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

STEFANIA MARQUES PIMENTEL

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE COBERTURA FLORESTAL

JERÔNIMO MONTEIRO – ES
2017

STEFANIA MARQUES PIMENTEL

MODELAGEM DO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE COBERTURA FLORESTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias 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: Roberto Avelino Cecílio

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Pimentel, Stefania Marques,1991-
S237a Modelagem hidrológica da bacia do Rio Jucu sob diferentes cenários de cobertura florestal / Stefania Marques Pimentel. – 2017.
79 f. : il.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.
Coorientador: Sidney Sara Zanetti.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Hidrologia florestal. 2. Bacia do Rio Jucu (ES). 3. Solo – Uso. I. Cecílio, Roberto Avelino. II. Zanetti, Sidney Sara. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE COBERTURA FLORESTAL

Stefania Marques Pimentel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias 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 25 de Julho de 2017.

Alexandre C Xavier

Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico essa conquista a minha amada mãe Hilda Marques Pimentel que não mediu esforços para a realização deste sonho, por seu apoio incondicional, conselhos nos momentos de agonia e alegria, ao meu amado irmão Witer Marques Pimentel que sempre esteve ao meu lado me apoiando e aconselhando, ao meu padrasto João Alves Machado pela sua consideração e seu apoio. "*In memoriam*" da minha amada avó Gerolina Marques Pimentel.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e Nossa Senhora Aparecida, por conceder o dom da vida e por me dar forças nos momentos de maior dificuldade, pelas orientações em momentos que "Apenas" estavam "Além" de nossos entendimentos terrestres.

Ao meu orientador Roberto Avelino Cecílio, que transmitiu conhecimentos através das disciplinas ministradas, e orientações para a execução desse projeto.

As minhas grandes amizades conquistadas durante a pós-graduação, Ericka Jheynny Lazzari e Marks Melo Moura, pelo imenso apoio e conselhos no decorrer destes anos, que sempre me incentivaram nos momentos de maior indecisão. As minhas colegas de moradia Glaucileide Ferreira e Marcia Carneiro.

À equipe do Laboratório de Modelagem Hidrológica, pela parceria, ajuda e momentos de descontração, por serem grandes parceiros de trabalhos, encontros, cafés, motivo de sorrisos e amparo nas horas de angústias: Alessandra Lopes, Ana Paula, Carlos Dambroz, Elvis, Franciele Loyal, Fabrina Ferraz, Gisele Lemos, Helder, Kaíse Souza, Laisi, Nátalia Mendes, Rafael Esteves, Regiane Vilanova, Rosane, Sueliane Andrade, Telma Peluzio, em especial á Tamires Partelli e Laís Oliveira pelos conhecimentos transmitidos na modelagem com SWAT.

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

À Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Jerônimo Monteiro, pela oportunidade de crescimento profissional, á Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

A família Nicola, Antônio lanches, Fazendinha, Garagem lanches, bar do Romário e bar do Ronaldo pelos momentos proporcionados de alegria, descontração. É muita história construída no decorrer desses anos. A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e viver com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve, e a vida é muito bela para ser insignificante”.

(Charles Chaplin)

BIOGRAFIA

STEFANIA MARQUES PIMENTEL, filha de Hilda Marques Pimentel, nasceu em quinze de outubro de mil novecentos e um, na cidade de Mirassol d' oeste, estado de Mato Grosso.

Concluiu o segundo grau no colégio Padre Tiago, na cidade de Mirassol d' oeste, estado de Mato Grosso.

Ingressou na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) em dois mil de dez, graduando-se bacharel em Engenheira Florestal no mês de agosto de dois mil e quinze.

Em agosto de dois mil e quinze iniciou o curso de mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais – PPGCF, área de concentração Meio ambiente e Recursos hídricos no Departamento de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAE-UFES), submetendo-se a defesa em julho de dois mil e dezesseis.

RESUMO

PIMENTEL, Stefania Marques. Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu sob diferentes cenários de cobertura florestal. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

A água é um recurso natural de domínio público e indispensável para a manutenção da vida no planeta. Há muitas discussões acerca do efeito da cobertura florestal e uso do solo sobre a "produção" de água. Os estudos hidrológicos contribuem para compreensão do ciclo hídrico, sobretudo em relação à disponibilidade hídrica, caracterizada pela vazão. Este pesquisa tem como objetivo, analisar o impacto da cobertura florestal sobre o comportamento das vazões, na bacia hidrográfica do rio Jucu, Espírito Santo, por intermédio de modelagem hidrológica, com aplicação do modelo computacional *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). A eficácia da simulação das vazões diárias e mensais foi avaliada por intermédio dos índices estáticos: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS); coeficiente de determinação (R^2); erro padrão médio normalizado (RSR) e percentual de tendência (PBIAS) que indicaram o desempenho satisfatório nas fases calibração e validação do modelo. Após a calibração e validação do modelo, foram realizadas simulações de cenários alternativos de uso do solo da hidrográfica do rio Jucu. Com o intuído de verificar a influência da posição geográfica do reflorestamento sobre as vazões, os cenários foram construídos de duas formas distintas: a) abordagem "aleatória" (AA), no qual não importa a localização das áreas reflorestadas; b) abordagem "definida" (AD), no qual são definidas exatamente em quais posições geográficas ocorrerá o reflorestamento (áreas sob macega e, ou, áreas de preservação permanente). Os resultados da AA demostraram tendência pouco expressiva de redução das vazões simuladas, conforme se incrementa a área de floresta, demostrando que a posição geográfica na qual será realizada a alteração do uso do solo é mais importante para o comportamento das vazões mínimas do que para as vazões médias.

