualquer finalidade, deve passar por um rigoroso processo de avaliação, que se dá basicamente em 3 etapas: (i) análise de sensibilidade, identifica a influência dos parâmetros com maior efeito sobre a saída do modelo; (ii) calibração, deve seguir um processo hierárquico com análise dos componentes hidrológicos, a fim de observar se a análise de sensibilidade e a função objetivo foram satisfatórias para um bom resultado entre os valores observados e simulados; e (iii) etapa de validação ou verificação do modelo, para provar a utilidade em prever condições futuras sobre mudanças climáticas, cenários de uso da terra ou de gestão (WHITE; CHAUBEY, 2005).

A análise de sensibilidade avalia o quanto os resultados do modelo são sensíveis às suas variáveis e parâmetros de entrada (MCCUEN; SNYDER, 1986). A análise de sensibilidade é feita antes do processo de calibração e verificação (validação), sendo uma etapa indispensável para o sucesso do modelo. As posições (ranking) dos parâmetros são determinadas por funções de erro de acordo com a saída do modelo (FLOW\_OUT, no arquivo output.rch) (VAN GRIENSVEN et al., 2006).

A calibração manual é um procedimento que altera os parâmetros de entrada, para que os valores simulados cheguem o mais próximo aos valores observados (MORIASI et al., 2007). No entanto, a calibração manual exige do usuário um alto conhecimento sobre o sistema e a estrutura do modelo, bem como sobre o comportamento real da bacia hidrográfica em estudo (SARMENTO, 2010).

Segundo Abbaspour (2007), o processo de calibração do modelo é uma tarefa extremamente complicada e que não conduz a uma única resposta. O SWAT é um modelo complexo com muitos parâmetros, o que complica a sua calibração de modo manual e até por algoritmos de auto-calibração.

Para Gupta et al. (1999), a função objetivo é muito importante na calibração automática dos dados, sendo a métrica utilizada pelo algoritmo de otimização, para determinar a qualidade da simulação hidrológica, pois ela mede a distância entre a saída dos modelos em relação aos valores observados.

Green e Van Griensven (2008) sugere como primeiro passo para a calibração do modelo, fazer a calibração manual dos parâmetros, até que os resultados da simulação sejam aceitáveis de acordo com os índices estatísticos (NSE,  $R^2$ , RSR e

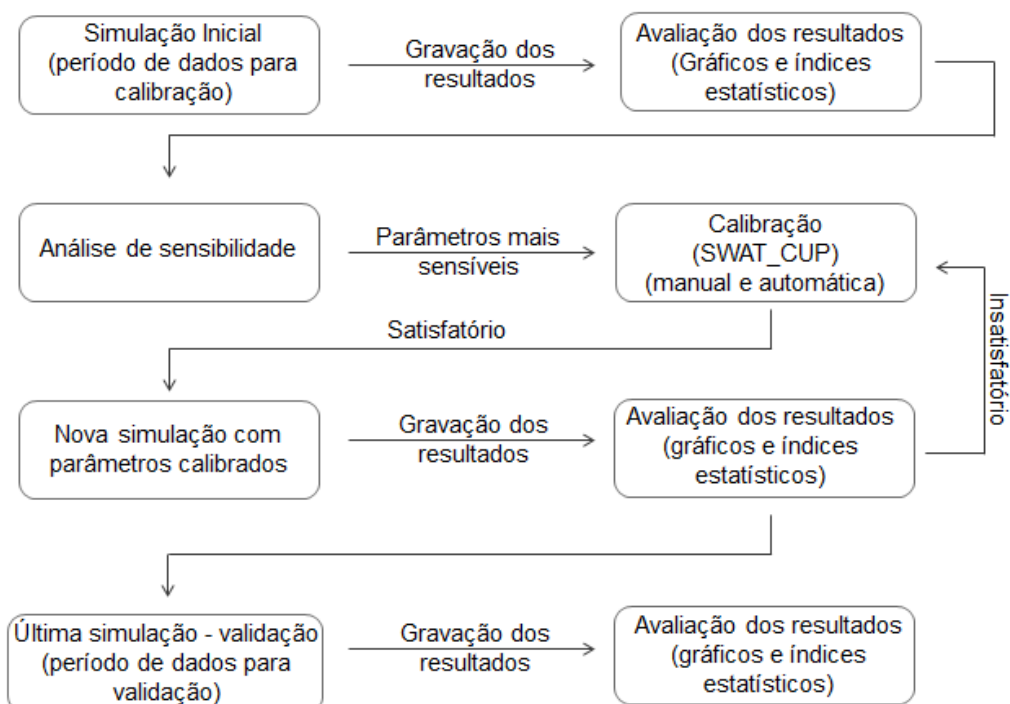
valores de PBIAS), para depois prosseguir com a calibração automática de ajuste mais fino do modelo. Segundo Lelis et al. (2012), devido à elevada variabilidade espacial dos processos simulados pelo SWAT, alguns parâmetros de entrada podem não ser bem conhecidos, fazendo com que a calibração seja um processo necessário para estimar esses valores ou reduzir sua incerteza, aumentando a confiabilidade dos resultados da modelagem.

Após a calibração, necessita-se da validação para verificar se o modelo está representando adequadamente, neste caso, a vazão da bacia para o período analisado, com a diminuição de incerteza do modelo, e melhor precisão (LETA et al., 2015; SANTOS; SOUZA, 2013). A Figura 3 mostra todas as etapas necessárias para a validação do modelo.

De acordo com Abbaspour et al. (2007), a partir da versão do SWAT 2012, a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza podem ser realizadas utilizando o software SWAT-CUP. Este oferece 5 opções de otimização: Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol), Sequential Uncertainty Fitting algorithm (SUFI-2), a Bayesian framework implemented usando Markov chain Monte Carlo (MCMC) e Particle Swarm Optimization (PSO).

Dessas opções, o SUFI-2 tem sido bastante utilizado para realizar análises de incertezas em trabalhos desenvolvidos com o SWAT. Essa função utiliza o princípio de modelagem inversa, ou seja, os dados observados para otimizar uma função objetivo com a finalidade de obter os melhores parâmetros (ABBASPOUR, 2015).

Figura 2. Processos da modelagem do SWAT.



Fonte: Fukunaga (2012), adaptado pela autora.

### 3.4 Influência do uso da terra nas vazões de cursos d'água

A previsão quantitativa dos impactos ambientais por conta do uso da terra e os cenários de mudanças climáticas de uma bacia hidrográfica podem servir de base para o desenvolvimento de sistemas de gestão de bacias hidrográficas. A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste em uma das principais ferramentas para a gestão dos recursos hídricos, pois potencialmente permite o diagnóstico de impactos hidrológicos decorrentes de alterações no uso da terra (FAN; SHIBATA, 2015; LELIS; CALIJURI, 2010).

O modelo SWAT foi utilizado por vários autores para a modelagem e simulação de cenários com o intuito de subsidiar o planejamento ambiental. A simulação de cenários é uma ferramenta muito flexível e confiável para a tomada de decisões, ainda mais pela urgência de tornar eficiente e racional o uso da água (LELIS et al., 2011; MACHADO et al., 2003; LIRONG; JIANYUN, 2012).



Silva et al. (2011) estimaram, na bacia hidrográfica do rio Colônia, sudeste da Bahia, a perda de solo pela sub-bacia, utilizando o modelo hidrológico SWAT e a dinâmica no uso da terra para o período entre 1975 e 2002; também simularam, para a mesma bacia, a perda de solo para dois cenários teóricos de preservação: cobertura da terra da bacia com 100% floresta e o outro cenário somente com a manutenção das áreas de preservação permanente (APP). Os autores constataram que as perdas de solos variaram, sendo menor para o cenário de APP na bacia, e menor ainda no cenário de mata, em comparação aos dados do uso atual nas datas mencionadas.

Pisinaras et al. (2010) aplicaram a SWAT no rio Kosynthos, na Grécia, para testar o efeito de várias mudanças de uso e manejo do solo em cenários de escoamento e de cargas de nutrientes. O estudo mostrou que o modelo SWAT, se devidamente calibrado, pode ser utilizado de maneira eficaz para testar cenários de gestão em bacias hidrográficas mediterrânicas.

Durães (2010) realizou a caracterização e classificação em termos de estresse hidrológico pelo uso de indicadores da bacia do rio Paraopeba-MG, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso da terra. O estresse hidrológico nesse estudo é entendido como o grau de alteração hidrológica causada por uma certa política de uso dos recursos hídricos. O autor também discute a importância da simulação de cenários para prever o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas e os impactos hidrológicos causados pelas alterações no uso da terra. As construções dos cenários abordaram: primeiro cenário, crescimento predito pelo plano diretor da bacia do rio Paraopeba, com o estresse hidrológico sendo estimado em Ponte Nova do Paraopeba e em Porto do Mesquita, para a situação atual e para os anos de 2014, 2019, 2024 e 2029; já o segundo cenário, construído com a cobertura original da bacia, no caso, a Mata Atlântica e o Cerrado. Os resultados das estatísticas, demonstraram que o modelo pode simular adequadamente os impactos hidrológicos causados por alterações no uso da terra na bacia do rio Paraopeba, e os resultados referentes ao estresse hidrológico dos cenários foram de grau baixo e médio (médio – a retirada de água iguala ou excede a vazão correspondente a  $Q_{7,10}$ ; baixo – sem perdas de retirada de água).

Machado et al. (2003) esclarecem sobre a grande relevância das ferramentas acopladas no modelo SWAT, as quais estão sendo aplicadas em diversos trabalhos acadêmicos e projetos de interesse público e privado, em diferentes escalas. O autor

destaca a simulação de cenários de preservação para subsidiar ações estratégicas e, ainda, salienta que o modelo atende a critérios condizentes às características físicas das divisões das sub-bacias, abrangendo todos os processos hidrológicos, como precipitação e escoamento superficial.

Lelis e Calijuri (2010) utilizaram a simulação de cenários e modelagem hidrossedimentológica de uma bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil por meio do SWAT. As autoras destacaram a elaboração de cenários como uma ótima forma econômica no levantamento das informações, podendo, por exemplo, identificar áreas críticas, ao se fornecerem indicativos para operações emergenciais de contenção em função da ação dos processos erosivos, além da identificação das zonas de maior sensibilidade à erosão em relação ao uso e tipo do solo. No trabalho, a simulação de cenários ambientais foi muito eficiente, permitindo a combinação de melhores técnicas de manejo e cobertura do solo. As áreas ocupadas por pastagens foram consideradas as de maior impacto ao ambiente, quando se analisa a produção de sedimentos. A partir da simulação de substituição de parte da cobertura de pastagens por eucalipto, houve redução da perda de solo na região da cabeceira da bacia em quase 4 vezes, refletindo-se numa redução em 21% na produção de sedimentos de toda a bacia.

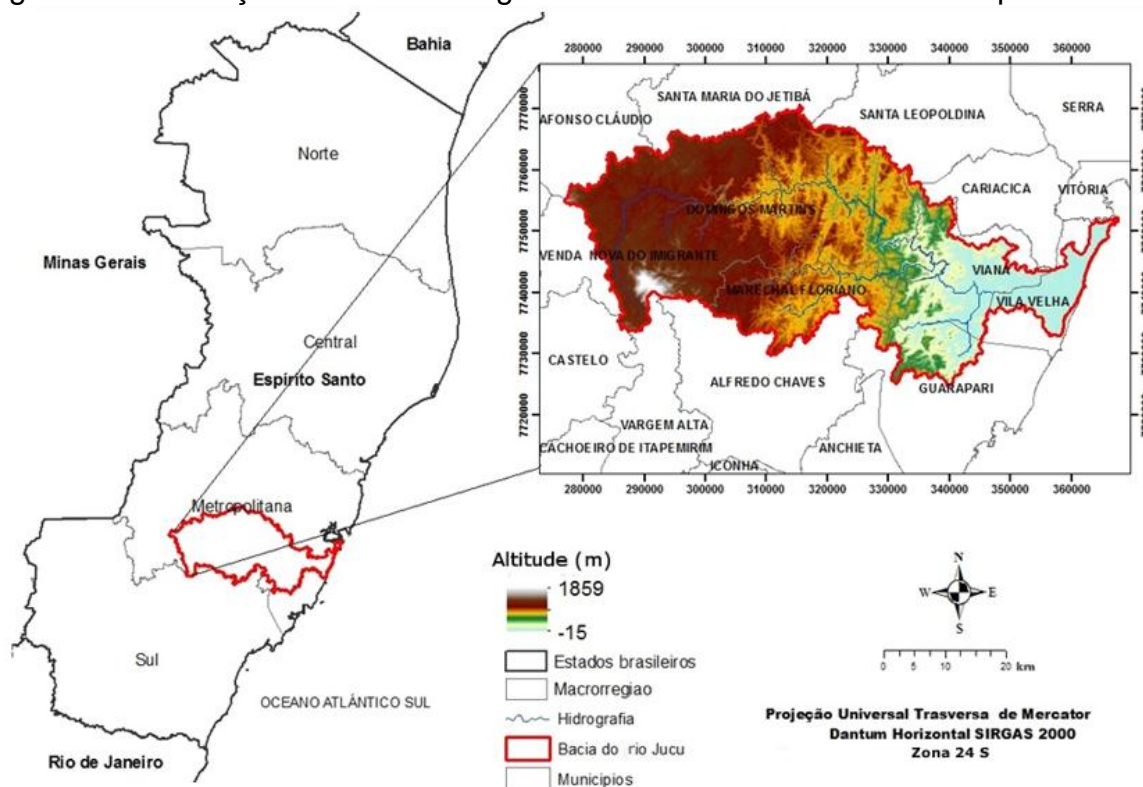
Blainski et al. (2011), com o objetivo de avaliar a influência das atividades agrícolas sobre a distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Araranguá, estabeleceram três tipos de cenários diferentes para o uso da terra: uso atual, com predominância da rizicultura nas áreas agrícolas; substituição da agricultura por reflorestamento; e remoção da cobertura vegetal das áreas agrícolas. Com o cenário de solo exposto, verificou-se que a vazão média diária anual foi maior por conta da diminuição da taxa de infiltração no solo e aumento do escoamento superficial, bem como pela diminuição da evapotranspiração. O cenário com reflorestamento apresentou a menor ocorrência de picos de vazão, sugerindo sua maior regularização durante o ano.

## 4.MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área em estudo

A área em estudo é a bacia hidrográfica do rio Jucu (mín. E: 276.759 e máx. E: 364.059 m, e mín. N: 7.770.580 e máx. N: 7.724.730 m), situada na região Sudeste do país, no estado do Espírito Santo (Figura 3).

Figura 3. Localização da bacia hidrográfica do rio Jucu no estado do Espírito Santo.



Fonte: Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (Geobases), adaptado pela autora.

O clima predominante da região é o Aw (tropical úmido, com uma estação chuvosa no verão e seca no inverno), de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação média anual varia de 1300 a 1600 mm, com temperaturas médias de 22 a 24°C (ALVARES et al., 2014).

A bacia do rio Jucu tem área de drenagem aproximada de 2.220 km<sup>2</sup> e disponibilidade hídrica superficial média de 15,3 m<sup>3</sup>/s. O rio Jucu nasce na Serra do Castelo e tem como seus formadores o rio Braço Norte, no município de Domingos Martins, e Braço Sul, no município de Marechal Floriano, desaguando no Oceano Atlântico, na localidade da Barra do Jucu, em Vila Velha. A altitude máxima da bacia chega a 1.800 m.

A bacia está inserida no bioma Mata Atlântica, com cobertura de Floresta Ombrófila Densa (Floresta Tropical Pluvial) a qual se estende quase pela totalidade da área, sendo interrompida na região central da bacia por uma faixa transversal de Floresta Ombrófila Aberta. Os municípios onde mais se encontram os remanescentes desses tipos de florestas são: Marechal Floriano, Domingos Martins, Santa Maria do Jequitibá e Santa Leopoldina (MAGNAGO et al., 2007).

#### 4.2 Edição do banco de dados do SWAT

Para a utilização do SWAT são necessárias, da bacia hidrográfica, informações hidro-meteorológicas (precipitação, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura, radiação solar e vazão dos cursos d'água), geográficas (tipo e uso do solo, localização da rede hidrográfica e modelos digitais de elevação e de declividade do terreno), edáficas (características de cada tipo de solo) e de vegetação (parâmetros utilizados da própria base de dados do SWAT).

As informações edáficas estão disponíveis no próprio SWAT, mas referem-se às condições norte-americanas. Portanto, a primeira etapa da modelagem foi consolidar uma nova base de dados para as condições da área de estudo. Assim sendo, antes da criação do projeto no aplicativo computacional ArcSWAT, editou-se a base de dados do SWAT, modificando ou acrescentando informações.

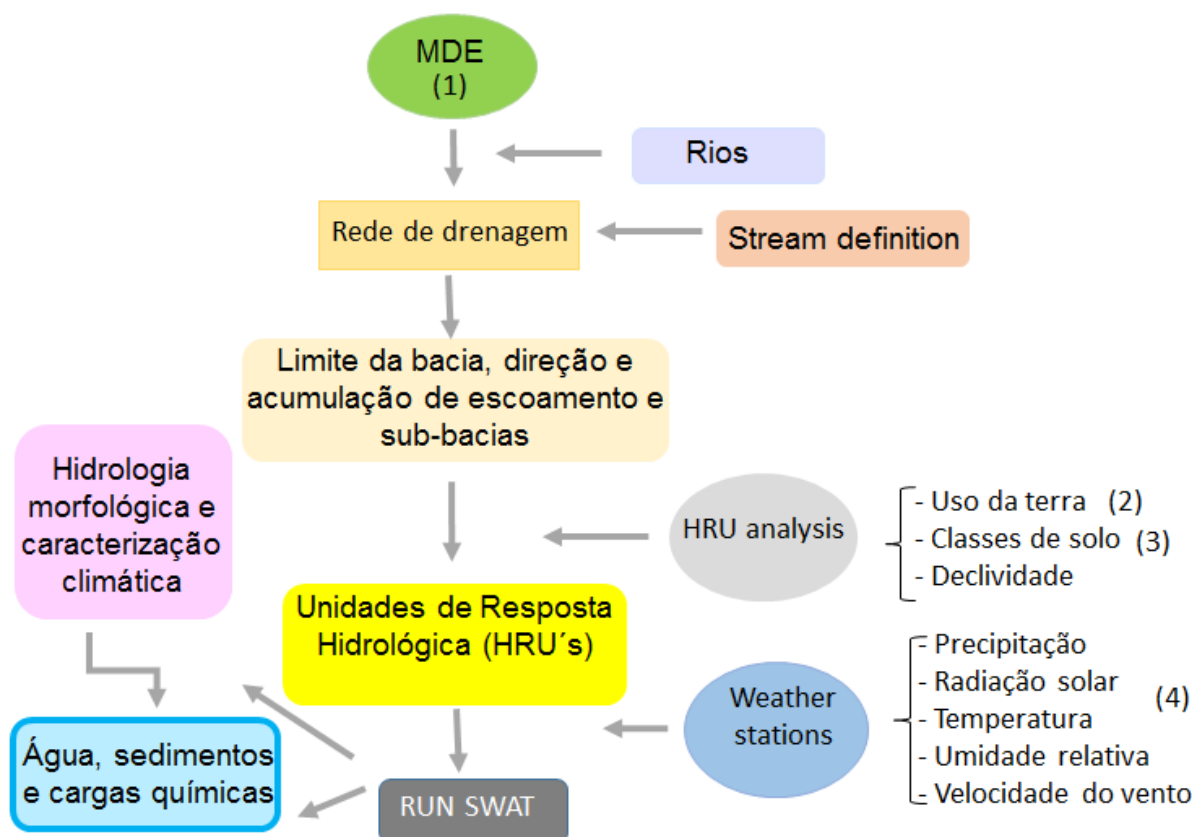
A forma de sistematização de todas estas informações, bem como sua origem está descrita na sequência.