Palavras-chave: Soil and Water Assessment Tool, calibração e validação, uso do solo, disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

PIMENTEL, Stefania Marques. Modeling the hydrological behavior of the Jucu basin under different forest cover scenarios. Dissertation (Master's degree on Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Advisor: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

Water is a natural resource of public domain and indispensable for the maintenance of life on the planet. There are many discussions about the effect of forest cover and land use on the "production" of water. he hydrological studies contribute to the understanding of the water cycle, especially in relation to the water availability, characterized by the flow. The objective of this research was to analyze the impact of forest cover on flow behavior in the Jucu river basin, Espírito Santo, through hydrological modeling, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The efficiency of the simulation of the daily and monthly flows was evaluated through the static indexes: Nash and Sutcliffe efficiency coefficient (NS); Coefficient of determination (R2); Normalized standard error (RSR) and percentage of trend (PBIAS) that indicated satisfactory performance in the calibration and validation phases of the model. After calibration and validation of the model, simulations of alternative land use scenarios of the Jucu river basin were carried out. In order to verify the influence of the geographic position of the reforestation on the flows, the scenarios were constructed in two different ways: a) "random" approach (AA), in which no matter the location of the reforested areas; B) "defined" approach (AD), in which are defined exactly in which geographical positions will be the reforestation (areas under macega and, or, permanent preservation areas). The results of the AA showed a low expressive tendency of reduction of simulated flows, as the forest area increases, demonstrating that the geographical position in which the land use change will be carried out is more important for the behavior of the minimum flows than for the Flow rates.

Keywords: Soil and Water Assessment Tool, calibration and validation, land use, water availability

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

2. OBJETIVOS 14

2.1 Objetivo geral 14

2.2 Objetivos específicos 14

3. REVISÃO DE LITERATURA 15

3. 1 Vazões dos cursos d'água 15

3.1. 1. Curva de permanência 16

3. 2. Relação cobertura vegetal e vazão 17

3. 3. Modelos hidrológicos 19

3. 4. Soil and Water Assessment Tool – SWAT 20

3. 5.1. Dinâmica da modelagem hidrológica utilizando o SWAT 22

3. 5.2. Análise de sensibilidade, calibração e validação 26

4. MATERIAL E MÉTODOS 28

4. 1.Caracterização da área em estudo 29

4. 2.Base de dados 30

4.2.1. Topografia 30

4.2.2. Tipo de solo 32

4.2.3. Uso do solo 38

4.2.4. Dados hidro-meteorológicos 39

4. 3.Calibração e validação do SWAT 41

4. 4.Construção de cenários 44

5. RESULTADO E DISCUSSÃO 48

5. 1.Análise estatística do modelo SWAT 48

5.1. 1. Analise pré-calibração 48

5.1. 2. Calibração e validação do SWAT 50

5. 2.Cenários simulados 58

5. 3.Comparação dos cenários simulados: definidos e aleatórios 63

6. CONCLUSÕES 68

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural renovável, considerado como o principal elemento para a manutenção da vida na Terra. Entretanto, seu caráter limitado, associado ao inadequado gerenciamento e à multiplicidade de usos, pode acarretar problemas relacionados à escassez de sua oferta, tanto em quantidade como em qualidade (BACELLAR, 2005).

Com o objetivo de propor e executar atividades destinadas à melhoria da oferta de água, a compreensão do ciclo hidrológico, em escala de bacias hidrográficas, se mostra de fundamental importância. Para tanto, fazem-se necessárias a caracterização e a análise de variáveis hidrológicas (ARAI; PEREIRA; GONÇALVES, 2012; GOOSEFF et al., 2016). Dentre as variáveis existentes, a vazão dos cursos d'água se destaca por permitir caracterizar a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2002; TUCCI, 2005).

Importantes elementos levantam discussões acerca dos fatores potencialmente influenciadores do regime das vazões e da produção de água em bacias hidrográficas. Entre estes, a cobertura florestal é alvo de muitas especulações, tais como: a presença de floresta aumenta a vazão dos rios? Quanto? Embora sejam importantes componentes ambientais, as florestas exercem tão somente um efeito regulador sobre o ciclo hidrológico? Ou, ainda: pode-se excluir a existência de uma estreita relação, não havendo interações significativas entre a floresta e o comportamento das vazões dos cursos d'água?

No senso comum, em especial no Brasil, a floresta é tida como referência para a produção de água, admitindo-se que a redução desta vegetação está relacionada com a diminuição da produção média anual de água. Todavia, diversos estudos realizados buscaram averiguar o efeito da cobertura florestal sobre a vazão dos rios em bacias hidrográficas. Entretanto, os resultados de tais estudos demonstram, muitas vezes, conclusões conflitantes. Brown et al. (2013) afirmam, em seu estudo, que o benefício da floresta na estabilidade do solo e qualidade de água é comprovado, porém não é possível ainda afirmar que promovem o aumento da produção de água. Tucci e Clarke (1997), expõem que a relação da floresta com o balanço hídrico está mais relacionada à regulação do regime das vazões, ao invés de estar diretamente ligada ao aumento do volume das vazões.

Um aspecto importante nos estudos relacionados ao impacto do uso do solo com as vazões diz respeito à quantidade de dados disponíveis, que muitas é escasso e referente há poucos anos apenas (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2002; TUCCI, 2015; VILLELA; MATTOS, 1975). Tais dados são frequentemente inviáveis de serem obtidos e, em virtude desta complexidade, a solução para a condução de estudos é lançar mão de técnicas de modelagem hidrológica (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2002; TUCCI, 2015).

A modelagem surge como alternativa para a obtenção de informações sobre a dinâmica do comportamento, antecipação de eventos e previsão de possíveis impactos ambientais (YIRA et al., 2016). Os modelos oferecem uma avaliação satisfatória, com baixo custo em relação à investigação experimental, fator decisivo quando a problemática a ser estudada apresenta dimensões e complexidade elevadas, como é o caso de uma bacia hidrográfica (PARAJULI; OUYANG, 2013; ZANETTI, 2007). Desta forma, a partir da aplicação de modelos hidrológicos, pode-se prever o impacto da alteração no uso do solo sobre as vazões em uma longa sequência de anos.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um dos principais modelos hidrológicos existentes na atualidade. Configurado como ArcSWAT, tem uma integração ao Sistema de Informação Geográfica (SIG), o que facilita a configuração dos arquivos e dados de entrada, possibilitando também a melhor compreensão dos resultados obtidos (GEORGE; LEON, 2007; OLIVERA et al., 2006; PEREIRA et al., 2014b). Diversos estudos recentes, envolvendo modelagem hidrológica com o SWAT, comprovam a eficiência da sua aplicação, como Baker e Miller (2013); Fukunaga et al. (2015); Andrade, Mello e Beskow (2013); Donizete et al. (2016); Pereira et al. (2014b) e Parajuli e Ouyang (2013).

Localizada na Mata Atlântica e com cobertura florestal significativamente superior à média nacional, a bacia do rio Jucu em conjunto com a bacia Santa Maria da Vitória tem extrema importância para o estado do Espírito Santo, pois são responsáveis pelo abastecimento de 95% da população da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), que, por sua vez, abriga cerca de 50% da população do estado, cujo quadro de degradação ambiental tem se agravado nas últimas décadas (PAGIOLA; GLEHN; TAFFARELLO, 2013). Muito se especula com respeito à necessidade de aumento da produção de água, ou seja, das vazões nesta bacia. No Espírito Santo e, em especial, na bacia do rio Jucu, o aumento da cobertura florestal

tem sido tratado de forma empírica, como fator essencial ao incremento das vazões. Todavia, nem sempre essa afirmativa pode ser tomada como verdadeira. Segundo Cruz e Tucci (2008), as modificações na cobertura vegetal podem interferir negativamente ou positivamente no comportamento do regime das vazões, causando impactos diversos na disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas. Nesse sentido, estudos que permitem caracterizar a relação cobertura floresta e vazão na bacia do rio Jucu, por meio de modelagem hidrológica, são de grande importância para o meio técnico-científico e para tomadas de decisão no estabelecimento de políticas públicas no Espírito Santo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar, por meio de modelagem hidrológica, utilizando o modelo SWAT, o impacto da alteração da cobertura florestal sobre o comportamento das vazões na bacia hidrográfica do rio Jucu.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho consistiram nas seguintes ações, realizadas para a bacia hidrográfica do rio Jucu:

- Calibrar e validar o modelo SWAT;
- Realizar simulações, por intermédio do SWAT, com diversos cenários de alteração da cobertura florestal.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3. 1. Vazões dos cursos d'água

A disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica é uma função direta do balanço hídrico ocorrido na bacia, sendo esta influenciada pela interação entre as ações antrópicas e o meio ambiente (MO; WANG; JACOBS, 2016). Segundo Tucci (2015), a vazão dos cursos d'água é a principal variável que caracteriza a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica.