Após os procedimentos para elaborar a base de dados, realizaram-se a criação do projeto e o processamento das simulações no modelo hidrológico SWAT. As etapas foram processadas por meio da interface ArcSWAT 12, no ArcGIS® 10.2.

O modelo SWAT divide a bacia hidrográfica em áreas com propriedades hidrológicas comuns, conhecidas por Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), que apresentam semelhanças no terreno, uso da terra e tipo de solo (ARNOLD et al., 2012).

Na Figura 4, encontra-se um fluxograma com as etapas para executar o modelo. Os números na frente das variáveis indicam que as mesmas serão mais detalhadas a seguir, na ordem que aparece na Figura.

Figura 4. Fluxograma com as etapas de criação do projeto.



Fonte: Bonumá (2015), adaptado pela autora.

A partir da delimitação das sub-bacias e fornecimento dos dados de entrada de solo, uso da terra e declividade, criaram-se as HRU's com a ferramenta *HRU Analysis*. As HRU's permitem que o modelo calcule uma evapotranspiração diferente para cada tipo de uso da terra, cobertura vegetal e solo, além da geração das cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes etc.), que são calculadas para cada HRU separadamente, e depois somadas, para determinar as cargas totais da sub-bacia. Também são calculados, na HRU, o fator de compensação de evaporação da

planta, armazenamento máximo do dossel, o valor “n” de Manning para o escoamento superficial, o fator de compensação de evaporação do solo e o coeficiente de retardo do escoamento superficial (MALUTTA, 2012).

#### 4.2.1 Modelo Digital de Elevação

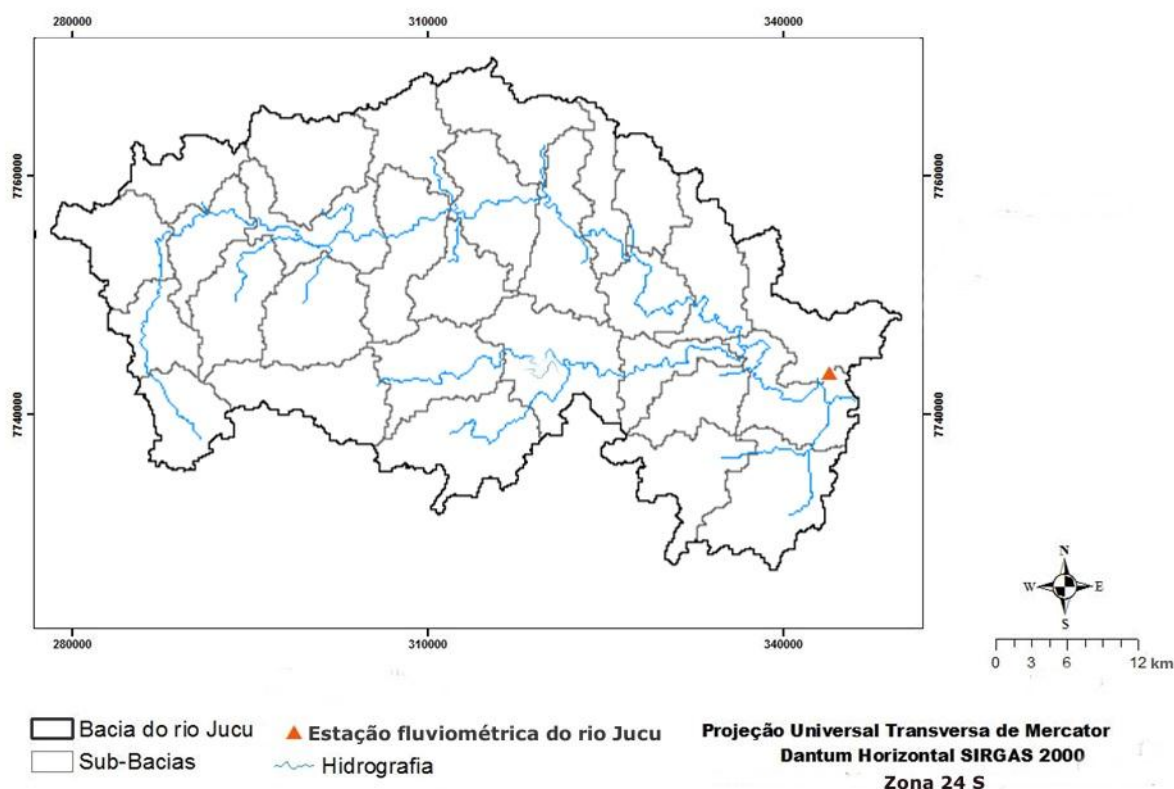
O MDE utilizado foi o elaborado pelo projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (USGS, 2013), com resolução espacial original de 90 m. Este MDE foi pré-processado anteriormente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), para eliminar falhas, sombras e distorções.

No ArcGIS®, foi utilizada a ferramenta *fill* para preenchimento de depressões espúrias. O MDE foi projetado para o sistema SIRGAS 2000 e recortado para uma área um pouco maior, que a área em estudo. Após esses procedimentos, realizou-se a delimitação da bacia hidrográfica com as ferramentas no menu *Watershed Delineador*, na opção *Automatic Watershed Delineation*. As ferramentas desse menu são divididas em cinco seções: *DEM Setup*; *Stream Definition*; *Outlet and Inlet Definition*; *Watershed Outlets Selection and Definition* e *Calculation of Sub-basin Parameters*. O MDE foi selecionado na sessão *DEM Setup*. Nessa fase, foi gerado o limite da bacia e sub-bacias, a direção e acumulação do fluxo e os pontos de saída das sub-bacias. O MDE também foi utilizado para gerar o mapa com as classes de declividade do terreno.

A partir da rede de drenagem criada pelo SWAT, foram geradas as sub-bacias, obedecendo o tamanho ideal proposto por Jha et al. (2004), os quais estabeleceram que a área de cada sub-bacia tem de ficar entre 2 e 6% da área total da bacia. A partir desse conceito, foi definido um total de 29 sub-bacias. A sub-bacia utilizada para verificar a calibração e validação dos dados, foi a que contém a estação fluviométrica da bacia do Jucu, estação do Jucu, indicada na Figura 5.

O SWAT, na aba *Land Use/Soils/Slope*, na sub aba *slope*, calcula automaticamente a declividade, após inserção do MDE. A bacia apresenta um relevo bastante complexo, por isso também tem altos valores de declividade.

Figura 5. Sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Jucu, geradas no SWAT.

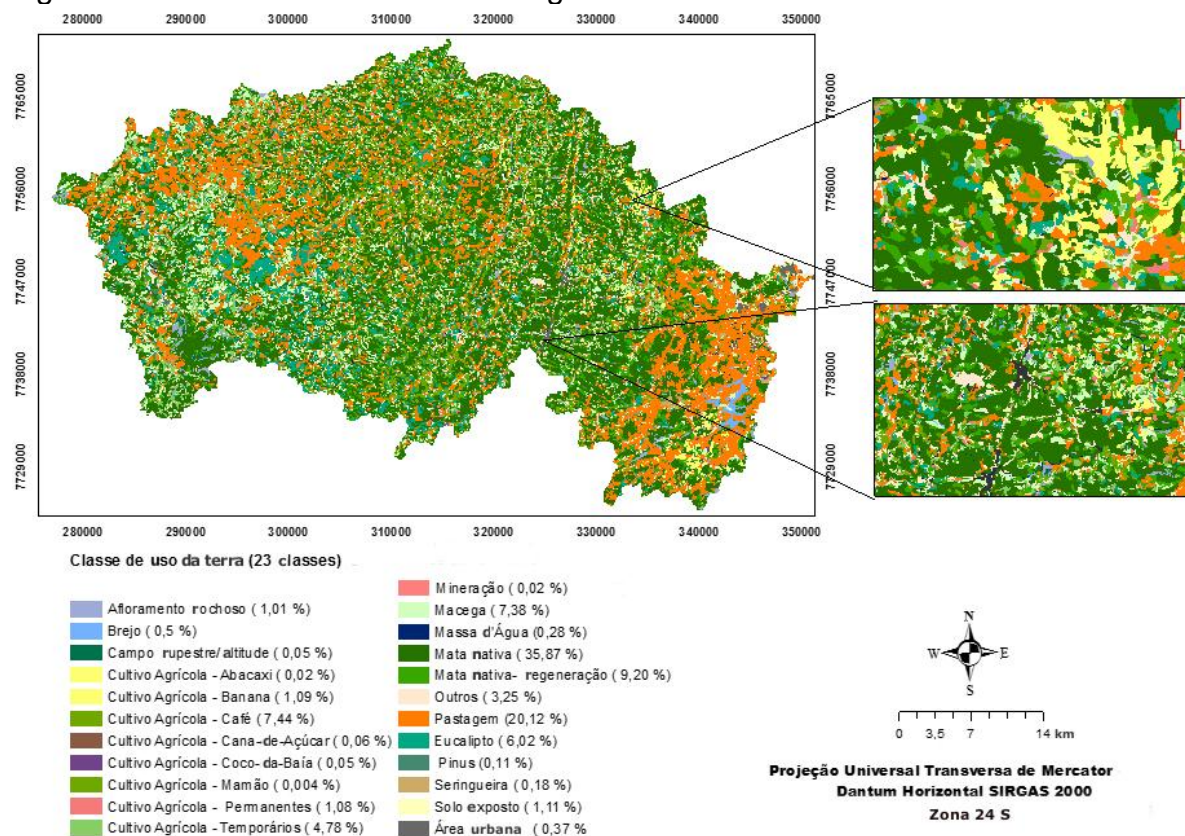


Fonte: a autora.

#### 4.2.2 Dados de uso da terra

O mapa de uso da terra (Figura 6) foi obtido por meio de contato com o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA). O mapeamento foi elaborado por uma empresa particular, a qual realizou a fotointerpretação do ortomosaico ortorretificado do IEMA, do ano de 2007/2008. Na bacia, os principais usos do solo são: mata nativa (35,87%), pastagem (20,12%), regeneração florestal (9,20%), cafeicultura (7,44%), macega (7,38%), eucalipto (6,02%), cultivos agrícolas temporários e perenes (5,86%).

Figura 6. Usos da terra na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: IEMA, adaptado pela autora.

No módulo *HRU Analysis*, na aba *Land Use/Soils/Slope*, foram inseridas as informações necessárias para serem geradas as HRU's. Os primeiros dados inseridos nesse módulo foram o mapa com as classes de uso da terra e um arquivo txt com os usos da terra, relacionando-os com os já existentes na base de dados do próprio modelo.

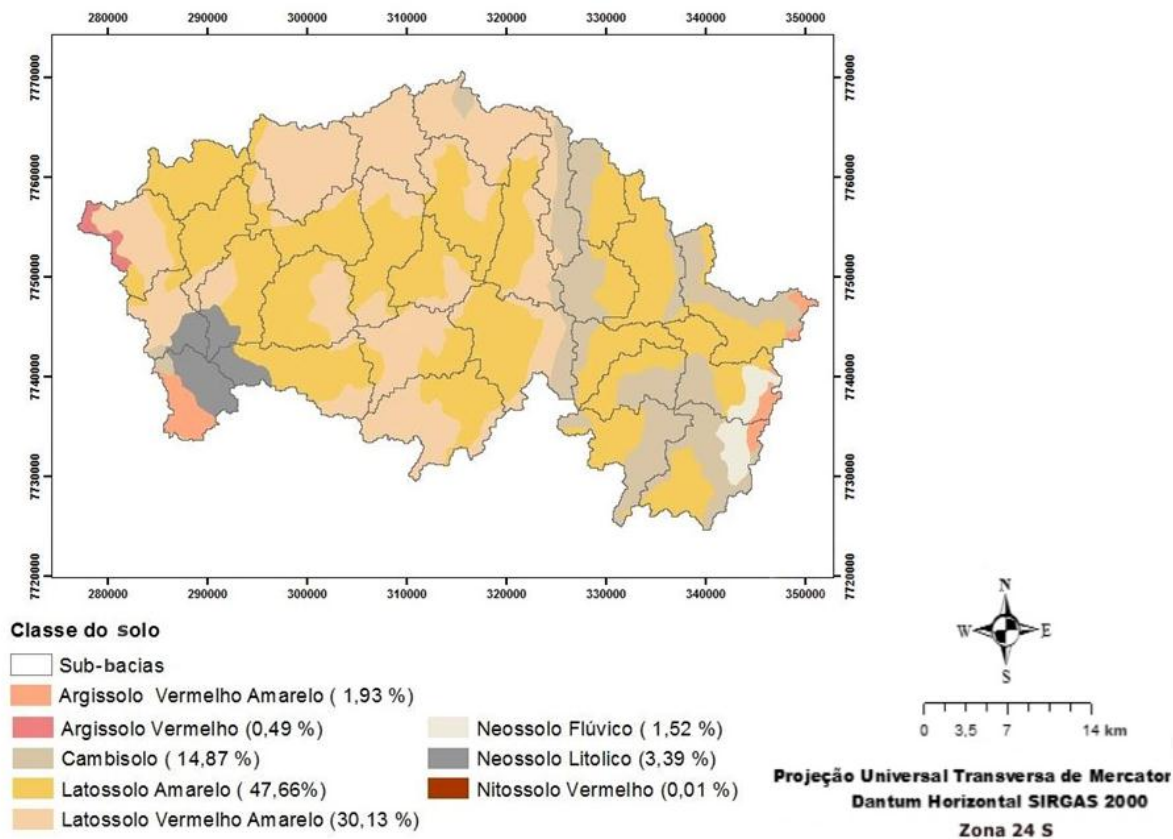
#### 4.2.3 Dados de solos

O mapa de solo para a área em estudo (Figura 7) foi obtido do Geobases (Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo), no endereço eletrônico (<http://www.geobases.es.gov.br>). Este contém a taxonomia dos solos atualizada para o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013). O mapa disponibilizado no "Navegador Geobases" tem



representação digital, na escala de 1:400.000 do mapa original do Projeto Radam Brasil (1:250.000).

Figura 7. Classes de solo na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: EMBRAPA (2013), adaptado pela autora.

Na base de dados do SWAT podem ser editadas as características físicas e químicas do solo. As propriedades físicas do solo são responsáveis pelo movimento de água e de ar ao longo do perfil do solo, e exercem influência sobre a dinâmica da água, dentro das HRU's. As informações de propriedades químicas do solo são opcionais (ARNOLD et al., 2012).

A seguir, encontra-se um quadro com as propriedades físicas do solo requeridas pelo SWAT.

Tabela 1. Parâmetros físico-hídricos do solo requeridos pelo SWAT

Sigla no SWAT	Descrição do parâmetro
SNAM	Nome das classes de solo
NLAYERS	Número de camadas (horizontes) do solo
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C e D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima possível de alcance da raiz (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (decimal)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm <sup>3</sup> )
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm/h)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (%)
CLAY	Porcentagem de argila no solo (%)
SILT	Porcentagem de silte no solo (%)
SAND	Porcentagem de areia no solo (%)
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (%)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal)
USLE_K	Fator de erodibilidade (K) da USLE

Fonte: Oliveira (2014b).

As propriedades de cada solo foram buscadas na literatura de trabalhos desenvolvidos na região sudeste, os quais também utilizaram o modelo em diferentes tipos de estudos, e quando faltou informação, ou esta era inconsistente, os parâmetros foram calculados pela planilha macro *SWAT\_usersoil*<sup>1</sup>. Na Tabela 2, encontram-se descritas as classes do solo, para a bacia em estudo, e a fonte dos parâmetros físicos do solo, para cada tipo de solo.

Tabela 2. Classes de solos utilizadas e respectivas fontes dos parâmetros

Classe do solo	Sigla	Fonte
Argissolo Vermelho Amarelo	PVA	macroSWAT_usersoil; (LELIS, 2011)
Argissolo Vermelho Eutrófico	PVe	macroSWAT_usersoil; (PEREIRA, 2013)
Cambissolo Háptico	CX	macroSWAT_usersoil; (LELIS, 2011)
Latossolo Amarelo Distrófico	LA	macroSWAT_usersoil; (PEREIRA, 2013)
Latossolo Vermelho e Amarelo Distrófico	LVA	macroSWAT_usersoil; (LELIS, 2011); (PEREIRA, 2013)
Neossolo Flúvico	RY	(PINTO, 2014)
Neossolo Litólico	RLve	(BELON, 2014); (MARCHIORI, 2014)
Nitossolo Vermelho Eutrófico	NVef	(MARCHIORI, 2014)

<sup>1</sup> Planilha macro foi obtida por Oliveira (2014b), em contato com os desenvolvedores do modelo SWAT.

A macro *SWAT\_user soil* faz cálculos de pedotransferência, tendo-se utilizado no estudo a equação desenvolvida por Saxton e Rawls (2006), para estimar a condutividade hidráulica do solo; a equação proposta por Baumer (1990), para estimar o albedo do solo; e a equação proposta por Williams (1995), para estimar USLE\_K, citadas na documentação teórica do modelo SWAT.

Os parâmetros das classes de solo foram editados na aba *user soil*, no *database* do projeto SWAT. Nessa aba, as camadas do solo são organizadas horizontalmente, e foram incluídas até 9 camadas para cada tipo de solo. O mapa do solo, em formato raster, foi incluído na ferramenta *HRU Analysis*, na aba *soils*. Na sub aba *soils*, é apresentado o ficheiro em txt com a relação das classes dos solos contidos no *database* do modelo e no mapa.

Na Tabela 3, estão discriminados todos os parâmetros de cada camada e de cada tipo de solo utilizados no trabalho.