Os estudos de vazões envolvem as vazões médias, mínimas e máximas. De acordo com Tucci (2015):

- A vazão média é adotada quando se deseja simular as condições médias prevalecentes, quer durante o ano, durante os meses chuvosos ou durante os meses secos. Uma vazão média frequentemente utilizada é a vazão média de longo período, que corresponde à média das vazões médias diárias anuais obtidas na série histórica da estação fluviométrica.
- A vazão mínima é caracterizada pela sua duração e frequência de ocorrência, a qual está associada a um período de retorno. Em termos práticos, as vazões mínimas de interesse referem-se às maiores durações. A vazão mínima média com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) é a mais utilizada para caracterizar vazões mínimas. Esta vazão também pode ser representada pela curva de permanência, que relaciona a vazão a um período de permanência no tempo, como a Q_{95} – vazão mínima com 95% de permanência no tempo.
- A vazão máxima está associada à ocorrência de chuvas intensas ou uma sequência de chuvas. Esta vazão corresponde a um valor associado a um risco de ser igualado ou superado, tornando-se importante para projetos de controle de cheias e dimensionamento de obras hidráulicas.

A representação gráfica das variações da vazão durante um período de observações, na sua sequência cronológica de ocorrência, recebe o nome de hidrograma ou fluviograma (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2002). O hidrograma integra

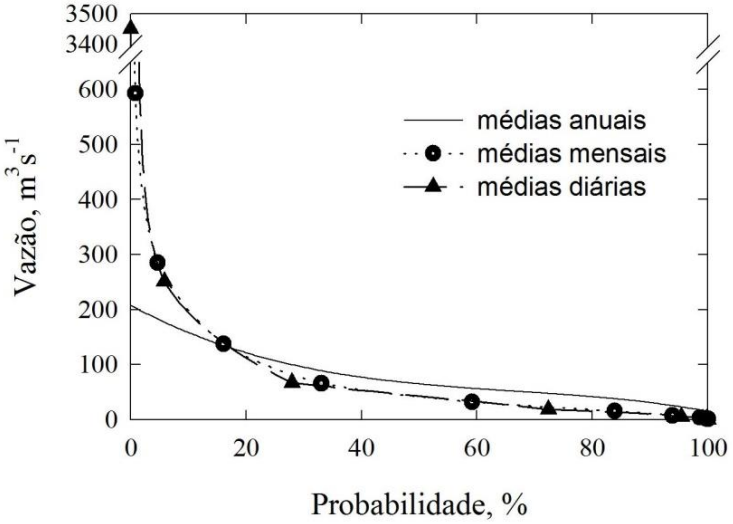
as características fisiográficas, climáticas e vegetais que governam as relações entre a precipitação e a vazão em bacias hidrográficas (LIMA, 2008).

3.1. 1. Curva de permanência

A curva de permanência é uma função hidrológica pela qual se relaciona a vazão do rio à probabilidade de que esse mesmo valor de vazão ou nível seja igualado ou superado. Desperta grande interesse, pois permite caracterizar a permanência no tempo de determinada vazão, além servir como uma forma de caracterização de bacias distintas (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2002; REIS et al., 2006).

A curva de permanência permite observar os intervalos de tempo em que as vazões foram igualadas ou excedidas (Figura 1), descrevendo de forma mais concisa o regime do curso d’água. A curvatura gerada pela sua declividade compõe uma forma das características da bacia. Desta maneira, a curva plana e achatada, indica que armazenamentos em aquíferos naturais estão presentes. Já a curva com forte declividade aponta a ausência de armazenamentos significativos na área da bacia (CRUZ; TUCCI, 2008; GARCIA et al., 2007). Pruski; Silva; Koetz (2002); Tucci (2015); Villela e Mattos (1975), reforçam que a curva de permanência resume a variabilidade das vazões, demostrando a base de comportamento para a sustentabilidade do sistema hidrológico.

Figura 1 – Exemplo de curva de permanência.



Fonte: Pruski; Silva; Koetz (2002); Tucci (2015).

Vários estados brasileiros e o próprio Governo Federal utilizam índices de vazões mínimas extraídos de curvas de permanência para regulamentação no uso dos recursos hídricos. No estado do Espírito Santo, o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), conforme Resolução Nº 19, de 04 de outubro de 2005, adota a vazão de permanência em 90% do tempo (Q_{90}) para a definição dos limites outorgáveis de vazão. A Agência Nacional de Águas (ANA) adota a Q_{95}.

3. 2 Relação cobertura vegetal e vazão

O uso e a cobertura do solo têm papel importante, pois a água, em quantidade e qualidade, é “produzida e armazenada” na área da bacia hidrográfica, sendo distribuída através das nascentes e tributários dos cursos d’água (LLERENA; HERMOZA; LLERENA, 2007). Segundo Schiavetti e Camargo (2002), a cobertura vegetal tem forte relação com o controle dos processos erosivos, garante a estabilidade da estrutura do solo, reduz o processo de escoamento superficial e atua positivamente no acúmulo e produção de matéria orgânica.

Lima et al. (2012) trazem algumas considerações acerca do tema floresta e vazão, onde abordam uma concepção de que plantações florestais levam a um consumo de água exagerado, levantando assim muitas dúvidas quanto aos reais

impactos dessas florestas e do uso do solo na produção de água. Outros estudos concluem que florestas aumentam a evapotranspiração em comparação com as gramíneas (YANG et al., 2009; ZHANG; DAWES; WALKER, 1999, 2001). Bosch e Hewlett (1982); Hibbert (1967); Brown et al. (2015); Li et al. (2007) e Brogna et al. (2017) relatam, em seus estudos, a alteração na produção de água resultantes de mudanças na cobertura florestal, em que a redução da cobertura florestal, causa um acréscimo no rendimento da água, consequência da redução na evapotranspiração.