Tabela 3. Valores dos parâmetros dos solos utilizados para modelagem, para cada camada do solo

Parâmetros	PVA	PVe	CX	LA	LVA	RY	RLve	NVef
NLAYERS	2	5	2	4	2	2	2	2
HYDGRP	B	C	C	A	A	A	B	C
SOL_ZMX (mm)	800	1900	1500	1960	1400	900	320	180
ANION_EXC	0,55	-	0,6	-	-	0,547	0,36	0.4
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0.5
SOL_Z1 (mm)	200	150	350	200	200	900	105	30
SOL_BD1 (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,18	1,4	1,14	1,5	1,11	1,34	1.34
SOL_AWC1 (mm)	0,057	0,15	0,123	0,18	0,017	0,198	0,08	0.231
SOL_K1 (mm/hr)	12,5	65	2	75	12,5	9	9,33	1.3
SOL_CBN1 (%)	1,71	0,76	3,37	1,36	1,93	0,6	2,07	0.4
CLAY1 (%)	32	28	55	38	47	21	18	65
SILT1 (%)	30	11	6	7	20	28	22	32
SAND1 (%)	38	61	39	55	33	51	60	3
SOL_ALB1 (%)	0,176	0,17	0,25	0,151	0,151	0,15	0,2	0.15
USLE_K1	0,126	0,18	0,082	0,115	0,115	0,13	0,16	0.122
SOL_Z2 (mm)	800	450	1500	400	800	300	320	180
SOL_BD2 (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,5	1,37	1,14	1,5	1,6	1,4	1.3
SOL_AWC2 (mm)	0,151	0,16	0,123	0,25	0,123	0,15	0,08	0.139
SOL_K2 (mm/hr)	12,5	35	2	50	12,5	12,5	7,53	1.3
SOL_CBN2 (%)	0,73	0,2	0,6	0,64	0,85	0,6	1,67	0.4
CLAY2 (%)	42	32	40	56	36	24,7	18,5	76
SILT2 (%)	32	10	7	5	15	26,6	20,7	31
SAND2 (%)	27	58	53	39	49	49,7	60,8	3
SOL_ALB2 (%)	0,357	0,17	0,25	0,25	0,325	0,15	0,2	0.1

Parâmetros	PVA	PVe	CX	LA	LVA	RY	RLve	NVef
USLE_K2	0,152	0,18	0,103	0,103	0,124	0,16	0,16	0.122
SOL_Z3 (mm)	-	1650	-	1600	-	-	-	-
SOL_BD3 (g/cm³)	-	1,35	-	1,03	-	-	-	-
SOL_AWC3 (mm)	-	0,25	-	0,24	-	-	-	-
SOL_K3 (mm/hr)	-	21	-	19	-	-	-	-
SOL_CBN3 (%)	-	0,3	-	0,3	-	-	-	-
CLAY3 (%)	-	54	-	56,5	-	-	-	-
SILT3 (%)	-	9	-	6	-	-	-	-
SAND3 (%)	-	47	-	37,5	-	-	-	-
SOL_ALB3 (%)	-	0,17	-	-	-	-	-	-
USLE_K3	-	0,18	-	-	-	-	-	-
SOL_Z4 (mm)	-	1900	-	1960	-	-	-	-
SOL_BD4 (g/cm³)	-	1,26	-	1,15	-	-	-	-
SOL_AWC4 (mm)	-	0,29	-	0,24	-	-	-	-
SOL_K4 (mm/hr)	-	5	-	19	-	-	-	-
SOL_CBN4 (%)	-	0,13	-	0,2	-	-	-	-
CLAY4 (%)	-	57	-	56	-	-	-	-
SILT4 (%)	-	12	-	5	-	-	-	-
SAND4 (%)	-	31	-	39	-	-	-	-
SOL_ALB4 (%)	-	0,17	-	-	-	-	-	-
USLE_K4	-	0,18	-	-	-	-	-	-
SOL_Z5 (mm)	-	1900	-	-	-	-	-	-
SOL_BD5 (g/cm³)	-	1,26	-	-	-	-	-	-
SOL_AWC5 (mm)	-	0,29	-	-	-	-	-	-
SOL_K5 (mm/hr)	-	5	-	-	-	-	-	-
SOL_CBN5 (%)	-	0,13	-	-	-	-	-	-
CLAY5 (%)	-	57	-	-	-	-	-	-
SILT15 (%)	-	12	-	-	-	-	-	-
SAND5 (%)	-	31	-	-	-	-	-	-
SOL_ALB5 (%)	-	0,17	-	-	-	-	-	-
USLE_K5	-	0,18	-	-	-	-	-	-

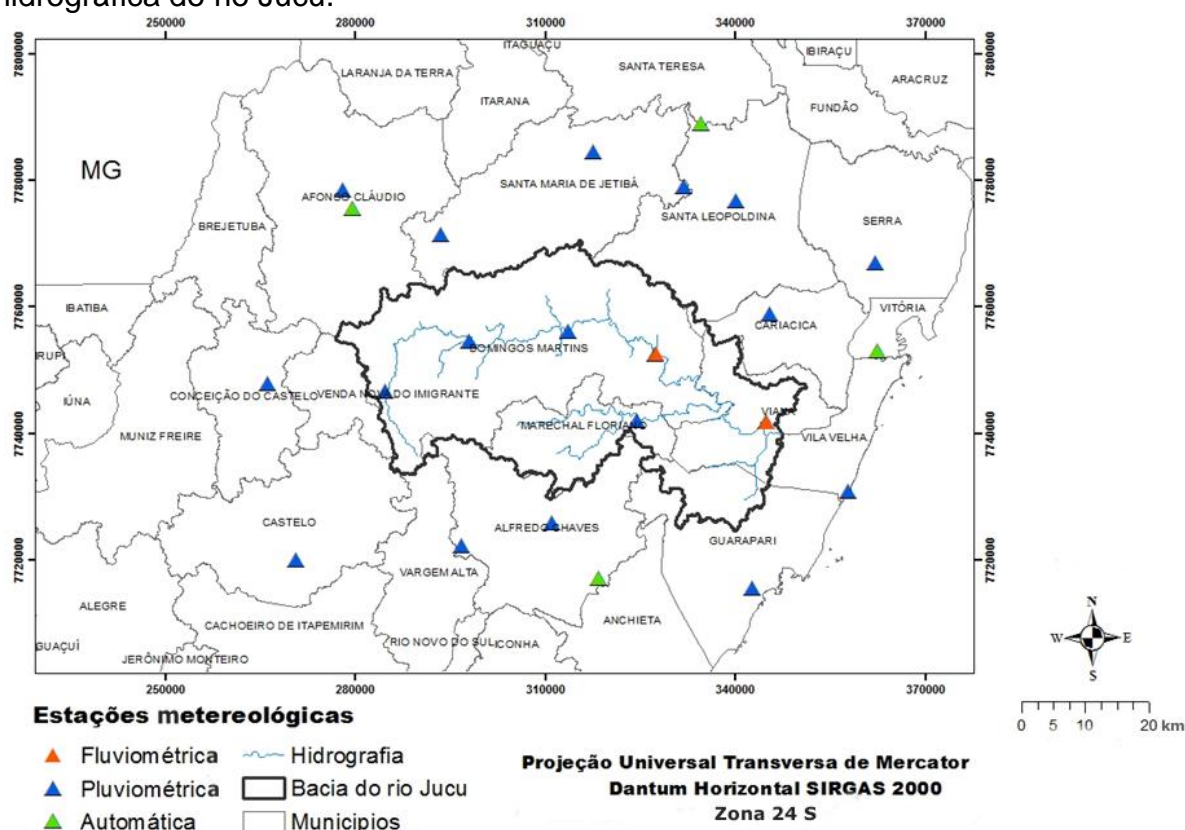
Fonte: Lelis (2011); Pereira (2013); Pinto (2014); Belon (2014) e Marchiori (2014).

#### 4.2.4 Dados meteorológicos e de vazão

Selecionaram-se 23 estações meteorológicas (Tabela A) e 1 estação fluviométrica. Os dados de vazão, oriundos das estações fluviométricas localizadas no rio principal da bacia hidrográfica do rio Jucu, obtidos no HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA), foram organizados em planilhas eletrônicas e utilizados para calibrar e validar o modelo.

Os dados de clima (Figura 8), para a área de estudo, foram obtidos das estações meteorológicas das bases de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) e da Agência Nacional de Água (ANA). Estes consistiram em valores diários de elementos meteorológicos (temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar global diária, temperatura no ponto de orvalho e precipitação) para um período de sete anos (8/10/2007 a 31/12/2014).

Figura 8. Localização das estações meteorológicas e fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

#### 4.3 Aplicação do SWAT

#### 4.3.1 Etapa de simulação do modelo: SWAT Simulation

Após inserir todos os dados e comandos na interface do modelo, por meio da ferramenta *SWAT Simulation*, foram realizados os comandos finais para executar o modelo: *Setup SWAT Run/ Run SWAT*. Inicialmente, o modelo só realizou a simulação para a etapa da calibração, que abrangeu o período de 2008 a 2011. Depois do processo de calibração manual e automática, bem como da inserção dos novos valores dos parâmetros calibrados no modelo, realizou-se a simulação para a etapa de validação dos dados, que compreendeu o período de 2011 a 2014.

#### 4.3.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação

Os parâmetros para análise de sensibilidade foram escolhidos pela literatura (Tabela 4). Foram selecionados os parâmetros utilizados por Oliveira (2014a), Ferrigo (2012), Fukunaga (2012) e Lelis (2011). Esses autores fizeram uma vasta análise dos parâmetros mais sensíveis em trabalhos publicados em bacias hidrográficas brasileiras.

Os parâmetros escolhidos também estão de acordo com o trabalho publicado por Arnold et al. (2012), que reuniram 64 estudos de maior representatividade mundial com o SWAT, para identificar os parâmetros mais utilizados no processo de calibração. Segundo os autores, para calibrar o processo de escoamento superficial, os parâmetros mais indicados são: CN2, SOL\_AWC, ESCO, SURLAG, EPCO e OV\_N; para o fluxo de base são: ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GW\_REVAP, RCHARG\_DP, GWQMN e o REVAPMN. Todos esses parâmetros estão em consonância com os escolhidos para este estudo.

Foram selecionados 22 parâmetros para análise de sensibilidade do modelo (Tabela 4). Foi utilizado o software SWAT-CUP para fazer a análise de sensibilidade e calibração com todos os parâmetros selecionados pela literatura, com o aplicativo SUFI-2 (ABBASPOUR et al., 2015, ROCHA, 2013). A definição dos limites inferiores e superiores dos parâmetros foi determinada por meio do valor inicial, a partir da

observação da própria estimativa do modelo nos trabalhos de Ferrigo (2012), Fukunaga (2012) e Oliveira (2014b), além da recomendação de Van Griensven et al. (2006). Segundo Van Griensven et al. (2006), para se estabelecerem os limites dos parâmetros, existem três alternativas: na primeira, o valor do parâmetro é substituído diretamente; na segunda, soma-se um valor constante ao valor inicial do parâmetro; e, na terceira, multiplica-se o valor inicial do parâmetro por um valor fixo em porcentagem.

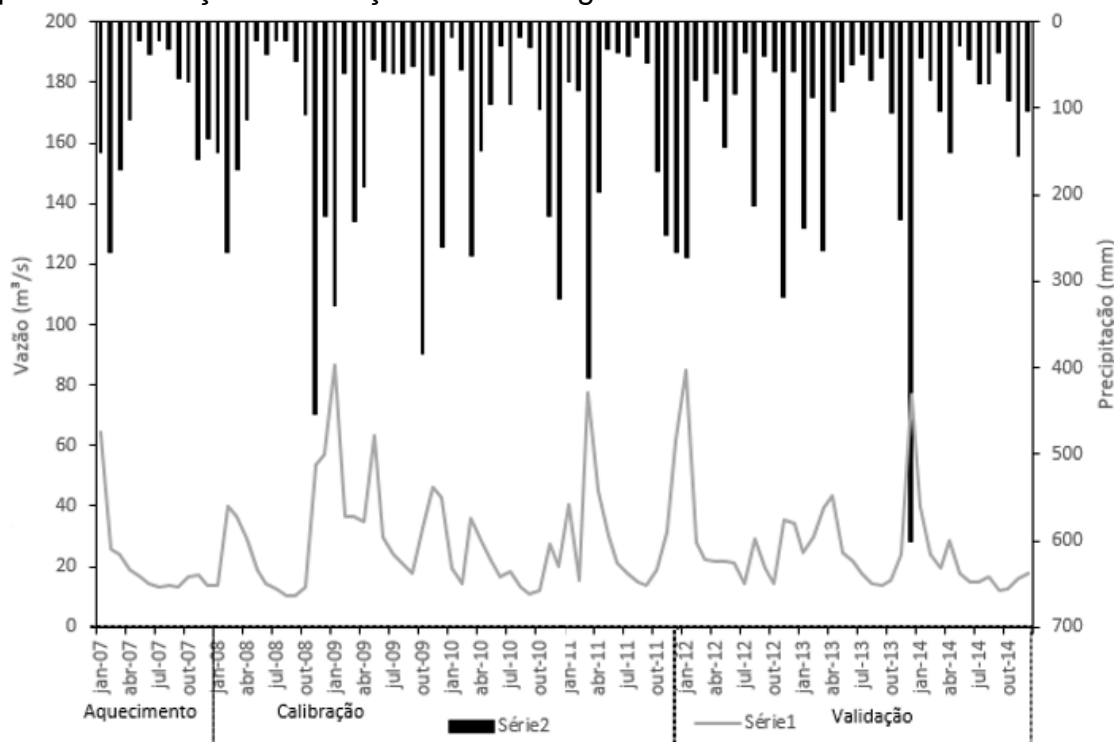
Tabela 4. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo

Parâmetros	Descrição	LI	LS	Método de variação
CN2	Número da curva na condição II de umidade(adimensional)	-0,50	0,5	Multiplicação
ALPHA BF	Constante de recessão do escoamento de base (adimensional)	0	1	Substituição
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)	0	450	Substituição
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H <sub>2</sub> O/mm solo)	-0,50	0,5	Multiplicação
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0,01	1	Substituição
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o "revap" (mm)	0	5000	Substituição
SURLAGE	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)	1	24	Substituição
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm <sup>3</sup> )	0,9	2,5	Substituição
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (mm)	0	25	Substituição
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta (adimensional)	0,01	1	Substituição
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico (adimensional)	0,2	1	Substituição
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h <sup>-1</sup> )	0	130	Substituição
FFCB	Armazenamento inicial de água do solo inicial expressa como uma fração do teor de água na capacidade de campo (fração)	0	1	Substituição
OV_N	Valor "n" de Manning para escoamento superficial	0,1	30	Substituição
GWQMN	Profundidade do limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (mm)	0	5000	Substituição
GW_REVAP	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular	0,02	0,2	Substituição
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)	0	1	Substituição
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)	0	3500	
CNCOEF	Coefficiente de ponderação usado para calcular a retenção nos coeficientes do número da curva dependentes da evapotranspiração das plantas (adimensional)	0,5	2	Substituição
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h <sup>-1</sup> )	-0,5	0,5	Multiplicação
SOL_ALB	Albedo do solo úmido (decimal)	0	1	Substituição

Para análise de sensibilidade e calibração, a série temporal de vazão com dados observados foi dividida em duas partes (para os dados mensais e diários), técnica denominada de *split sample*, além do período destinado à fase de aquecimento do modelo. Na primeira fase, os parâmetros do modelo podem variar até encontrarem ótimos valores dos indicadores estatísticos, enquanto que na fase de validação, os parâmetros não podem mais ser alterados (LI; ZHANG; ZHENG, 2009). A Figura 9 mostra a divisão da série de vazão da estação fluviométrica da bacia. Os dados de aquecimento foi a série duplicada, utilizando somente um ano de dados observados, no caso o ano de 2007.



Figura 9. Série de precipitação e vazão da bacia do rio Jucu, utilizados para as etapas de calibração e validação na modelagem.



Fonte: a autora.

Inicialmente, foi feita a simulação de vazões para o período de calibração, de 1/1/2008 a 31/12/2011; os valores simulados foram comparados pelo hidrograma, gráficos e índices estatísticos, com os valores observados para a mesma data.

Com a comparação entre os dados simulados e observados, os parâmetros do modelo foram calibrados manualmente em escala mensal até que os resultados da simulação do modelo fossem considerados aceitáveis de acordo com NS (coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe), NS' (coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado)  $R^2$  (coeficiente de determinação), RSR (Erro padrão médio normalizado) e valores PBIAS (Percentual de tendência (%)).

Após a calibração manual, realizou-se a etapa da calibração automática para escala mensal, sendo escolhido como função-objetivo o coeficiente de Nash Sutcliffe, com valor crítico de parada  $\geq 0,4$ , também utilizado por Oliveira (2014b). Tanto a análise de sensibilidade quanto a calibração foram realizadas no período entre 1/1/2008 a 31/12/2011.

O processo de calibração é uma etapa trabalhosa e demorada, dependente da habilidade do usuário em conhecer o comportamento dos parâmetros do modelo, da

qualidade e representatividade dos dados e do desempenho da máquina. Com os valores satisfatórios, foi realizada a validação ou verificação do modelo, com a outra parte dos dados, no período de 01/01/2012 a 31/12/2014. Após a obtenção dos parâmetros calibrados, utilizou-se a aba *Edit SWAT Input* do SWAT, para substituir os valores iniciais dos parâmetros pelos novos; no final de cada modificação, o comando *Rewrite SWAT input files*. Com o modelo calibrado e validado, foi realizada a simulação dos cenários.

#### 4.4 Análise estatística do desempenho do modelo hidrológico

A avaliação estatística do desempenho de um modelo geralmente é realizada a partir da comparação entre os dados medidos e os simulados. Normalmente se utilizam o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) (Equação 2), o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado (NS') (Equação 3), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 4), o índice PBIAS (equação 5) e o RSE (Equação 6).

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

$$NS' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (4)$$

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

$$\text{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (6)$$

Em que:

$n$  = número de observações durante o período simulado;

$O_i$  = vazões observadas;

$S_i$  = vazões simuladas pelo modelo;

$\bar{O}$  = média dos valores observados; e

$\bar{S}$  = média dos valores simulados

$\hat{S}_i$  = obtido pela regressão linear entre os dados observados ( $O_i$ ) e estimados ( $S_i$ ),  $\hat{S}_i = a + b.O_i$ .

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , varia de 0 a 1, e a limitação deste parâmetro é que nem sempre os valores mais altos (próximos de 1) indicam um bom ajuste. Os valores de NS e NS' podem variar de  $-\infty$  e 1, sendo que os valores mais próximos de 1 indicam melhores ajustes. O NS' é menos sensível a valores extremos, por causa de as diferenças não serem elevadas ao quadrado; valores positivos indicam melhores ajustes dos modelos, enquanto que os negativos, um desempenho não aceitável (MORIASI et al., 2007). A utilização do NS também permite verificar a acurácia do modelo (BRESSIANI et al., 2015).

O índice PBIAS indica a porcentagem média em que os dados simulados estão subestimados ou superestimados em relação aos dados observados (MORIASI et al., 2007). Valores positivos indicam superestimação, enquanto os negativos, subestimação; valores com baixa magnitude indicam maior acurácia na simulação do modelo, sendo 0 o valor considerado ótimo (OLIVEIRA, 2014b).

O RSR é a razão entre a média da raiz do erro quadrado para o desvio padrão dos dados medidos. O RSR tem o valor ideal quando está próximo a 0, ou seja, quanto mais baixo o RSR, melhor o desempenho modelo; os valores podem variar, tanto negativos como positivos (MORIASI et al., 2007).

Como forma de padronizar os resultados do modelo de acordo com os índices estatísticos, Green e Verdevan Griensven (2008), Wu e Chen (2009) estabeleceram padrões de  $NSE > 0,4$  e  $R^2 > 0,5$  para dados mensais. Moriasi et al. (2007) sugeriram que o modelo pode ser julgado como satisfatório se  $NS > 0,50$  e  $0,70$ ; RSR entre  $0,60$  e  $0,70$ ; e PBIAS entre  $\pm 15$  e  $\pm 25\%$  para vazões em intervalo de tempo mensal (Tabela 5). Quando os modelos de bacias hidrográficas são avaliados em um passo de tempo diário, as classificações podem ser menos rigorosas do que para os de tempo mais longo, pois os valores diários são mais aleatórios ou menos estáveis.

Tabela 5. Classificação dos coeficientes para avaliação dos resultados do modelo SWAT

Classificação	NS	RSR	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,5 < NS \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,7$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NS \leq 0,5$	$RSR > 0,7$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: MORIASI et al. (2007), p. 891.

#### 4.5 Simulação de cenários

Foi utilizada uma série sintética de 30 anos e um período de aquecimento de 10 anos para o modelo. Na simulação dos cenários, foi utilizada a ferramenta *Edit SWAT Input > Land Use Update*; após a alteração de cada uso da terra, foi dado o comando *Rewrite SWAT input files* (OLIVEIRA, 2014b).

Foram estabelecidos 6 cenários:

Cenário 1 (F20): com 20% de área de floresta nativa na bacia;

Cenário 2 (F37): com 36% de área de floresta nativa na bacia (uso da terra atual);

- Cenário 3 (F50): com 50% de área de floresta nativa na bacia;
- Cenário 4 (F100): com 100% de área de floresta nativa na bacia;
- Cenário 5 (E100): com 100% da área da bacia ocupada com eucalipto.
- Cenário 6 (P100): com 100% da área da bacia ocupada com pastagem;

Para cada simulação de cenários, foram determinadas as seguintes vazões de referência para análise ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ): vazão média ( $Q_{\text{méd}}$ ); vazão mínima média com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) e a  $Q_{90}$ ; e vazão máxima com período de retorno de 10 anos ( $Q_{10}$ ). Tais vazões de referência foram determinadas utilizando o software SisCAH 1.0 (Sistema Computacional para Análises Hidrológicas), por meio da configuração dos dados de vazão simulados pelo SWAT para um formato de banco de dados compatível com o formato requerido para importação no SisCAH.

## 5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise pré-calibração

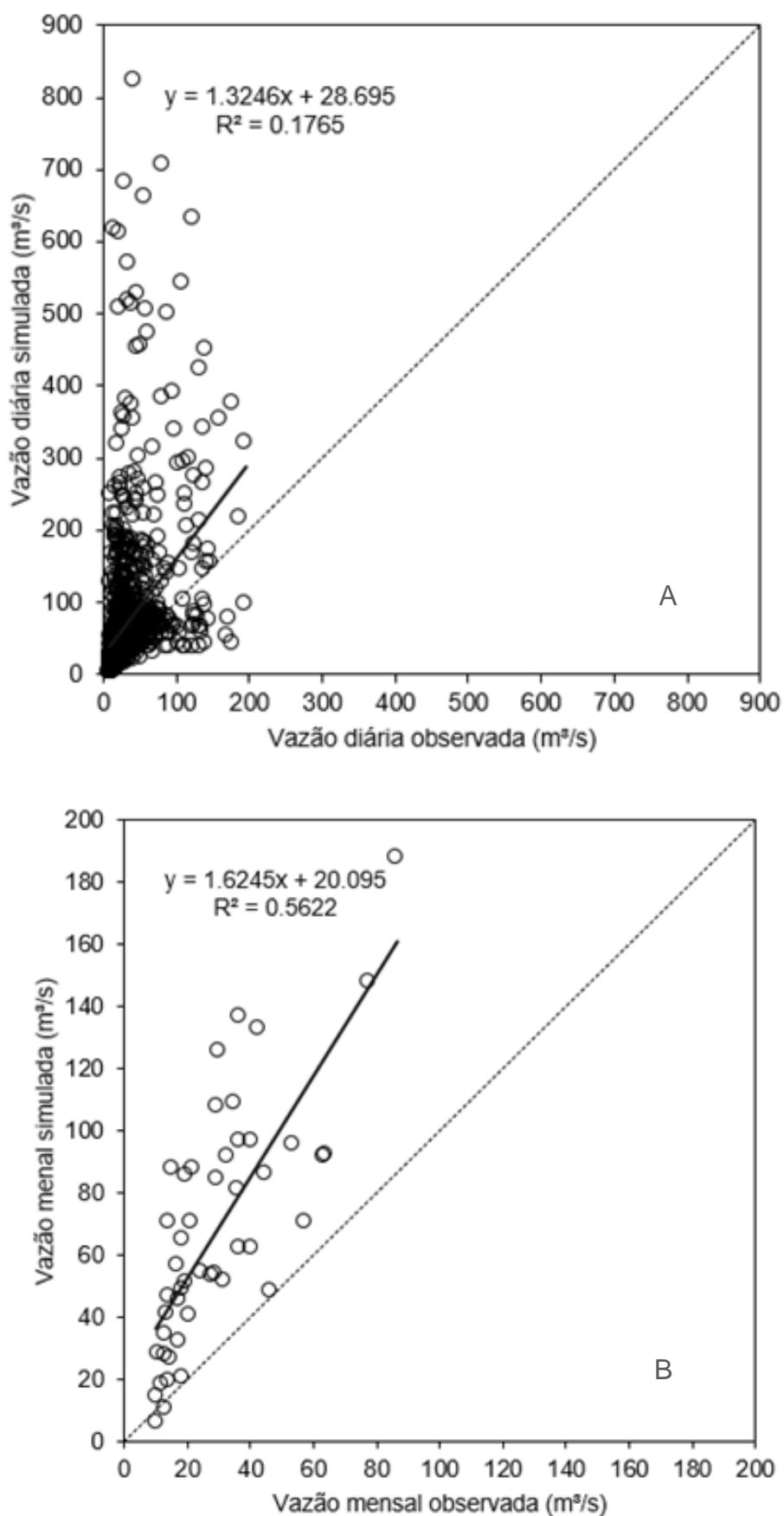
Na Tabela 6 são ilustrados os valores dos índices estatísticos para avaliação da simulação das vazões diárias e mensais, antes do procedimento de calibração do modelo para a bacia do rio Jucu. De acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007), todos os valores dos índices estatísticos estão insatisfatórios, exceto o PBIAS, que apresentou valor satisfatório.

Tabela 6. Índices estatísticos de verificação da simulação de vazões diárias e mensais antes da calibração do modelo

Estatísticas	Escala temporal	Valores
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	Diária	-9,48
	Mensal	-6,13
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado (NS')	Diária	-1,53
	Mensal	-1,79
Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	Diária	0,17
	Mensal	0,56
Erro padrão médio normalizado (RSR)	Diária	3,23
	Mensal	2,67
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	Diária	2,49
	Mensal	3,25

A Figura 10 mostram a correlação diária e mensal dos dados observados e simulados, respectivamente, evidenciando que os resultados não foram satisfatórios para a simulação do modelo. Apesar da correlação mensal apresentar um  $R^2$  maior que o da simulação diária, o resultado também foi insatisfatório para escala mensal.

Figura 10. Correlação entre a vazão diária (A) e mensal (B) com dados observados e simulados para bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

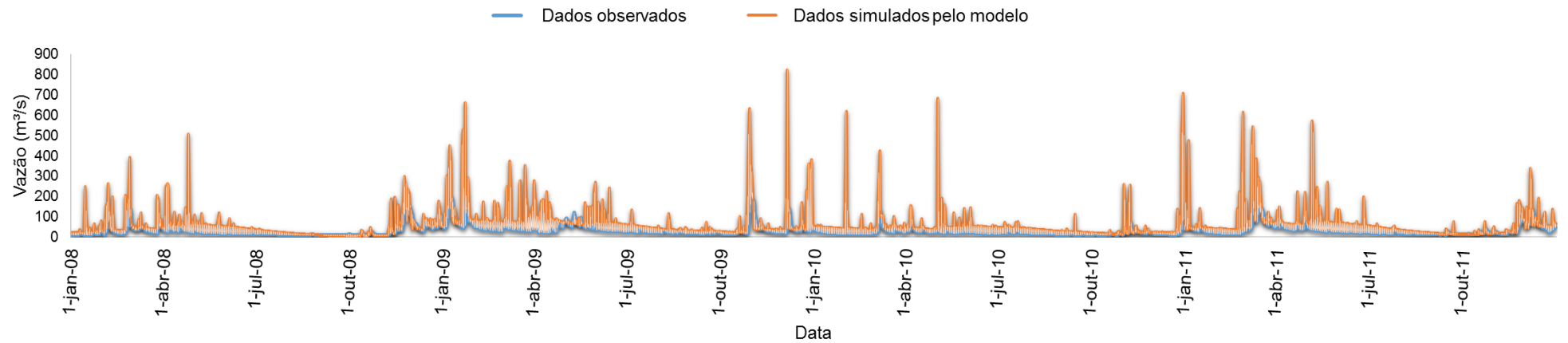
As Figuras 11 e 12 mostram o hidrograma entre os dados observados e estimados, na escala diária e mensal, respectivamente.

Através da análise visual do hidrograma, do gráfico de dispersão e dos valores de PBIAS (indicado por valores positivos), foi possível notar que em média a tendência é de superestimava dos dados simulados em relação aos observados. Pelos hidrogramas, percebe-se que o fluxo de base simulado foi muito maior que o observado, além dos picos de vazão estarem muito altos. Valores muito altos de PBIAS também foram observados nos trabalhos de Fukunaga (2012), Oliveira (2014a) e Oliveira (2014b).

A avaliação do modelo, por meio da visualização do hidrograma, auxilia na interpretação do sistema hidrológico e serve de base para a seleção dos parâmetros a serem calibrados (ARNOLD et al., 2005).

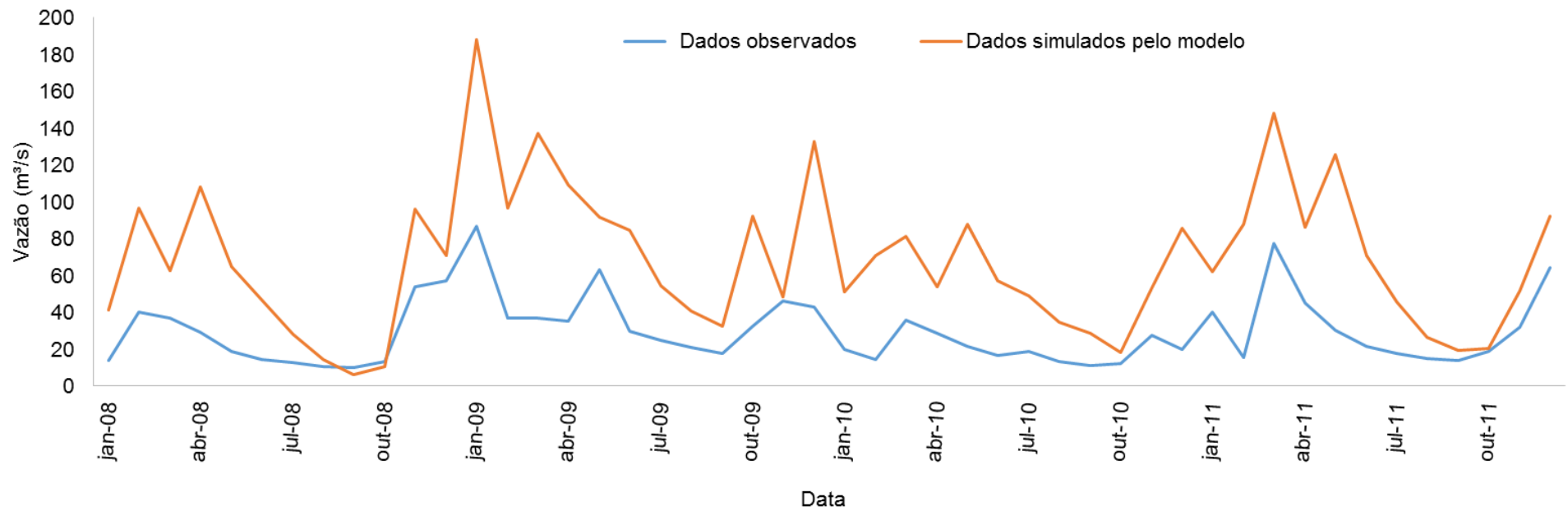


Figura 11. Hidrograma da vazão diária observada e simulada pelo SWAT, no período de 2008 a 2011, antes do processo de calibração.



Fonte: a autora.

Figura 12. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo SWAT, no período de 2008 a 2011, antes do processo de calibração.

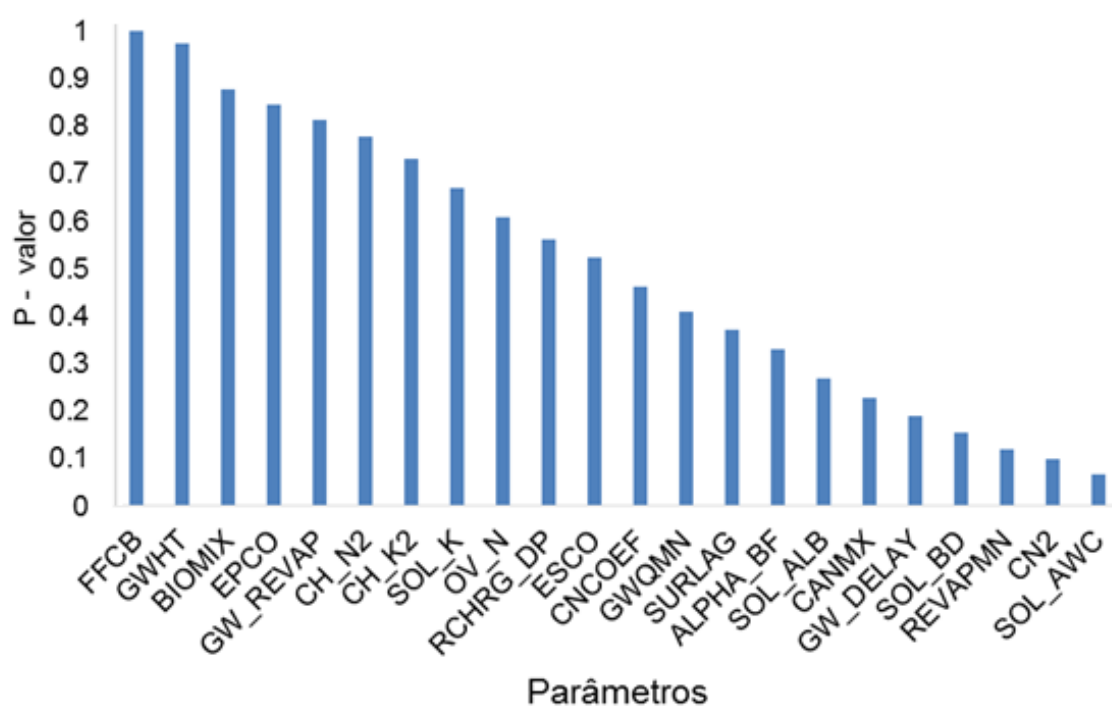


Fonte: a autora

## 5.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação

A Figura 13 mostra em ordem decrescente de sensibilidade os 22 parâmetros selecionados para análise de sensibilidade do modelo obtidos com o software SWAT-CUP, utilizando o método SUF-2. Na análise, os parâmetros com o menor valor-P são os mais sensíveis no modelo; consequentemente, aqueles em que a variação mais interfere na resposta da vazão (ABBASPOUR et al., 2015). O valor-P mede o grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas, é a porcentagem dos dados de medição suportado pela previsão de incerteza de 95% (ABBASPOUR, 2007). De acordo com Green e Van Griensven (2008), a classificação dos parâmetros dada pelo ranking da análise de sensibilidade considera a 1º posição como muito importante; entre a 2º e a 6º, importantes; sendo as demais posições, pouco importantes. Os parâmetros importantes foram: SOL\_AWC, CN2, REVAPMN, SOL\_BD, GW\_DELAY e CANMX.

Figura 13. Análise de sensibilidade do modelo SWAT para 22 parâmetros, em ordem decrescente de importância, obtidos na modelagem da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

O primeiro parâmetro mais sensível e, portanto, considerado muito importante foi o SOL\_AWC (capacidade de água disponível no solo), que é um dos componentes no balanço hídrico, representando uma relação inversa com outros componentes, pois o aumento dos valores de SOL\_AWC culmina na diminuição do escoamento de base, sendo capaz de reduzir significativamente a vazão quando esta é superestimada pelo modelo (KANNAN et al., 2007). Resultados semelhantes foram encontrados por Lelis et al. (2012) em uma bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil, com ênfase em quatro sub-bacias, sendo o parâmetro SOL\_AWC o mais sensível em uma das sub-bacias e, nas outras três, o segundo parâmetro mais sensível.

A segunda posição de maior sensibilidade foi o parâmetro CN2, que é o mais importante no cálculo do escoamento superficial. A diminuição dos valores do CN2 diminui também o escoamento superficial simulado, assim como aumenta a infiltração, afetando diretamente a fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT. Apesar de, neste trabalho, o CN2 ter sido classificado como segundo parâmetro mais importante, Peterson e Hamlett (1998) classificam o CN2 como o parâmetro mais sensível do modelo, por ser responsável pelo escoamento direto que pode ser gerado a partir de um evento de precipitação.

Os demais parâmetros importantes são: REVAPMN, SOL\_BD, GW\_DELAY e CANMX. O parâmetro CANMX é responsável pela retirada da água (mm) do sistema por meio da interceptação da cobertura vegetal. O modelo, além de considerar o processo de interceptação pela vegetação, é capaz de simular muito bem a transpiração das plantas, sendo muito bem indicado para bacias com grandes porcentagens de floresta, como é o caso da área de estudo do presente trabalho.

O GW\_REVAP representa uma fração de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular, o coeficiente “revap” de água subterrânea. O parâmetro REVAPMN controla a profundidade da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada, favorecendo sua percolação para o aquífero profundo. O parâmetro SOL\_BD, densidade aparente no solo, é inversamente proporcional à porosidade do solo, isto é, será menor a densidade quanto maior for a porosidade do mesmo solo, e a porosidade determina o teor máximo de água no solo (ARNOLD et al., 1990).

De acordo com Pechlivanidis et al. (2011) e Kannan et al. (2007), parâmetros do tipo físico, como a porosidade e condutividade hidráulica, são difíceis de serem medidos na prática; portanto, esses valores podem estar destoantes e não ter boa

representação nos processos influenciados por essas variáveis; por isso, devem ser calibrados.

Observa-se, conforme também constatado por Lelis et al. (2012), que o SWAT foi muito sensível aos dados referentes aos solos, sendo, portanto, altamente dependente de parâmetros com alta consistência e que representem as características físicas da bacia.

Estudos desenvolvidos também em bacias hidrográficas no estado do Espírito Santo apresentaram parâmetros semelhantes aos encontrados no presente estudo. Oliveira (2014b), em uma microbacia experimental no município de Aracruz - ES, obteve 6 parâmetros mais sensíveis: CN2, CAMNX, CH\_K2, ALPHA\_BF, SURLAGE e ESCO. Fukunaga et al. (2015), na estimação da vazão na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, na análise de sensibilidade do modelo, mencionam que os parâmetros mais sensíveis foram: CN2, GWQMN, ESCO, CANMX, SOL\_K e SOL\_AWC. No Brasil, em alguns trabalhos também foram classificados parâmetros semelhantes na análise de sensibilidade (DURÃES, 2010; LINO, 2009; FERRIGO, 2012; LELIS et al., 2012; MELO NETO, 2013; CASTRO, 2013; PAIM, 2012).

Souza e Santos (2013), realizando estimativa de vazões mínimas em uma bacia hidrográfica na região Sul do Brasil, também encontrou um valor de ALPHA\_BF próximo a 0,94 e um valor de GW\_REVAP exatamente de 0,15; valores próximos também foram encontrados em outros estudos no Brasil (SALLES, 2012; FUKUNAGA et al., 2015). Paim (2012) também calibrou o parâmetro RCHRG-DP com valor próximo ao encontrado nesse estudo. O parâmetro REVAPMN, que é a profundidade de água no limite do aquífero raso e que limita a quantidade de água para ocorrer o “revap”, foi diminuído. O parâmetro CH\_K2 teve seu valor aumentado, para aumentar assim a condutividade hidráulica efetiva no canal principal. Oliveira (2014b) e Salles (2012) encontraram em seus respectivos estudos esse parâmetro como um dos mais sensíveis pelo modelo, mas com valores um pouco abaixo do calibrado nesse estudo. O valor que, neste estudo, foi calibrado, assemelha-se ao do trabalho desenvolvido por Pinto (2011). O parâmetro CH\_N2 foi calibrado para 0,09, indicando fluxos naturais em área com muitas árvores e vegetação rasteira (CHOW, 1994). Oliveira (2014b) encontrou valor semelhante.