Mendes (2016) avaliou a influência das chuvas e das florestas na vazão de cursos d'água para bacia hidrográfica no rio Itapemirim no Espírito Santo. No estudo, os comportamentos das vazões médias, mínimas e máximas, em relação às chuvas, tiveram correlação positivas. Já a relação entre as florestas e as vazões analisadas não apresentou correlação.

As florestas têm um papel fundamental na manutenção e no equilíbrio do ciclo hidrológico exercem funções expressivas na manutenção da produção de água a permanência de vazões mínimas, e garantem a estabilidade e o equilíbrio dos ecossistemas (TUCCI; CLARKE, 1997). Feng e Liu (2015) sugerem que a cobertura florestal propicia maior infiltração de água no solo, além de diminuir os efeitos erosivos e melhorar a produção de água em épocas de estiagem (vazões mínimas).

Hornbeck et al. (1993) analisaram a mudança em longo prazo e o rendimento na produção e água em bacias hidrográfica no norte dos Estados Unidos, sob áreas de floresta em diferentes condições climáticas. Concluiu-se que inicialmente ocorre o aumento das vazões com a retirada da floresta, porém com o inicio da regeneração florestal ocorre uma diminuição da vazão entre 3 e 10 anos.

Jayasuriya et al. (1993), em experimento em florestas de montanha em bacias hidrográficas de abastecimento de água de Melbourne, na Austrália, investigaram o impacto sobre a produção de água em longo prazo com a redução da densidade da floresta. Os resultados caracterizaram que as diferenças de vazão entre a floresta podem ser explicadas pela evapotranspiração.

A variação das vazões máxima, mínima e média em bacias hidrográficas, sob influência da floresta, está relacionada à utilização da água em seus processos biológicos, como absorção e transpiração; porém, as florestas prestam serviços ambientais de grande importância (ARCOVA; CICCO; ROCHA, 2003; SCHIAVETTI; CAMARGO, 2002; TUCCI; CLARKE, 1997). Feng e Liu (2015), sugerem que a cobertura florestal promove maior infiltração de água no solo do que outros tipos de

cobertura, além de diminuir os efeitos erosivos e melhorar a conservação do solo em épocas chuvosas.

3. 3 Modelos hidrológicos

Com o advento dos sistemas computacionais, uma gama de modelos matemáticos e numéricos foram desenvolvidos. A partir da década de 1980, surgiram várias versões de modelos hidrológicos com o intuito de prever ou aproximar-se do ciclo hidrológico, atendendo objetivos específicos (SREEKANTH; DATT, 2012; ZANETTI, 2007).

Modelo é a representação de algum objeto ou sistema em uma determinada linguagem, uma forma de descrever processos com diferentes níveis de detalhamento espacial, e em escalas de tempo da maneira mais real possível, de fácil uso e acesso (TUCCI, 2005). De forma geral, busca representar no todo ou em partes o comportamento do processo hidrológico, em que um determinado sistema está diretamente ou indiretamente interligado (ESHTAWI et al., 2016).

Os modelos hidrológicos são considerados com base em distintos aspectos, tais como: com relação às variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); nas relações entre as variáveis (empírico ou baseado em processos); na representação dos dados (discretos ou contínuos); na presença ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e na existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos) (TUCCI, 2005).

Desta maneira, compreende-se um modelo hidrológico como a aplicação de um modelo matemático para representar o comportamento de um sistema, a fim de produzir uma resposta, que envolve, portanto, a simulação dos processos de precipitação, evapotranspiração, infiltração, interceptação, escoamento superficial entre outros. Isto possibilita o diagnóstico sobre a disponibilidade hídrica sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo, dentro de uma unidade geográfica (ARNOLD; WILLIAMS; MAIDMENT, 1995; TUCCI, 2015; VIOLA et al., 2012).

Neste sentido, os modelos hidrológicos são capazes de representar os processos do ciclo hidrológico, simular e compreender o comportamento de uma bacia hidrográfica e suas variáveis. Seus objetivos podem ser analisar o efeito

gerado por mudanças climáticas, pelo uso e manejo do solo e pela precipitação no regime de variação de vazões e na quantidade de sedimentos desprendidos e transportados para os corpos d'água (ARNOLD et al., 2000; FUKUNAGA et al., 2015; HUO et al., 2016; MACHADO; VETTORAZZI; XAVIER, 2003).

Atualmente, há uma grande variedade de aplicativos disponíveis. Entre estes, pode-se citar: *Terrain Analysis Hydrologic Model (*TOPOG), desenvolvido pela *Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization*; *Topographic Based Hydrological Model* (TOPMODEL) – por Beven e Kirkby, (1979); Hidrobacia desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa; SAC-SMA desenvolvido pelo *National Weather Service River Forecast System*; MGB-IPH desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); *Soil and Water Assessement Tool* (SWAT) desenvolvido pelo *Blackland Research Center da Texas Agricultural Experiment Station* e USDA *Agricultural Research Service, Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM)* desenvolvido pelo Universidade de Washington, entre outros.

3. 4 Soil and Water Assessment Tool – SWAT

O SWAT é um modelo hidrológico semi-distribuído, de domínio público, desenvolvido na década de 1990, por Dr. Jeff Arnold e sua equipe, *no Agricultural Research Service* (ARS) no Grassland, *Soil and Water Research Laboratory*, em Tempe, Texas, EUA, com suporte técnico do *United States Department of Agriculture* (USDA) e da *Texas A&M AgriLife Research*, parte do sistema da *Texas A&M University*. Têm sido um modelo de sucesso nesses últimos 30 anos com o propósito de analisar os impactos das modificações na qualidade da água, alterações no manejo uso e ocupação do solo sobre o ciclo hidrológico, variações das vazões, produção e transporte de sedimentos.

O SWAT vem sendo cada vez mais utilizado, apesar de algumas limitações, é um modelo eficaz para apoiar as decisões, sobre a gestão dos recursos hídricos, planejamento territorial advindo da mudança do uso e ocupação do solo, alterações

climáticas, alocação de água e controle da poluição hídrica envolvendo bacia hidrográfica (ASHRAF, 2013).

Fukunaga et. al. (2015) avaliaram a aplicação do SWAT para sub-bacias do rio Itapemirim, Espírito Santo, e concluíram que o modelo foi capaz de simular, com qualidade, dados do regime de vazão. Oliveira (2014b) no estado do Espírito Santo avaliou a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT em uma bacia hidrográfica experimental em Aracruz, concluindo que, após calibração e validação, obteve desempenho satisfatório. Zhang et al. (2017) aplicaram o SWAT para simular a erosão do solo a partir de diferentes tipos de uso do solo em cada sub-bacia do rio Liusha na China. Tuo et al. (2016) testaram diferentes entradas de precipitação nas simulações do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Adige, nordeste da Itália, salientando que a precipitação é a principal fonte de incerteza em diferentes conjuntos de dados. Eduardo et al. (2016) confirmaram a aplicabilidade do modelo SWAT como uma ferramenta de gestão e planeamento dos recursos hídricos.

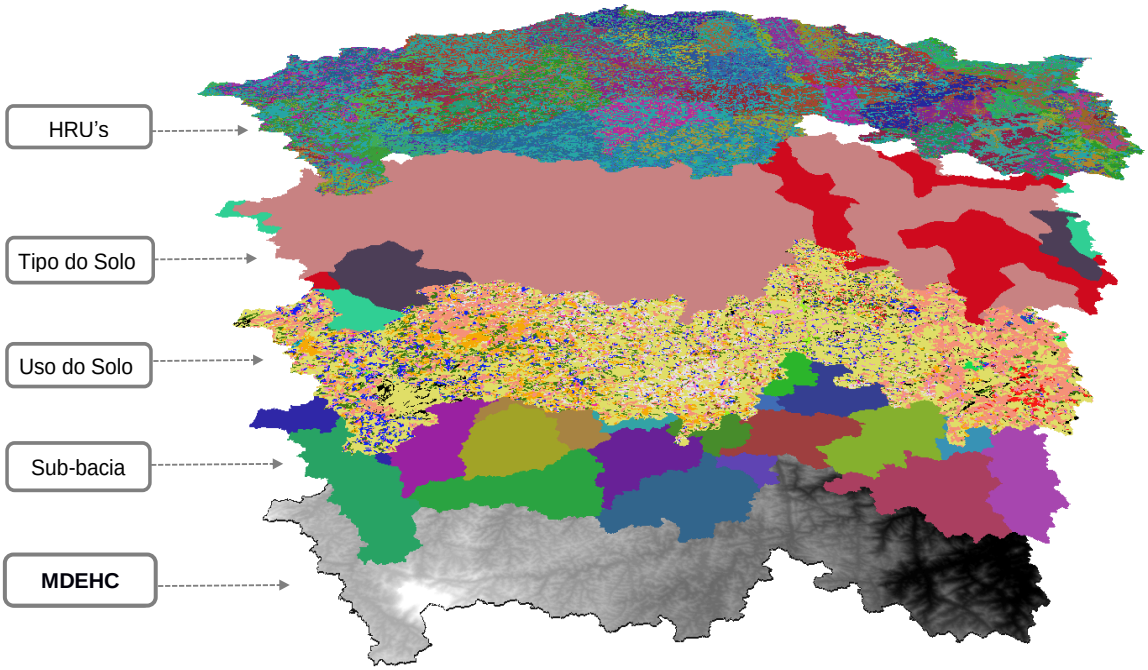
O modelo foi planejado para simular os processos que envolvem o uso e classificação dos solos, chuvas e vazão com um elevado nível de detalhamento espacial. Permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a simulação e análise de diversos cenários, caracterizando as combinações homogêneas de usos do solo, tipo de solo e declividades, que constituirão as Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU's). Independente da natureza do estudo realizado com o SWAT, o seu funcionamento será sempre uma função do balanço hídrico existente na área de estudo (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2011).