Pisinaras et al. (2010), em um estudo sobre modelagem hidrológica e qualidade da água de uma bacia de média com o modelo SWAT, também utilizaram para a calibração do modelo o parâmetro CN2, variando o seu valor para  $\pm 5$  em cada HRU. Obtiveram-se, com essa mudança, resultados melhores. Em seguida,

optou-se por calibrar o parâmetro SOL\_AWC, variando-o até que a vazão simulada estivesse coerente com a vazão observada. Foram alterados também os parâmetros GW\_REVAP, REVAPMN, GWQMN e RCGHG\_DP, para melhorar a performance do modelo; esses últimos parâmetros fizeram o ajuste da água subterrânea. Para ajuste do fluxo de base, utilizou-se o parâmetro ALPHA\_BF e, por último, para corrigir qualquer distorção do balanço hídrico na bacia, calibraram-se os valores de ESCO e EPCO. A contribuição das águas subterrâneas para transmitir as concentrações de nitrato foi ajustada, usando os parâmetros GWNO3 e NPERCO, a fim de calibrar os carregamentos de nitrato.

Dechmi, Burguete e Skhiri (2012), na aplicação do SWAT em bacia hidrográfica com sistemas de irrigação intensiva, na análise de sensibilidade realizada com os dados observados, a condutividade hidráulica (CH\_K2) foi o parâmetro mais sensível; ALPHA\_BF, SURLAG e CN2 tiveram uma sensibilidade média. Sem o uso dos dados observados, a sensibilidade dos parâmetros que controlam a água subterrânea e fluxo superficial foi o REVAPMN, classificado como o parâmetro mais sensível, seguido pelo da percolação do aquífero profundo (RCHRG\_DP) e da evaporação do solo fator de compensação (ESCO). Esses parâmetros foram seguidos pelos seis com sensibilidades médias (CN2, SOL\_AWC, SOL\_Z, GW\_DELAY, BLAI e ALPHA\_BF).

Observando as estimativas do modelo, pode-se explicar um bom ajuste dos picos máximos de vazão, principalmente pela alteração nos valores do CN2, SOL\_AWC e SOL\_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo em função do escoamento superficial; essa observação também corrobora com o trabalho de Fukunaga (2015).

A Tabela 7, mostra os índices estatísticos com o processo de calibração manual do modelo, percebe-se uma melhora significativa do ajuste; no entanto, como já era esperado, é preciso uma maior interação de um número maior de parâmetros, para que os valores dos índices estatísticos sejam aceitáveis e para haver maior concordância entre os dados observados simulação observados e os simulados.

Tabela 7. Índices estatísticos de verificação da simulação de vazões mensais com a calibração manual do modelo

Estatísticas	Sigla	Valores	Classificação
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe	NS	0,40	Insatisfatório
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe Modificado	NS'	0,27	Insatisfatório
Coeficiente de determinação	R <sup>2</sup>	0,46	Insatisfatório
Erro padrão médio normalizado	RSR	0,77	Insatisfatório
Percentual de tendência (%)	PBIAS	2,20	Satisfatório

O primeiro parâmetro modificado manualmente foi o SOL\_AWC. Aumentaram-se os valores iniciais de cada tipo de solo, então os valores foram somados por 0,3. Aumentando-se o valor de SOL\_AWC, há um aumento na capacidade de o perfil do solo aumentar a quantidade de água a ser armazenada, diminuindo o escoamento de base (OLIVEIRA, 2014b). Com apenas a alteração desse parâmetro, os índices estatísticos já melhoraram bastante, mas não satisfatoriamente.

Também com base na literatura, foram alterados: o valor do ESCO, os valores iniciais das HRU's foram diminuídos para 0,60; a equação para cálculo da Evapotranspiração Potencial (ETP), a qual foi modificada de Penman-Monteith para Hargreaves; o valor do parâmetro CANMX (Armazenamento máximo do dossel (mm)) nas HRU's, modificado a 15 mm na cultura do eucalipto e 26 mm para floresta; GW\_DELAY, de 31 dias para 200 dias; GW\_REVAP para 0,05; e REVAPMN, de 750 mm para o valor de 500 mm.

Dependendo da variação do valor de ESCO, o modelo pode disponibilizar uma maior quantidade de água de níveis mais profundos do solo, modificando a profundidade do solo que terá contribuição para sua demanda evaporativa. O valor de ESCO foi diminuído, a fim de aumentar a demanda evaporativa do solo e a evapotranspiração; a diminuição do valor de ESCO também foi observada por outros estudos em diferentes bacias hidrográficas brasileiras (BONUMÁ et al., 2015; MENEZES, 2009; PAIM, 2012; STRAUCH et al., 2012).

Com o aumento dos valores do parâmetro CANMX, aumentou-se a evapotranspiração e obteve-se a diminuição dos picos máximos de vazão. Esse parâmetro também está relacionado com o escoamento superficial, isto é, o aumento do seu valor tende a diminuir o escoamento. O parâmetro GW\_DELAY foi aumentado e resultou em uma resposta melhor no modelo; foi modificado para

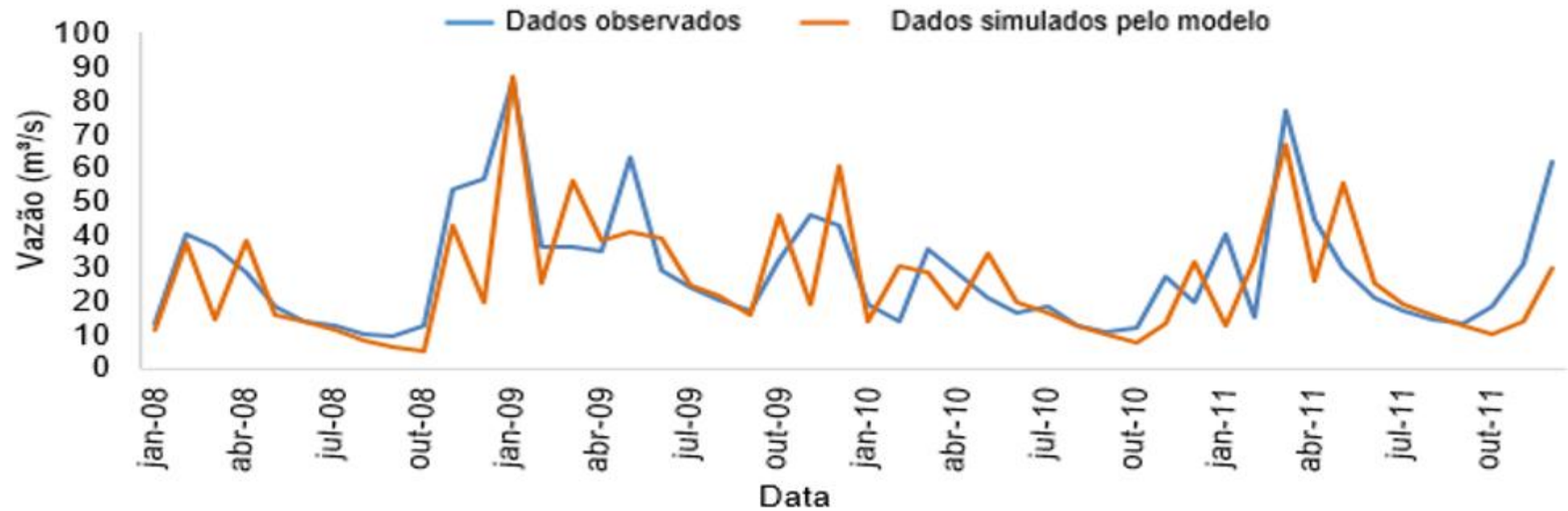
representar uma resposta mais lenta da água subterrânea para a descarga no rio, e sabe-se que valores próximos também foram encontrados por Fukunaga et al. (2015).

Essas mudanças foram significativas para aumentar o armazenamento de água no solo, diminuir o fluxo de base e aumentar a taxa de evapotranspiração, resultando em uma melhora muito significativa nos índices estatísticos, principalmente para o índice NS mensal, que passou para 0,40 (Tabela 7). No entanto, todos esses procedimentos não foram suficientes ainda para realizar a validação do modelo; deu-se início então à calibração automática dos parâmetros do modelo.

Na Figura 14, que representa o hidrograma mensal com o resultado da calibração manual, é possível observar uma melhora com a calibração manual entre a vazão simulada e observada. No entanto, verifica-se também que, em alguns pontos, o fluxo de base foi muito menor que o real. Os procedimentos feitos na calibração manual foram melhor observados para reduzir os picos máximos de vazão.



Figura 14. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo modelo SWAT, no período de 2008 a 2011, depois do processo de calibração manual dos parâmetros do modelo.



Fonte: a autora.

A Tabela 8 mostra os parâmetros selecionados para realizar a calibração do modelo, seus limites físicos de variação, valores iniciais e os valores ajustados.

Tabela 8. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da simulação da vazão com o modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu

Parâmetro	Limites	Valor inicial	Valor calibrado
CN2	±0,5	25-79	- 35%*
ALPHA BF	0-1	0,48	0,94
GW_DELAY	0-450	31	304,89
SOL_AWC	±0,5	0,017-0,29	21%
ESCO	0,01-1	0,95	0,65
REVAPMN	0-1000	750	446,42
SURLAGE	1-24	2	7,16
SOL_BD	0,9-2,5	1,5	2,05
GWHT	0-25	1	0,3
EPCO	0,01-1	1	0,03
BIOMIX	0,2-1	0,2	0,41
CH_K2	0-130	0	42,62
FFCB	0-1	0	0,99
OV_N	0,1-30	0,1-0,15	0,14
GWQMN	0-5000	1000	1953,57
GW_REVAP	0,02-0,2	0,02	0,15
RCHRG_DP	0-1	0,05	0,67
CAMMX	0-100	0	63,35
CNCOEF	0,5-2	1	0,91
SOL_K	±0,5	6,01	5%
SOL_ALB	0-1	0,28	0,33
CH_N2	0,01-0,3	0,014	0,09

\*Valor médio utilizado, considerando que os valores do CN variam com o tipo de solo e uso da terra.

Na Tabela 9 encontram-se os índices estatísticos após o processo de calibração manual e automática do modelo para os dados diários e mensal. Para a calibração mensal, obtiveram-se resultados satisfatórios para todos os parâmetros; já para o processo de calibração diária, estatisticamente não foram satisfatórios; no entanto, pela análise do hidrograma, é possível perceber que há uma tendência coerente entre os valores observados e simulados. É sabido que a calibração diária é um processo mais complexo que em escalas maiores; por isso, os valores dos índices estatísticos podem ser menos rigorosos (MORIASI et al., 2007). O NS e NS', com valores de 0,30 e 0,36, são aceitáveis para a escala diária (Tabela 9), o índice

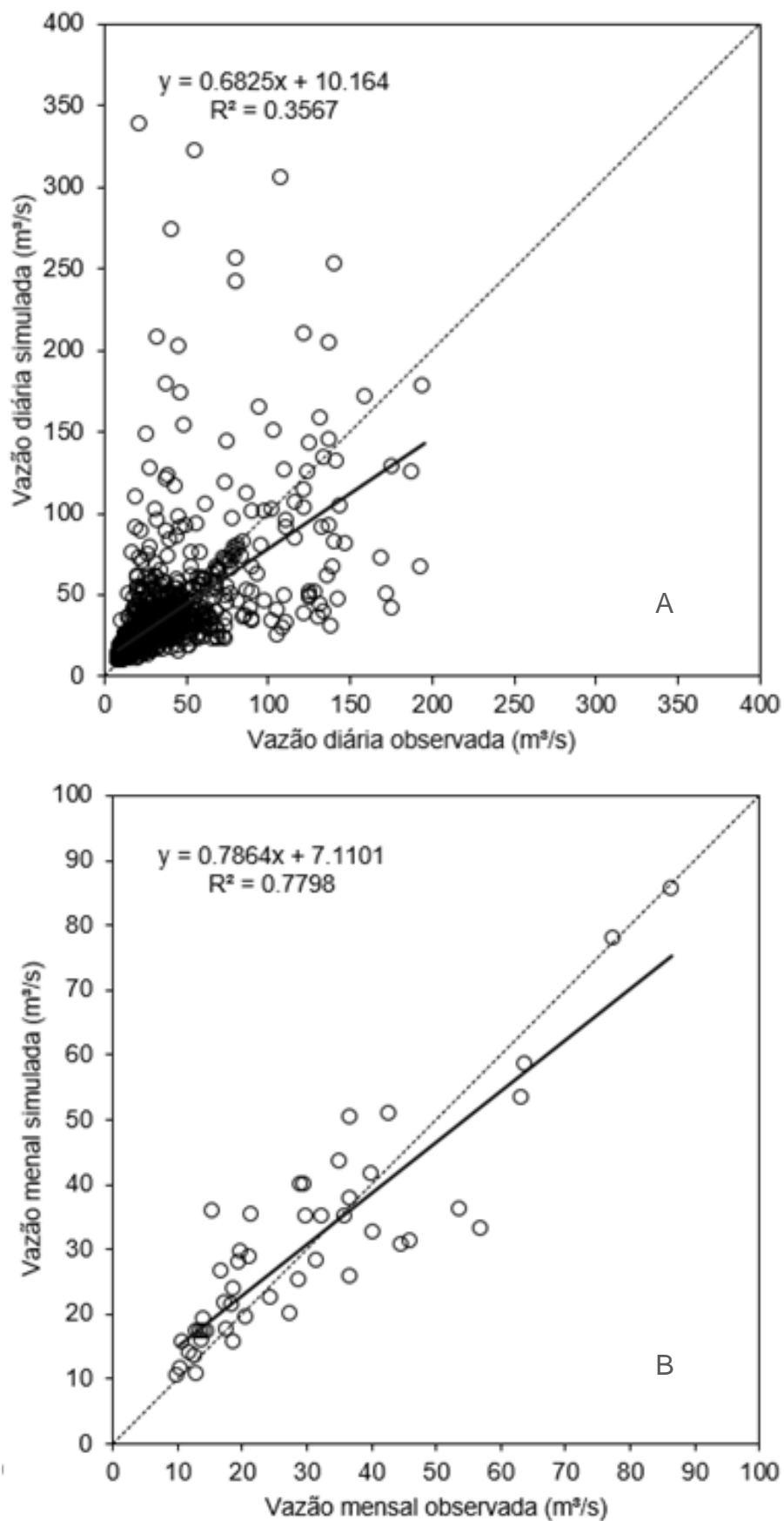
PBIAS, com valores positivos mostram que os dados têm tendência média a superestimava do modelo.

Tabela 9. Índices estatísticos de verificação da simulação de vazões diárias e mensais com a calibração manual e automática do modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu

<b>Estatísticas</b>	<b>Escala temporal</b>	<b>Valores</b>
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	Diária	0,06
	Mensal	0,78
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado (NS')	Diária	0,36
	Mensal	0,55
Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	Diária	0,35
	Mensal	0,72
Erro padrão médio normalizado (RSR)	Diária	0,97
	Mensal	0,47
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	Diária	0,05
	Mensal	0,07

A Figura 15 mostra a dispersão dos dados para a escala diária e mensal, por meio da qual é possível notar que houve uma melhora significativa no ajuste da vazão simulada em comparação às vazões observadas; observa-se também que o modelo mesmo depois de calibrado manteve uma tendência média de superestimar os dados. O bom ajuste mensal dos dados com calibração pode ser visualizado pelo valor do  $R^2$ , que foi de 0,56 para 0,77; o coeficiente angular, que passou de 1,62 para 0,78; e coeficiente linear, de 20,09 para 7,11. Para os dados diários, o  $R^2$  passou de 0,17 para 0,35; o coeficiente angular, de 1,32 para 0,68; e o linear, de 28,695 para 10,16. Essa análise preliminar deve ser feita para verificar se a qualidade do ajuste é satisfatória e se os desvios também são baixos; um ajuste perfeito requer que o coeficiente angular da reta e o coeficiente linear sejam iguais, respectivamente, a 1 e 0. Pode-se dizer que a qualidade do ajuste mensal é satisfatória, analisando esses coeficientes, e na escala diária, insatisfatório.

Figura 15. Correlação entre a vazão diária (A) e mensal (B) com dados observados e simulados para bacia hidrográfica do rio Jucu.



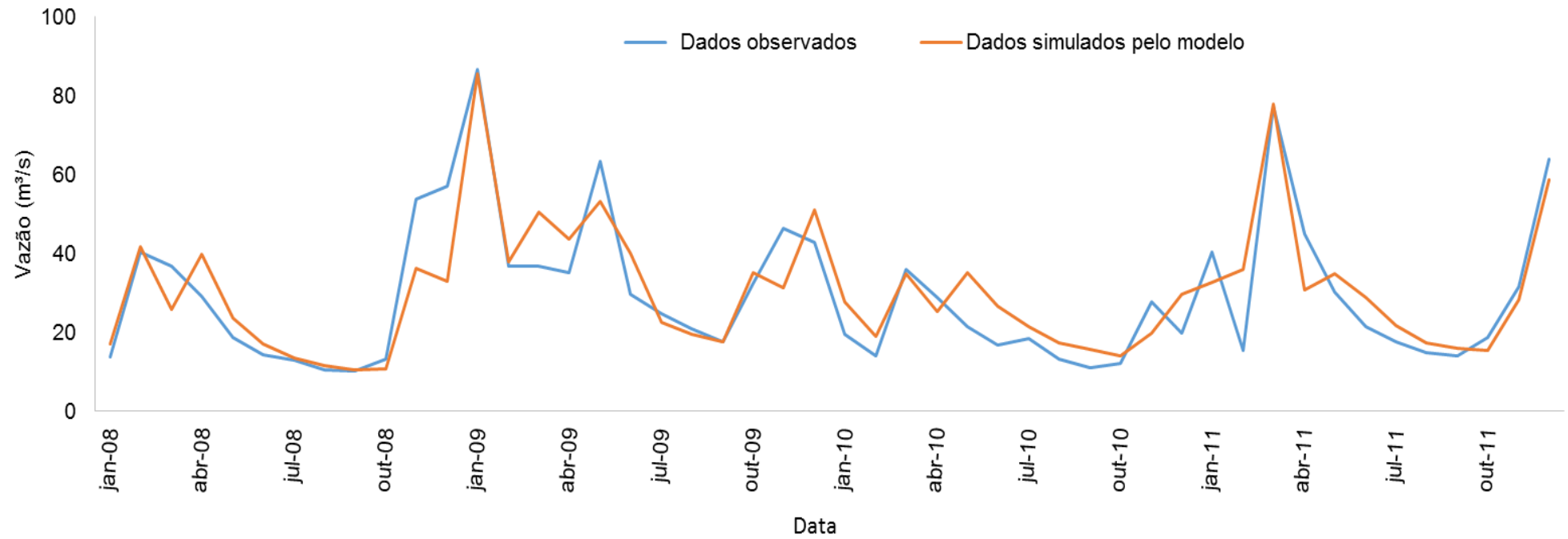
Fonte: a autora.