O modelo requer informações especificas, podendo ser editadas conforme a localização geográfica do estudo. O modelo é eficiente computacionalmente podendo simular desde bacias em escala experimental a bacias hidrográficas extensas sem maior dificuldade ou tempo na realização do processo. O modelo SWAT é continuo capaz de simular os efeitos no uso do solo em longos períodos de tempo, não se limitando a eventos isolados de precipitação, ressaltando-se que necessita de calibração e validação do processo (ARNOLD et al., 1998a; NEITSCH et al., 2011).

Para a simulação no modelo SWAT é necessária à criação de um projeto que necessita da inserção de quatro arquivos, para especificar declividade, uso e cobertura do solo, tipos de solos e sub-bacias, sendo que este penúltimo arquivo foi criado nos padrões norte-americanos, fazendo-se necessária a edição do banco de

dados e a inserção de novos parâmetros. Como resultados da inserção das informações no modelo SWAT, o modelo cria as Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU's) (Figura 2), que são áreas de combinações única do tipo e uso do solo (ABBASPOUR et al., 2007).

Figura 2 – Formação das Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU's).



Fonte: Fukunaga (2012), adaptado pela autora.

3. 5.1. Dinâmica da modelagem hidrológica utilizando o SWAT

O SWAT requer informações do relevo (dados topográficos), uso do solo, manejo de solos e dados meteorológicos. As informações sobre o relevo, uso e tipos de solo podem ser obtidas através do Sistema de Informação Geográfica (SIG), onde serão criados mapas temáticos referentes aos arquivos de entrada requeridos pelo modelo. Os dados meteorológicos incluem: temperatura máxima e mínima (ºC), velocidade do vento (m/s), umidade relativa do ar (%), radiação solar global (MJ/m²dia) e, também, precipitação (mm) (FUKUNAGA et al., 2015; MINGOTI, 2012; NEITSCH et al., 2011; OLIVEIRA, 2014b).

O tipo de solo é uma característica geológica e pedológica de cada região, moldadas ao longo dos anos. Já o uso e ocupação da terra estão ligados pela fonte de mudança que são ocasionadas por ações antrópicas que alteram diretamente o ambiente físico. Analisar os tipos e processos de mudança é fundamental para uma avaliação mais aprofundada das perspectivas de sustentabilidade ambiental.

A vazão não é considerada uma variável de entrada no modelo, no entanto, é necessário um levantamento sobre essa varável para que se possa comparar com os resultados obtidos pela simulação do modelo SWAT. Desta forma o SWAT busca simular o balanço hídrico na bacia hidrográfica. A simulação hidrológica da bacia é separada em duas fases: a terrestre do ciclo hidrológico e a aquática. A fase terrestre controla a quantidade de água e as cargas de sedimento, nutrientes e pesticidas que atingem o canal principal de cada sub-bacia. A fase aquática está relacionada ao movimento de água, sedimentos, qualidade da água e pela rede de canais em direção à saída da bacia hidrográfica (SHEN et al., 2015).

Conforme Arnold et al. (1998), o modelo apresenta os seguintes componentes: clima, ciclo hidrológico, erosão, cobertura do solo e crescimento de plantas, práticas de manejo, processos no canal principal e corpos d’água. Seguem algumas observações sobre os componentes.

A temperatura do solo influencia o movimento da água e a taxa de decaimento dos resíduos. Já a temperatura da superfície é uma função da cobertura e dos resíduos culturais, da temperatura da superfície sem cobertura e da temperatura da superfície no dia anterior (NIAZI et al., 2015; OLIVEIRA, 2014b).

A erosão causada pela chuva e o escoamento são estimados, no modelo SWAT, com a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE). As simulações de erosão e produção de sedimentos são estimadas para cada HRU’s, na qual o sedimento é encaminhado através do canal de fluxo, considerando processos de deposição e degradação, e usando uma equação simplificada.

O SWAT apresenta o componente de crescimento de plantas, em que simula as mudanças temporais de determinadas culturas, tais como altura da copa, profundidade da raiz e biomassa produzida pelas plantas e simulação de nutrientes e pesticidas. Além do manejo que permite ao usuário indicar os tipos e datas das operações na simulação temporal, como indicar áreas irrigadas e reservatórios (ARNOLD et al., 1998a; NEITSCH et al., 2011; OLIVEIRA, 2014b).

Segundo Eshtawi et al. (2016), o modelo requer dados de solos, como os parâmetros físicos (profundidade do perfil, textura, entre outros) e hídricos (condutividade hidráulica e disponibilidade de água por horizonte). Dessa forma é possível simular o transporte de sedimentos.