Como citado anteriormente, a calibração em escala diária é um processo complexo. Pode-se notar na literatura que é comum um ajuste não muito bom para dados diários. Ferrigo (2012) encontrou índices estatísticos para simulações diárias, com valores de NS e  $R^2$  respectivamente de 0,40 e 0,44, apesar de ser valores baixos comparados a escala mensal, é considerado satisfatório para escala diária.

Com a análise dos hidrogramas (Figuras 16 e 17), notou-se que a calibração foi muito eficiente para ajustar os picos máximos de vazão, assim como para o escoamento de base, ambos superestimados pelo modelo não calibrado; fica, portanto, nítida a compensação entre a subestimação e a superestimação do modelo, fazendo com que os valores do PBIAS, tanto em escala diária como mensal, refletissem-se em valores ótimos, classificados assim como satisfatórios.

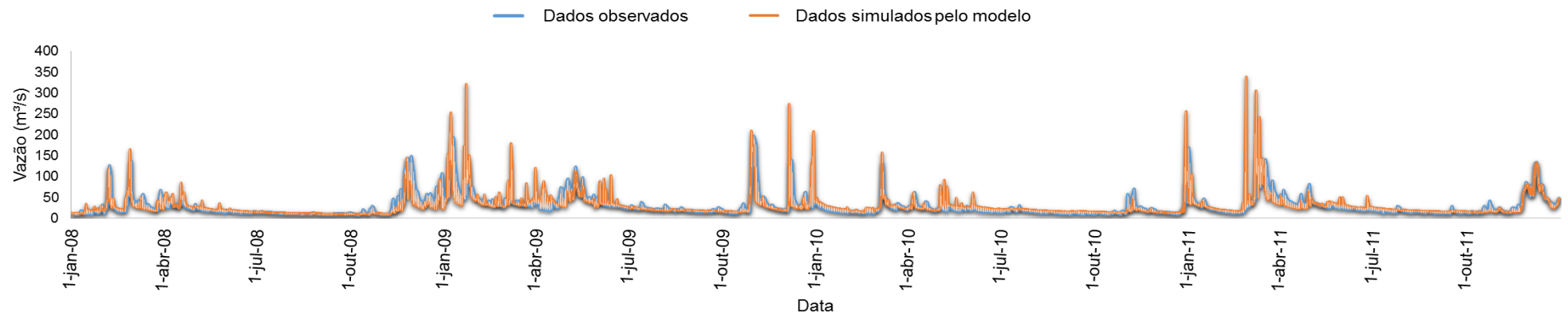
É importante ressaltar que a calibração não garante a fidelidade da representação do comportamento da bacia hidrográfica em estudo, pois ela apresenta incertezas, as quais são minimizadas quando são inseridos dados em qualidade e quantidade para o processo de calibração do modelo, a fim de melhor representar a variabilidade natural anual dos componentes do balanço hídrico (LELIS et al., 2011).

Figura 16. Hidrograma da vazão diária observada e simulada pelo modelo SWAT, no período de 2008 a 2011, após processo de calibração.



Fonte: a autora.

Figura 17. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo modelo SWAT, no período de 2008 a 2011, após processo de calibração.



Fonte: a autora.

### 5.3 Validação do modelo

A Tabela 10 mostra que o modelo respondeu bem ao processo de validação dos dados. Os índices estatísticos do modelo se comportaram melhor no período de validação.

Tabela 10. Índices estatísticos de validação da simulação de vazões diárias e mensais com a calibração manual e automática do modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu

<b>Estatísticas</b>	<b>Escala temporal</b>	<b>Valores</b>
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	Diária	0,31
	Mensal	0,83
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado (NS')	Diária	0,35
	Mensal	0,54
Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	Diária	0,46
	Mensal	0,76
Erro padrão médio normalizado (RSR)	Diária	0,83
	Mensal	0,42
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	Diária	-0,01
	Mensal	-0,01

Os índices estatísticos para escala diária foram quase todos satisfatórios, assim como na fase de calibração dos dados diários; porém, essa é uma classificação para escalas mensais, podendo ser menos rigorosas para dados diários. Foi possível notar uma ligeira melhora dos índices estatísticos dos dados diários para a fase de validação, o que pode ser explicado por uma maior regularidade na vazão simulada e observada, havendo no período de validação somente um pico máximo de vazão, que foi bem simulado pelo modelo. O escoamento de base também foi bem simulado pelo modelo. Para os dados diários, o NS ajustado apresentou valor maior do que o NS, devido a amplitude de superestimativa dos dados diários ter sido menor do que na escala mensal. O NS com valor de 0,35 já é considerado aceitável, pois somente valores negativos para esse parâmetro são avaliados como péssimo ajuste (MORIASI et al., 2007).

O  $R^2$ , o coeficiente angular e o coeficiente linear também apresentaram valores razoáveis, 0,49, 0,79 e 5,22, respectivamente para escala diária. Na Figura 18, no gráfico de dispersão, é possível perceber uma tendência média de subestimação



dos dados simulados pelo modelo. Em comparação aos resultados da fase de calibração do modelo, é possível notar uma menor dispersão dos dados simulados. O RSR apresentou valor de 0,83, sendo considerado aceitáveis valores abaixo de 0,7. Pelo índice PBIAS, resultou em valores próximos de zero, não sendo possível realizar afirmações de subestimativa ou superestimativa através desse índice.

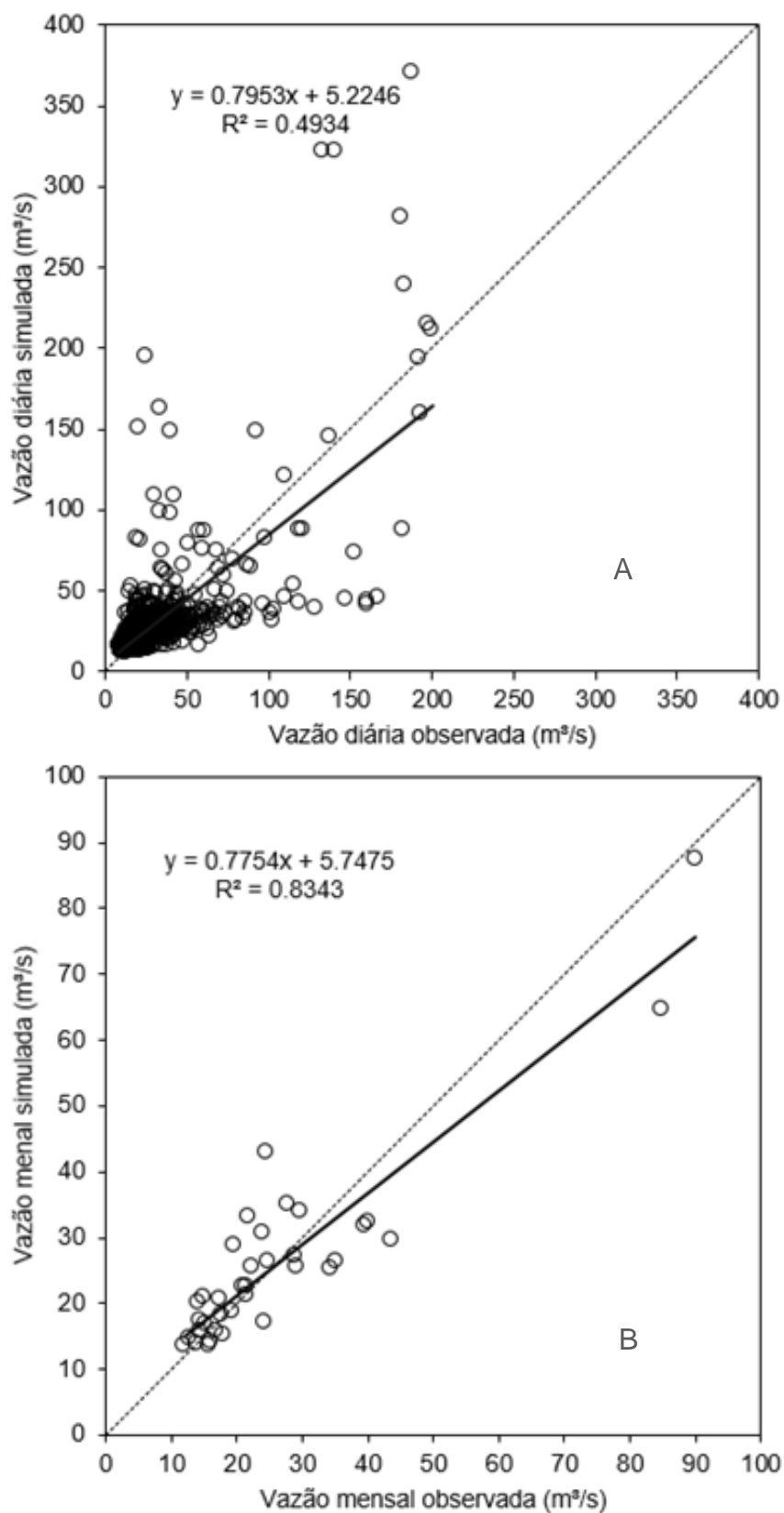
Ainda que a calibração do modelo para dados diários pela classificação proposta por Moriasi et al. (2007) foi considerada insatisfatória para os índices estatístico NS, RSR e  $R^2$ , pode-se considerar que o desempenho das simulações foi satisfatório considerando todas as limitações da base de dados utilizadas no presente estudo, principalmente por conta do tamanho da série de dados climáticos, da consistência dos dados e da falta de levantamento de dados de solo.

Para a validação dos dados mensal, todos os índices estatísticos mostraram um bom desempenho. O valor de NS foi classificado como muito bom, e o NS', satisfatório. O  $R^2$ , o coeficiente angular da reta e o coeficiente linear, em relação ao modelo sem calibração ou à etapa de calibração, apresentaram valores melhores: 0,83, 0,77 e 5,74, respectivamente, por meio da análise do gráfico de dispersão (Figura 18). O RSE e o PBIAS apresentaram valores classificados como muito bons; o valor negativo do PBIAS (-0.27%) indica uma subestimação dos dados.

De acordo com Bressiani et al. (2015), dos 102 estudos brasileiros do SWAT que foram desenvolvidos entre 1999 e 2013, 65% deles apresentaram valores de NS na calibração ou validação de vazão com os seguintes resultados: 94% dos valores de NS mensais apresentaram valores maiores que 0,5 (considerado satisfatório); 90% dos valores de NS mensais foram classificados como "bom" e "muito bons"; e aproximadamente 75% das estatísticas com dados diários com  $NS < 0,5$  (insatisfatórios).

Levando em consideração que a qualidade do processo de calibração e validação do modelo é extremamente dependente da consistência da base de dados e baseado na análise dos índices estatísticos dos gráficos e hidrogramas (Figuras 19 e 20), foi possível afirmar que o SWAT apresentou resultados satisfatórios na simulação de vazão, assim pode ser eficiente para dar suporte em estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Jucu. Com a validação do modelo, foi possível confirmar a acurácia do mesmo, sendo possível gerar outros produtos e análises na bacia, como a simulação de cenários de mudança no uso atual da terra.

Figura 18. Correlação entre a vazão diária (A) e mensal (B) com dados observados e simulados para bacia hidrográfica do rio Jucu.



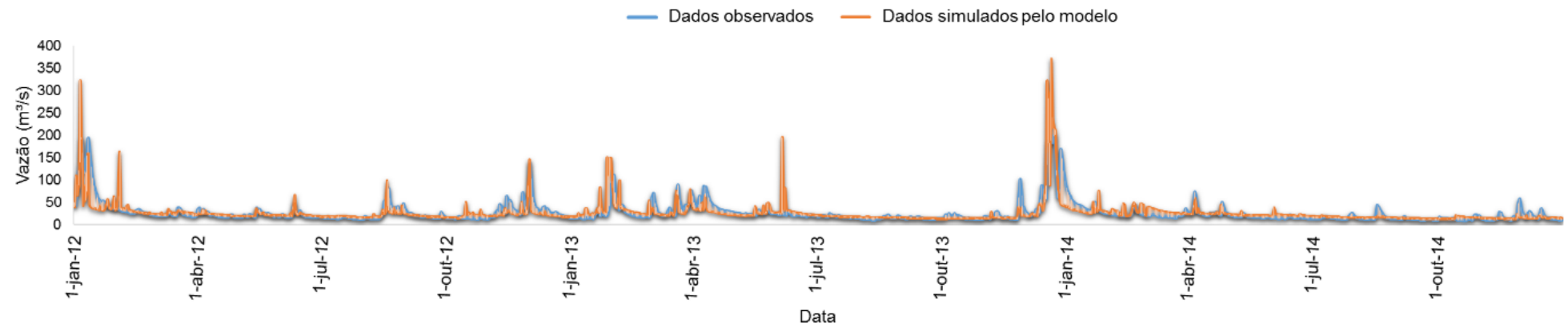
Fonte: a autora.

Para a mesma área de estudo, a bacia hidrográfica do rio Jucu, Oliveira (2014a), testou a capacidade preditiva do modelo físico e distribuído DHSVM, no aspecto hídrico quantitativo. O modelo DHSVM, assim como o SWAT, utiliza variáveis climáticas, vegetacionais e edáficas. O modelo possui um alto nível de detalhamento e consegue representar muito bem os processos hidrologia-vegetação (WIGMOSTA et al., 1994).

O autor obteve no processo de validação dos dados diários um valor de NS de 0,83, NS' de 0,54, PBIAS -1,55, e RSR de 0,38, pela análise o modelo apresentou desempenho satisfatório. Na análise de dispersão dos dados, o coeficiente angular, coeficiente linear e o  $R^2$  apresentaram valores de 0,77, 2,10 e 0,87, respectivamente. Para todos os índices estatísticos o DHSVM, na escala diária, foi satisfatório.

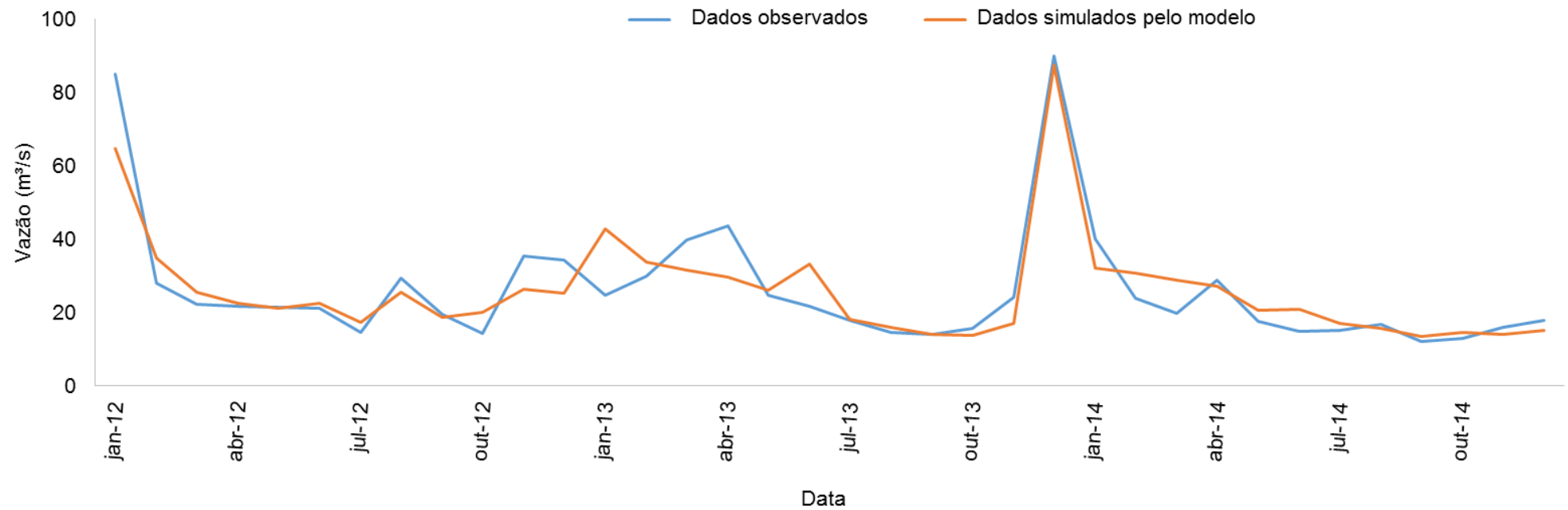
Tanto o modelo SWAT como o DHSVM foram validados e podem ser utilizados em trabalhos, pesquisas e projetos na bacia hidrográfica do rio Jucu. No entanto, na escolha de qual modelo utilizar deve ser considerada a praticidade do uso, disponibilidade dos dados, facilidade e experiência dos usuários entre outras variáveis.

Figura 19. Hidrograma da vazão diária observada e simulada pelo modelo SWAT, no período de 2008 a 2011, na etapa de validação do modelo.



Fonte: a autora.

Figura 20. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo modelo SWAT, no período de 2008 a 2011, na etapa de validação do modelo.

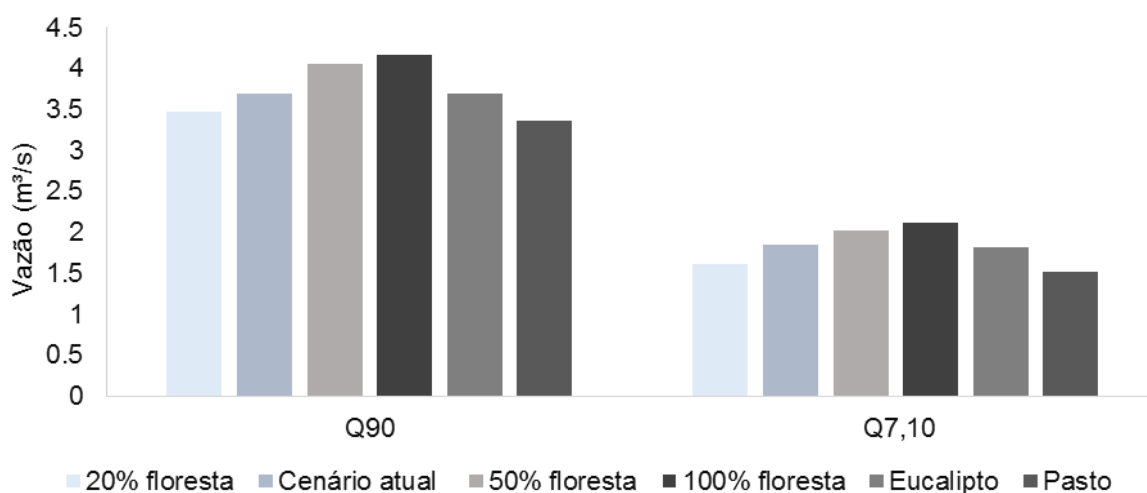


Fonte: a autora.

#### 5.4 Simulação de cenários

A disponibilidade hídrica, demonstrada pelas vazões mínimas  $Q_{90}$  e  $Q_{10}$  (Figura 21), evidencia a importância do uso da terra com maiores porcentagens de florestas, reiterando a importância das florestas no período de estiagem, quando mantêm uma maior vazão nos cursos hídricos, devido principalmente a maior infiltração da água, no período chuvoso, porque os processos hidrológicos de subsuperfície são favorecidos, alimentando o fluxo de base (BRUIJNZEEL, 2004).

Figura 21. Vazões mínimas  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$  encontradas pelo programa SisCAH 1.0 para os cenários estudados na bacia hidrográfica do rio Jucu.



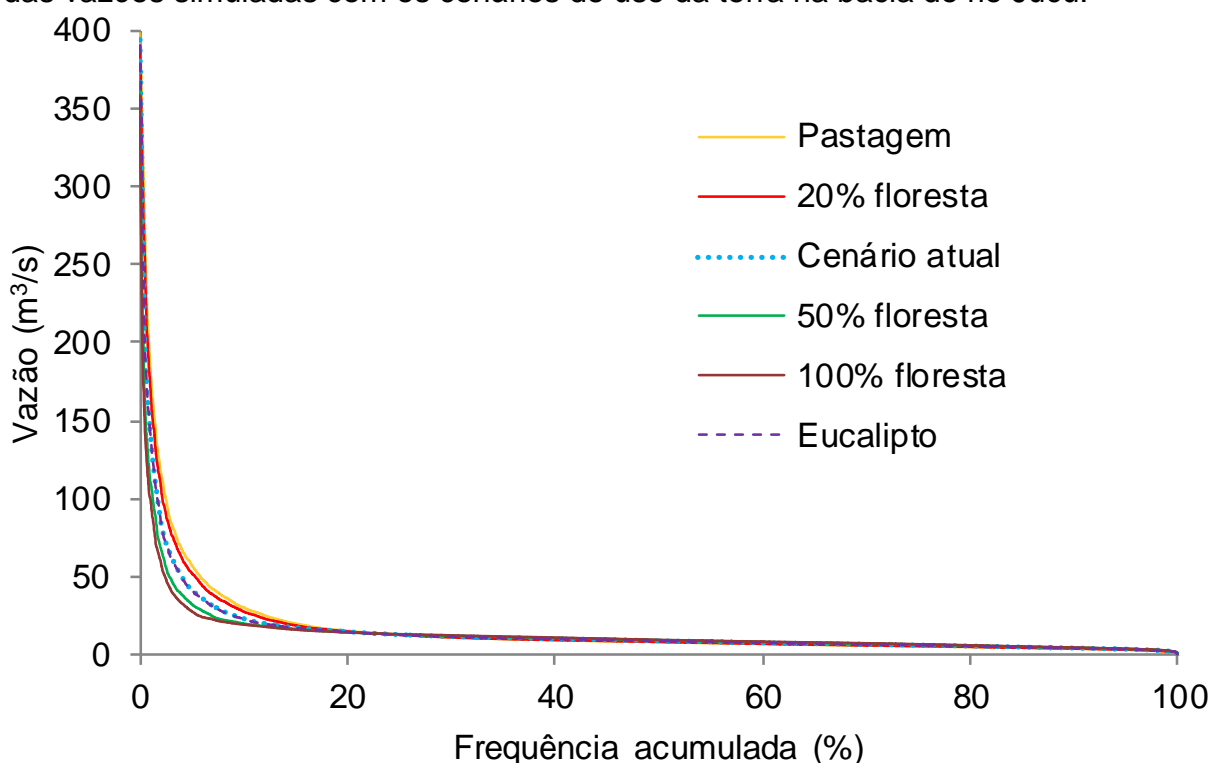
Fonte: a autora.

As vazões mínimas  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$  se comportaram de forma bem interessante em relação ao cenário atual (F36). Para a vazão mínima  $Q_{7,10}$ , em relação ao cenário atual (2), o cenário 4 (F100) apresentou a maior vazão mínima, seguido do 3 (F50), representando um aumento de 14,59% e 9,18% respectivamente. Para os cenários 6 (P100), 1 (F20) e 5 (E100), em relação ao cenário atual (3), houve uma diminuição de 18,37%, 12,91% e 1,62% da vazão respectivamente. Para  $Q_{90}$  o cenário 4 (F100), aumentou em 12,43%, o cenário 3 (F50) em 9,72%, já os cenários 1 (F20) e 6 (P100) houve redução da vazão mínima em 6,21% e 9,18%, respectivamente. A diminuição das vazões mínimas devido ao reflorestamento com eucalipto pode ser

observada em alguns trabalhos (FARLEY; JOBBÁGY; JACKSON, 2005; MELLO, 2013; PEREIRA, 2013). Já em outras pesquisas, é possível constatar que maiores áreas com cobertura da terra com florestas, proporcionam maiores vazões mínimas (VIGNOLA, 2009; SMETHURST; ALMEIDA, 2015).

Na Figura 22 são apresentadas as curvas de permanência para os cenários analisados no estudo. A curva de permanência delinea a relação entre a vazão de um curso d'água e a frequência de ocorrência de vazões (PRUSKI, 2006). Pelo gráfico, é possível observar que, ao se fixar um determinado valor de vazão, como por exemplo  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , os valores de frequência variam entre os cenários, sendo menores para os cenários com maiores áreas de floresta (F50 e F100), e maiores para os cenários F20, P100, E100 e F36, indicando maiores deflúvios (perdas de água) em bacias com menor área florestal.

Figura 22. Curvas de permanência calculadas pelo programa SisCAH 1.0 a partir das vazões simuladas com os cenários de uso da terra na bacia do rio Jucu.



Fonte: a autora.

Como as bacias com mais florestas retêm mais água, essas apresentam maiores vazões nos períodos de estiagem. As maiores vazões mínimas encontradas nos cenários F100, F50 e E100, respectivamente, podem ser explicados pelos

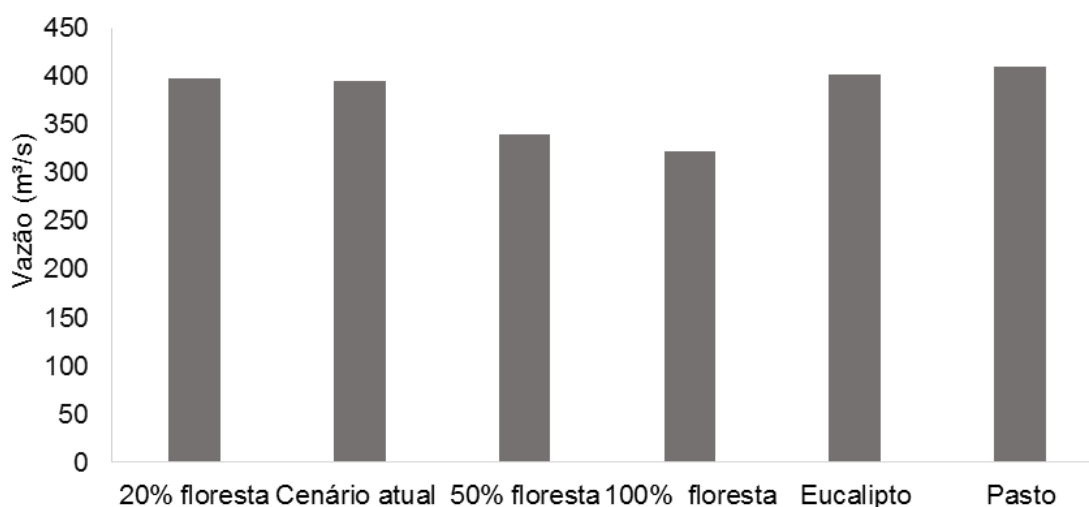
benefícios que as florestas trazem para o solo, em reter umidade, fornecer maior proteção devido a presença da serapilheira, manutenção da microfauna do solo e fendas criadas pelas próprias raízes. As florestas atenuam a erosão hídrica e o escoamento superficial, propiciam maior infiltração e maior recarga dos aquíferos, levando a uma diminuição lenta do escoamento (regularização), regido pela contribuição subterrânea (SOUZA; SANTOS, 2013).

Conseqüentemente, as vazões máximas (Figura 23) (vazões de cheias) se comportaram contrárias às vazões mínimas. Pode-se observar que os cenários com maiores porcentagens de floresta, obtiveram os menores valores de vazões de enchentes, devido a importância das florestas em regularizar a distribuição da vazão ao longo do ano e no suprimento de água para a recarga dos aquíferos, evitando picos máximos de vazão de grande amplitude.

O cenário 6 (P100) apresentou a maior vazão máxima, representando um aumento de 3,62% em relação ao uso atual (F36), seguido do cenário 1 (F20) com aumento de 0,61%, para os cenários 4 (F100), 3 (F50) e 5 (E100), as vazões máximas foram menores que a do uso atual, menores em 18,46%, 14,06% e 1,43%, respectivamente. Em outros trabalhos foi possível encontrar resultados semelhantes ao do presente estudo, onde o aumento da porcentagem de floresta nativa ou plantada, reduz as vazões máximas (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013; GOMES et al., 2008; PEREIRA, 2013).



Figura 23. Vazões mínimas máximas (Q10) encontradas pelo programa SisCAH 1.0 para os cenários estudados na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

O efeito-tampão produzido pelas florestas, amenizando os picos de vazão nos períodos de alta pluviosidade, impede uma série de consequências que são danosas aos cursos d'água, como a sedimentação, erosão, inundação das margens dos rios, entupimento dos condutos e canais, degradação da qualidade da água e aumento do escoamento superficial logo após um evento de chuva (CARDOSO et al., 2006).

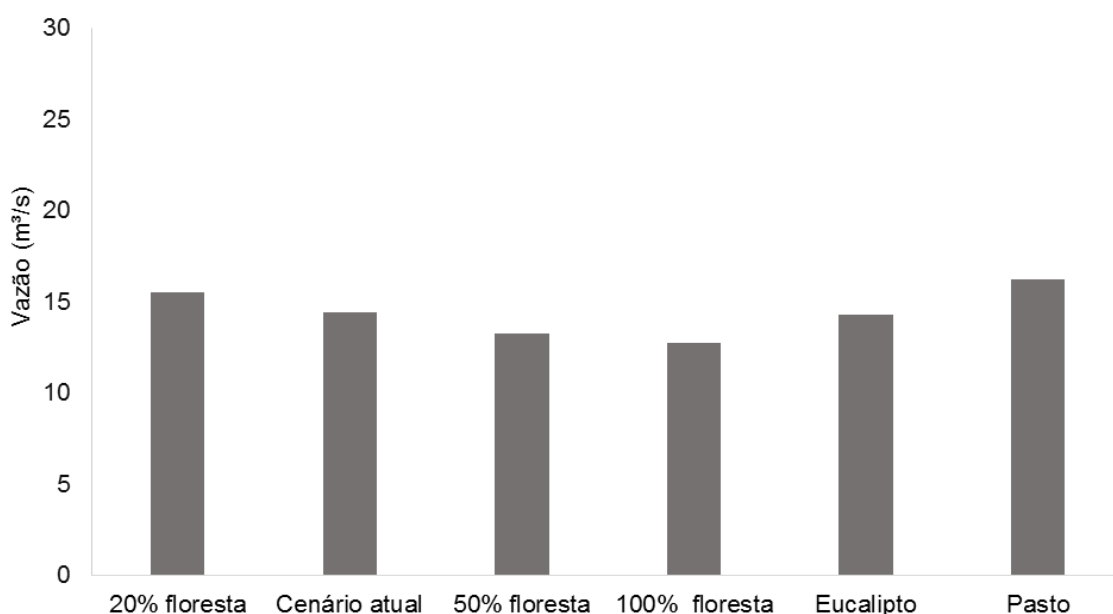
Os cenários com maiores picos de vazão máxima, significa que menos água ficou retida dentro da bacia hidrográfica, segundo Valente e Castro (1983), uma bacia hidrográfica não deve funcionar como ambiente impermeável, onde a maior parte da água da chuva reflita na vazão do rio. A bacia hidrográfica deve reter boa parte de água da chuva, armazená-la no lençol subterrâneo e cedê-la aos poucos aos cursos d'água, mantendo certa vazão durante os períodos de seca.

Devido a maior capacidade das bacias hidrográficas, com grandes áreas de cobertura florestal, em reter a água da chuva e apresentar maiores valores de evapotranspiração e interceptação de água pelas copas, pode-se observar na análise da vazão média mensal (Figura 24) e anual (Figura 25) dos 30 anos hipotéticos simulados no trabalho gerados pelo SisCAH 1.0, que a vazão média dos cenários de floresta (F100, F50) é menor do que no cenário de pastagem, por exemplo. No entanto, esse resultado só foi alcançado porque os cenários de incremento nas porcentagens de floresta, armazena maior quantidade de água dentro do sistema, o que é muito benéfico para o equilíbrio ambiental, abastecimento humano e para diversas atividades econômicas (BUENO et al., 2005).

Com a análise do gráfico (Figura 24), percebe-se que o cenário 6 (P100) apresentou o maior valor de vazão média, seguido do cenário 1 (F20). O cenário 4 (F100) apresentou o menor valor de vazão média, seguido pelo cenário 3 (F50), enquanto o cenário 5 (E100) gerou valor médio de vazão similar ao cenário atual (F36).

O fato do cenário 6 (P100) ter apresentado maior valor de vazão média, está associado a menor infiltração da água proporcionada por esse tipo de vegetação, devido ao sistema radicular ser menos profundo; apresentar menor taxa de evapotranspiração, resultando em uma menor retirada de água do solo; e aumento do escoamento superficial, ou seja menos água ficou armazenado dentro da bacia hidrográfica. Percebe-se que quanto maior é o incremento da porcentagem de floresta (F50; F100), existe uma tendência de diminuição da vazão média, pode ser explicada pela maior interceptação da precipitação pluvial ocasionada pela copa das árvores, o que implica em menor quantidade de água chegando ao subsolo. Perazzoli et al. (2013) encontraram um acréscimo de vazão no cenário de pastagem e uma redução na vazão média para o cenário de floresta, ambos em relação ao cenário atual, em estudo para simulações de cenários de uso da terra.

Figura 24. Vazões médias ( $Q_{méd}$ ) dos cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do Jucu.



Fonte: a autora.

Em relação ao cenário atual (F36), o uso da terra substituído pelo cenário 6 (P100), proporcionou um aumento de 12,68% na vazão média da bacia, e o cenário 1 (F20) representou 7,53% de aumento na vazão média. Os cenários 4 (F100), 3 (F50) e 5 (E100), representaram um decréscimo de 11,55%, 8,18% e 0,90% na vazão média, respectivamente. O fato do cenário 6 (P100) ter apresentado a maior vazão média, não justifica que isso deve ser visto como uma boa estratégia para a gestão hídrica e conservação da água, uma vez que, a pastagem resulta em um maior escoamento superficial, favorecendo a erosão hídrica e a carga de sedimentos.

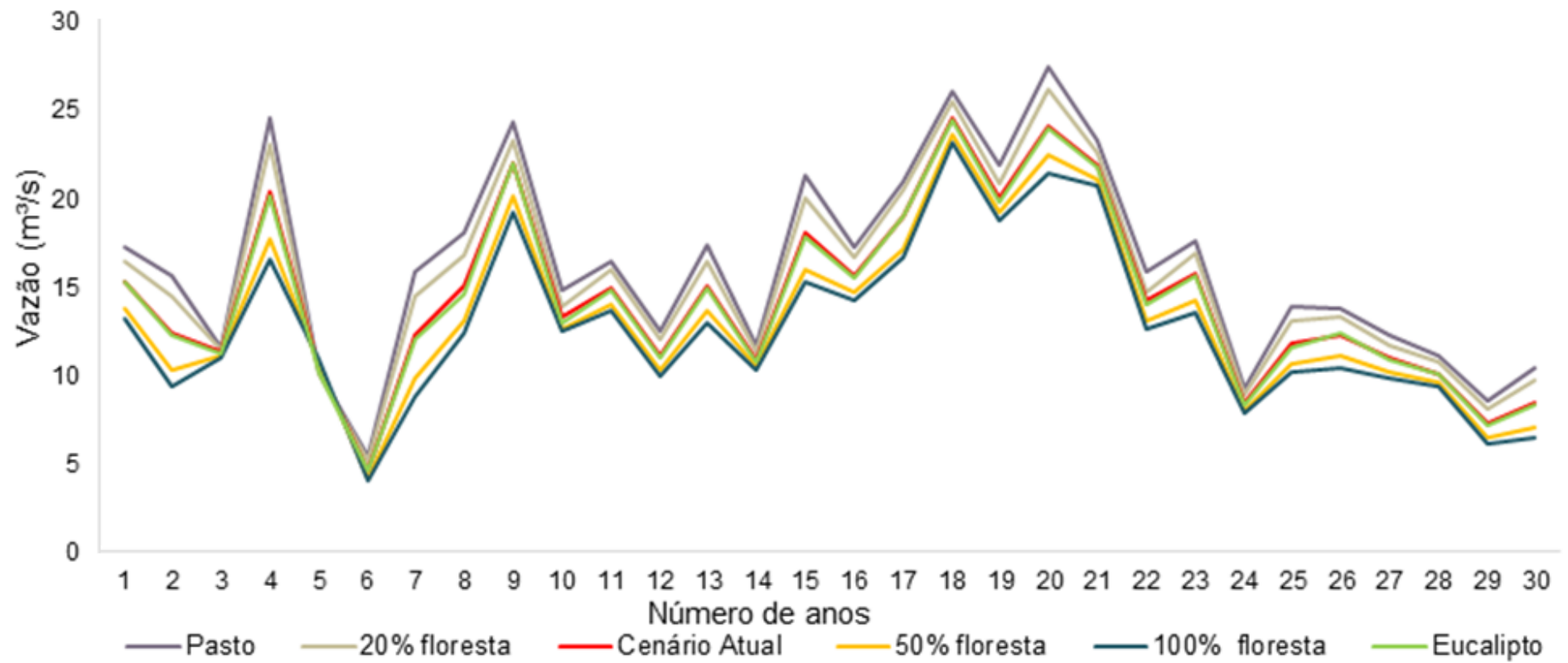
Apesar de a floresta trazer uma série de benefícios para manter a perenidade dos cursos d'água, a recarga dos lençóis freáticos e maior qualidade da água, bacias hidrográficas com maior porcentagem de áreas verdes levam a um aumento da evapotranspiração (ET) e da interceptação das precipitações pelo dossel. Portanto, para que o fluxo de água no rio se mantenha, é importante que o balanço da infiltração com a evapotranspiração potencial e da interceptação seja positivo, para que a infiltração compense esses dois processos (SALEMI et al., 2013).

Já no caso do eucalipto, como é uma espécie florestal de crescimento rápido, utiliza mais água no seu crescimento do que floresta nativa já estabelecida (KAGAWA et al., 2009; MEINZER et al., 2005). A tendência geral esperada com a substituição de pastagem por floresta plantada seria redução da vazão média, conforme mostrado por dados experimentais de alguns estudos (LOCATELLI; VIGNOLA, 2009; SCOTT; PRINSLOO, 2009). O comportamento da vazão média diminuir com o plantio de eucalipto também foi evidenciado em simulações com reflorestamento por eucalipto, realizadas por pesquisadores no Brasil (PEREIRA, 2013; FERRAZ; LIMA; RODRIGUES, 2013; MELLO et al., 2008).

Pereira (2013) aplicou o modelo SWAT para simulação de cenários de diferentes usos da terra para estudo do comportamento hidrológico, realizou simulação também das vazões máximas e mínimas para diferentes tempos de retorno e mínima de referência para outorga de água. Os cenários de uso da foram: APP's e substituição de 18,75% (10% da área total da bacia) da área coberta por pastagem por eucalipto e agricultura. Como resultado, no cenário de APP's e eucalipto houve uma redução média anual do escoamento, tanto na vazão máxima como na mínima, sendo uma redução maior para cenário de APP, para o cenário de agricultura, houve uma redução menor no escoamento, em relação aos outros cenários e um aumento nas vazões máximas.

Diante disso, a quantidade de água que sai da bacia (Vazão) não pode ser o único critério a ser avaliado nas alterações de uso da terra. Neste estudo, as vazões mínimas e a máxima, foram bons indicativos para avaliação dos cenários.

Figura 25. Hidrograma representativo da vazão média para os diferentes cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora

## 6.CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que, para a área em estudo, os cenários 4 (F100) e 3 (F50) foram capazes de manter maior vazão em períodos de seca, expressos pelas vazões mínimas  $Q_{7,10}$  e  $Q_{90}$ . Contrariamente, esses cenários com maiores porcentagens de florestas apresentaram os menores valores de vazões máximas e médias, evidenciando a importância das florestas para maior infiltração de água na bacia.

Por outro lado, os cenários 6 (P100) e 2 (F20), mantiveram os menores valores de vazão mínima, e maiores valores de vazão média. Para os valores de vazão máxima, os menores valores correram para os cenários 6 (P100), 5 (E100) e 1 (F20). Esse comportamento reitera que a ausência de floresta resulta na diminuição das vazões mínimas, bem como no aumento das vazões máximas e médias, oriundas do maior escoamento superficial.

As áreas de florestas exercem grande importância no comportamento hídrico da bacia, portanto, a proteção dessas áreas é essencial à manutenção dos mananciais.

## 7.REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, 2012.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Journal Vadose Zone**, 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, n. 2, p. 413-430, 2007.
- AJAMI, N. K.; DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. **Journal Water Resources Research**, v. 43, n. 1, p. 1-19, 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS. P. C. S.; ALVES, L. M. G.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Journal Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Journal Hydrological Processes**, v. 19, n. 3, p. 563-572, 2005.
- 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.; LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1-18, 2012.
- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS J. R.; NICKS A. D.; SAMMONSN. B. SWRRB, a basin scale simulation model for soil and water resources management. **Texas A&M University Press**, College Station, 1990.
- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; MAIDMENT, D. R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 121, n. 2, p. 171-183, 1995.
- ARRIAGA, G. E.; COHEN, I. S.; VALLE, M. V.; SANTOS, A. L.; LÓPEZ, R. L.; HURTADO, P. B. Modelación de les currimiento en una subcuencadel trópico húmedo de México y suanálisis mediante índices de eficiência predictiva. **Revista Agrofaz**, Espanha, v. 13, n. 2, p. 113-118, 2013.
- ÁVALOS, D. B.; CRUZ-CÁRDENAS, G.; MONCAYO-ESTRADA. G.; ESTRADA-GODOY, F. Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas em la sub cuencadel lago de Chapala, México. **Revista Internacional Contaminación Ambiental**, v. 30, n. 3, p. 263-274, 2014.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D. L.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA, J. B. P. F. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, São Paulo, v. 1, 1987.

BATES, B. C.; CAMPBELL, E. P. A. Markovchain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. **Journal Water Resources Research**, v. 37, n. 4, p. 937-947, 2001.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. Kamloops: Forrex series, 2009. 208 p.

BELON, E. **Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região noroeste do estado do Rio de Janeiro**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 25, p. 987-995, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, n. 2, p. 341-363, 2013.

BLAINSK, B.; GARBOSSA, L. H. C.; ARAUJO, I. S.; DORTZBACH, D. **Estudos hidrossedimentológicos na microbacia Ribeirão Gustavo - Santa Catarina. Simulação de cenários agrícolas para estudos hidrossedimentológicos na microbacia Ribeirão Gustavo - Santa Catarina**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Nov. 2013. Disponível em: <[https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/2ba62c8796e6670ae977e1db31b7b5ce\\_5abbf856440690e4487b10aa81c929ec.pdf](https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/2ba62c8796e6670ae977e1db31b7b5ce_5abbf856440690e4487b10aa81c929ec.pdf)> Acesso em: 23 Set 2014.

BLAINSKI, E.; SILVEIRA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L.F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 23-28, 2011.

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. **Revista Tópicos em Ciência do Solo**, v. 9, n. 3, p. 241-290, 2015.

BORDAS, M. P.; SELMMELMANN, F, R.; TUCCI, C. E. M. **Elementos de engenharia de sedimentos**. Hidrologia: Ciência e Aplicação, Porto Alegre: UFRGS, 2001.

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. **Journal International of Agricultural and Biological Engineering**, St. Joseph, v. 8, n.3, p. 9-35, 2015.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 1, p. 185–228, 2004.

CAMPANHARO, W. A. **Análise do modelo de capacidade de infiltração variável (VIC) para as bacias do rio Santa Maria da Vitória e Jucu**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2013.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Árvore**, v. 30, n. 2, p. 249-256, 2006.

CARVALHO, L.D.; SILVA, D. C. **Hidrologia**. Instituto de Tecnologia Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Seropédica, p. 162, 2006. Disponível em: <<http://ufrjr.br/institutos/it/deng/leonardo/it113-hidrologia.htm>> Acesso em: 26 out. 2015.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994. 372 p.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro de propagação, de sedimentos do modelo de williams (1975) na bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**, 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília. 2013. 141 f.

CECÍLIO, A. R.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração modelagem da infiltração de água de água no solo sob condições 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.

CHOW, V. T. **Hidráulica de canais abiertos**. Santafé de Bogotá: Marta Edina Suárez R, 1994. 667 p.

COELHO NETTO, A. L.; GUERRA A. J. T.; CUNHA S. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2001. 194 f.

COSTA, E. L.; SILVA, A. M.; COLOMBO, C.; ABREU, A. R. Infiltração de água em solo, determinada por simuladores de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 131-134, 1999.

DECHMI, F.; BURGUETE, J.; SKHIRI, A. SWAT application in intensive irrigation systems: model modification, calibration and validation. **Journal of Hydrology**, v. 470-471, p. 22-238, 2012.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, por meio de simulação de chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. 2010. 147 f. Dissertação (Mestrado em saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 353p. 2013.

FAN, M.; SHIBATA, H. Simulation of watershed hydrology and stream water quality underland use and climate change scenarios in Teshio river watershed, northern Japan. **Journal Ecological Indicators**, v. 50, p. 79-89, 2015.

FARLEY, K. A.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, v. 11, n. 10, p. 1565-1576, 2005.

FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. DE P.; RODRIGUES, C. B. Managing forest plantation landscapes for water conservation. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 58-66, 2013.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

FICKLIN, D. L.; BARNHART, B. L. SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2081-2090, 2014.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. 2012.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

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**. International SWAT Conference & Workshops, Toledo, p. 27-35, 2011.

GIROLAMO, A. M.; PORTO, A. Land use scenario development as a tool for watershed management within the Rio Mannu basin. **Journal Land Use Policy**, v. 29, p. 691-701, 2012.

GOMES, N. M. et al. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2483-2492, 2008.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Revista Environmental Modelling and Software**, v. 23, p. 422-434, 2008.

GRIENSVEN, V. 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, p. 10-23, 2006.

GRUMBACH, R. J. S.; MARCIAL, E. C. **Cenários prospectivos**. 5. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2008. 378p.

GUERRA, A. T, **Novo dicionário geológico - geomorfológico**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003, 652p.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 1-9, 1999.

HA, M.; GASSMAN, P.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. G. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, p. 811-825, 2004.

HEWLETT, J. D. **Principles of forest hydrology**. 2. ed. Georgia: University of Georgia Press, 1982. 183 p.

JABRO, J. D. Variability of field-saturated hydraulic conductivity in a hagerstown soil as affected by initial water content. **Journal Soil Science**, v. 161, n. 11, p. 735-739, 1996.

JHA, M.; GASSMAN, P.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. G. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 40, p. 811 - 825, 2004.

JOSEPH, J. F.; GUILLAUME, J. H. A. Using a parallelized MCMC algorithm in R to identify appropriate likelihood functions for SWAT. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, p. 292-298, 2013.

KAGAWA, A. et al. Hawaiian native forest conserves water relative to timber plantation: Species and stand traits influence water use. **Ecological Applications**, v. 19, n. 6, p. 1429-1443, 2009.

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, p. 456-466, 2007.

KOBIYAMA, M. **Manejo de bacias hidrográficas: conceitos básicos**. Curitiba: UFPR, 1999. Apostila. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/bacia.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

LELIS, T. A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. 2011. 164f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

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

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: simulação de cenários. **Revista Ambiente & Água**, v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011.

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 Ciências do Solo**, v. 36, n. 2, p. 624-634, 2012.

LESSA, L. G. F. **Simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Pardo - Botucatu/SP, por modelagem hidrológica**. 2011. 158 f. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2011.

LETA, O. T.; NOSSENT, J.; VELEZ, C.; SHRESTHA, N. K.; GRIENSVEN, A. V.; BAUWENS, W. Assessment of the different sources of uncertainty in a SWAT model of the River Senne (Belgium). **Environmental Modelling & Software**, v. 68, p. 129 - 146, 2015.

LI, Z.; ZHANG, X.; ZHENG, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n.1, p. 35-42, 2009.

LINO, J. F. L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

LIRONG, S.; JIANYUN, Z. Basin Hydrological response to climate change in Beijiang river based on the SWAT model. **Journal Procedia Engineering**, v.28, p. 241-245, 2012.

LOCATELLI, B.; VIGNOLA, R. Managing watershed services of tropical forests and plantations: Can meta-analyses help? **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1864-1870, 2009.

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 de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 727-733, 2003.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C.; CRUCIANI, D. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e

- geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147-155, 2003.
- MAGNAGO, L. F. S.; ASSIS, A. M.; FERNANDES, H. Q. B.; SIMONELLI, M.; FRAGA, C. N. **Espécies da flora ameaçadas de extinção no estado do Espírito Santo**. Vitória: IPEMA, v. 2.p. 146. 2007.
- MAIDMENT, D. R.; GOODCHILD, M. F.; PARKES, B. O.; STEYAERT, L. T. **GIS end hydrologic modeling**. Environmental modeling with GIS. New York: Oxford University, 1993. p. 147-167.
- MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio Negrinho - SC com o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em engenharia Ambiental) - Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012. 129 f.
- MANKIN, D. K. R.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Soil and water assesement tool (SWAT) model: current developments and applications. **Journal American Society of Agricultura and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 53, n. 5, p. 1423-1432, 2010.
- MARCHIORE, J. **Avaliação hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Quatorze, Francisco Beltrão (PR), por meio de modelo hidrológico computacional**. 2014. 102 f. (Graduação em Engenharia Ambiental) – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014.
- MARCHIORO, V.; FERNANDES, N.F.; MACEDO, J.R.; BHERING, S.B.; GONÇALVES, A.O.; CAIADO, M.A.C. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.1, p.29-38, 2011.
- MCCUEN, R. H.; SNYDER, W. M. **Sensitivity analysis and Probabilistic Modeling**. Hydrologic modeling: statistical methods and applications, New York: Prentice Hall, p. 883, 1986.
- MEINZER, F. C. et al. Does water transport scale universally with tree size? **Functional Ecology**, v.19, n. 4, p. 558-565, 2005.
- MELLO NETO, M. J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2013.
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p.235-247, 2008.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 1. ed. Porto Alegre, p. 536, 2001.
- MENEZES, P. H. B. J. 2009. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do lago Paranoá**. 2009. 117f. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

- MORAIS, F. Infiltração - uma variável geomorfológica. **Caderno de Geografia**, v. 22, n. 38, p. 73-87, 2012.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J. E. SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, part I-A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n.3, p. 282-290, 1970.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool - SWAT: Theoretical documentation - Version 2005. **Journal Agricultural research service (USDA) e Texas agricultural experiment station**, Texas A&M University, p. 541, 2005.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. **Journal Texas Water Resources Institute**, 2011.
- NIMER, E. Um modelo metodológico de classificação de climas. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 41, n. 4, p. 59-89, 1979.
- NÓBREGA, N. E. F.; SILVA, J. G. F.; POSSE, S. C. P. Classificação climática e balanço hídrico climatológico para a região produtora de morango em Domingos Martins - ES: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2008. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Fruticultura**, VITÓRIA - ES, 2008.
- OLIVEIRA, K. D. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu utilizando o modelo DHSVM**. 2014a. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.
- OLIVEIRA, L.T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. 2014b. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.
- PACHECHENIK, P. E. **Caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental na bacia do rio das Pedras, Guarapuava - PR**. 2005. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- PAIM, J. B. **Avaliação do potencial de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Piçarras utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em tecnologia e Gestão Ambiental - Universidade Vale do Itajaí, Itajaí, 2012.
- PANHALKAR, S. S. Hydrological modeling using SWAT model and geoinformatic techniques. **Journal the Egyptian of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 17, p. 197-207, 2014.
- PECHLIVANIDIS, I. G.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N. R. WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Journal Global Nest**, v. 13, p. 193-214.

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

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. 129 f. (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PEREIRA, J. C. D. **Aplicação do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeirinha - MG**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

PETERSON, J. R.; HAMLETT, J. M. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. **Journal of the American Water Resources Association**, n. 34, p. 531-544, 1998.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G.D.; GEMITZI, A.; TSIHRINTZIS, V.A. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). **Journal Desalination**, v. 250, n. 1, p. 274-286, 2010.

PLANO NACIONAL DOS RECURSOS HÍDRICOS. Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Brasília: MMA, 135p, 2006. Disponível em: <[http://www.integracao.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=c37feae3-8169-4049-900b-e8160661f541&groupId=66920](http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=c37feae3-8169-4049-900b-e8160661f541&groupId=66920)>. Acesso em: 15 set 2014.

PRUSKI, F. F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E. F.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, P. A.; WERLANG, L.; CARVALHO L. T. Infiltração da água num Latossolo Roxo. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 77-84, 1997.

ROCHA, E. O. **Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SALEMI, L. F. et al. Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for The hydrology of small catchments. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 100–109, 2013.

SALLES, L. de A. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado, em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SARMENTO, L. **Análise de incerteza e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília. 2010. 241 f.

SAXTON K. E.; RAWLS W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Journal Soil Science Society of Agronomy**, v. 70, n. 5, p. 1569-1578, 2006.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to west Africa. **Journal Advances in Geosciences**, v. 9, p. 137-143, 2006.

SCOTT, D. F.; PRINSLOO, F. W. Longer-term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, 2009.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. Oxford: Oxford University Press, 1993. 451 p.

SHAMSELDIN, A. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v. 199, n. 3, p. 272-294, 1997.

SILVA, V. A.; MOREAU, M. 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**, v.15, n.3, p.310-315, 2011.

SIQUEIRA, J. D. P.; LISBOA, R. S.; FERREIRA, A. M.; SOUZA, M. F. R.; ARAUJO, E.; LISBÃO JÚNIOR, L.; SIQUEIRA, M. M. Estudo ambiental para os programas de fomento florestal da Aracruz Celulose S.A. e extensão florestal do governo do estado do Espírito Santo. **Revista Floresta**, v. especial, p. 03-67, 2004.

SMETHURST, P. J.; ALMEIDA, A. C. DE; LOOS, R. A. Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, p. 187-198, 2015.

SOPRANI, J.; NASCIMENTO, G.; MARTINS, F.; PINHEIRO, C.M.; VENTURIN, S. Navegando os rios capixabas: Rio Jucu e Rio Santa Maria da Vitória. **A Tribuna**. Espírito Santo. 26 ago. 2007. Suplemento Especial. 12 p.

SOUZA, R.; SANTOS, I. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. **Revista Raega**, v. 28, p. 134-153, 2013.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. Amsterdam. v. 414-415. 413-424.

TROIN, M.; VELÁZQUEZ, J. A.; CAYA, D.; BRISSETTE, D. Comparing statistical post-processing of regional and global climate scenarios for hydrological impacts assessment: a case study of two Canadian catchments. **Journal of Hydrology**, v. 520, p. 268-288, 2015.

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

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Journal Agricultural Water Management**, v. 96, p.1207-1217, 2009.



- VALENTE, O. F.; CASTRO, P.S. A bacia hidrográfica e a produção de água. Informe Agropecuário, v. 9, n. 100, p. 53-56, 1983.
- 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, p. 10-23, 2006.
- VIEIRA, B. C. **Caracterização in situ da condutividade hidráulica dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da bacia do rio Papagaio, maciço da Tijuca (RJ)**. (Dissertação de Mestrado), - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001. 130 f.
- VISSMAN, JR. W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 5 ed. Pearson Education, Inc. 2002. p. 612.
- VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica nas bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008. 120 f.
- WANGPIMOOL, W.; PONGPUT, K.; SUKVIBOOL, C.; SOMBATPANIT, S.; GASSMAN, P.W. The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan river basin using Soil and Water Assessment Tool model (SWAT). **Journal International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 2, p. 53-63, 2013.
- WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model 1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, p. 1077-1089, 2005.
- WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrologyvegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.
- WU, Y.; CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang river basin in south China using SWAT. **Frontiers of Earth Science in China**, v. 1, p. 1-6, 2009.
- XAVIER, F. V. **Contribuição metodológica ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Manso, utilizando o modelo SWAT**. 2009. 166f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2009.
- YANG, Q.; MENG, F. R.; CHOW, T. L.; BENOY, G.; REES, H. W.; BOURQUE, C.P.A. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. **Journal Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.21, n. 12, p. 132-23, 2012.
- YESUF, H. M.; ASSEN, M.; ALAMIREW, T.; MELESSE, A.M. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. **Catena**, v. 127, p. 191-205, 2015.
- ZANETTI, S. S. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2007. 135p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade 98 Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

ZANETTI, S. S.; SILVA, J. M. A.; SOUSA, E. F.; OLIVEIRA, V. P. S.; ALMEIDA, F.T. Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica Parte I: Aprimoramento do modelo HidroBacia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.429-434, 2009.

## APÊNDICE

Tabela A – Estações presentes na bacia hidrográfica do rio Jucu

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Tipo</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Responsável</b>
2040001	Fazenda Jucuruaba	Pluviométrica	80	ANA
2040003	Fazenda Fonte Limpa	Pluviométrica	70	ANA
2040004	Guarapari	Pluviométrica	6	ANA
2040007	Santa Maria de Jetibá	Pluviométrica	710	ANA
2040008	Garrafão	Pluviométrica	940	ANA
2040010	Santa Leopoldina	Pluviométrica	160	ANA
2040011	Matilde	Pluviométrica	515	ANA
2040012	Marechal Floriano	Pluviométrica	544	ANA
2040014	Duas Bocas	Pluviométrica	200	ANA
2040015	Perobinha	Pluviométrica	640	ANA
2040018	Cachoeira Suíça	Pluviométrica	409	ANA
2040020	Vila Nova Maravilha	Pluviométrica	980	ANA
2040022	Ponta da Fruta	Pluviométrica	3	ANA
2040023	São Rafael	Pluviométrica	818	ANA
2040045	Córrego do Galo	Pluviométrica	451	ANA
2041002	Castelo	Pluviométrica	107	ANA
2041011	Conceição do Castelo	Pluviométrica	670	ANA
2041020	Aracê	Pluviométrica	1075	ANA
2041023	Afonso Claudio	Pluviométrica	300	ANA
83648	Vitória	Convencional	36	INMET
A612	Vitória	Automática	9	INMET
A613	Santa Tereza	Automática	998	INMET
A615	Alfredo Chaves	Automática	35	INMET
A657	Afonso Cláudio	Automática	520	INMET
-	Centro Serrano	Convencional	950	INCAPER
-	Viana	Convencional	20	INCAPER
-	Itarana	Convencional	245	INCAPER