O modelo dispõe de um banco de dados interno, que possui informações somente de estações meteorológicas dos EUA, assim como as informações pedológicas dos solos e dos parâmetros do uso do solo encontrados em terras americanas (OLIVEIRA, 2014b). Como a simulação foi realizada em uma bacia no Brasil, uma etapa preliminar é a composição de um banco de dados envolvendo informações espaciais e temporais necessárias à simulação.

Para simular os processos que ocorrem no ciclo hidrológico (Figura 3), a dinâmica da modelagem hidrológica utilizada pelo SWAT é embasada na Equação 1 do balanço hídrico (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t}\left(PREC_i - SURQ_i - ET_i - PERCO_i - BF_i\right) \quad (1)$$

Em que:

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

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

t = tempo (dias);

$PREC_i$ = precipitação diária (mm);

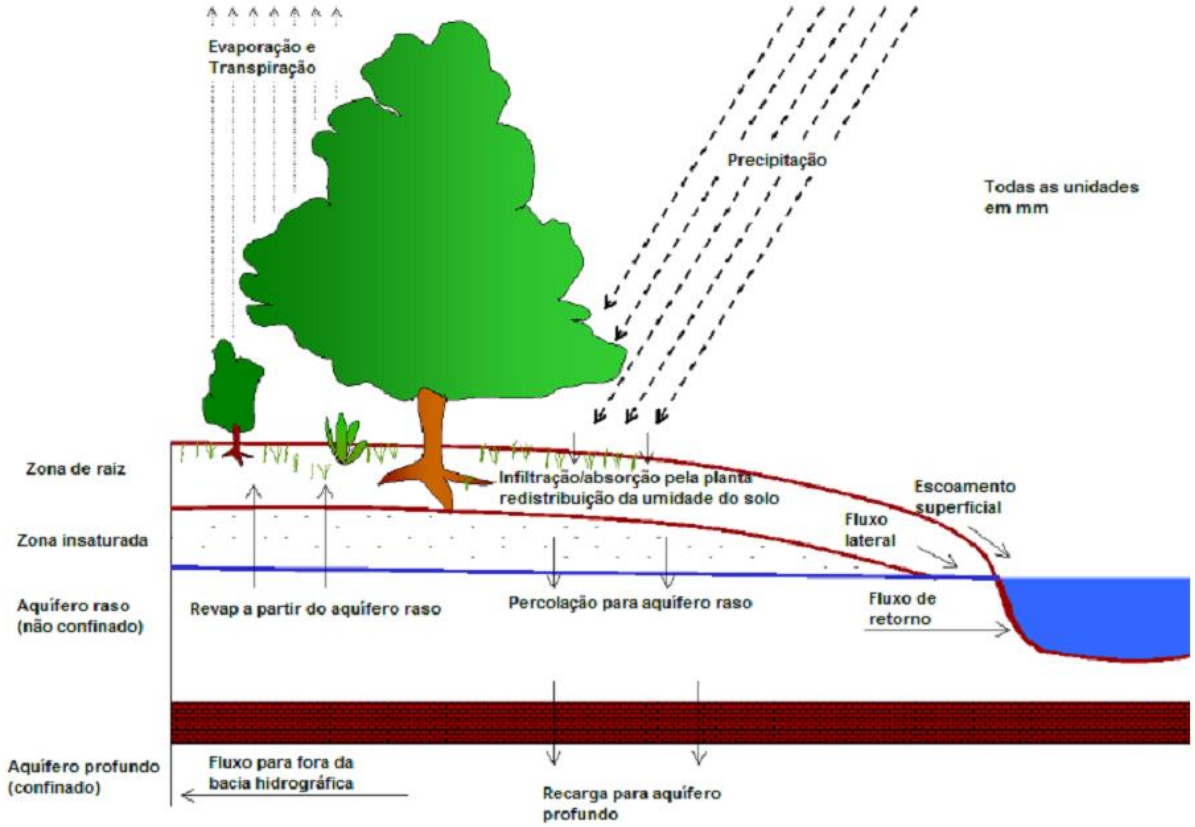
$SURQ_i$ = escoamento superficial diário (mm);

ET_i = evapotranspiração diária (mm);

$PERCO_i$ = percolação diária (mm); e

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

Figura 3 – Exemplo dos componentes do ciclo hidrológico.



Fonte: Neitsch et al. (2011)**,** modificado pela autora.

Arnold et al. (1998, 2000), conceituam algumas das variáveis, considerando o SWAT:

- Precipitação – Os dados de precipitação são obtidos por meio de base de dados de estações meteorológicas, uma das principais maneiras de entrada do modelo SWAT, em que, por meio de sua interação com o ambiente, será transformada em vazão ou fluxo.
- Escoamento Superficial – pode se utilizar o método do número da curva do SCS (*Soil Conservation Service*) ou o método de infiltração de Green e Ampt. Porém este último é utilizado quando se há dados sub-diários.
- Evapotranspiração – é disponível pelo modelo os métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor ou Hargreaves. Fukunaga (2012) e Campanharo (2013) recomendam que a aplicação do método deva ser escolhida conforme as características da área.
- Percolação – Esta variável é calculada no SWAT em cada camada do perfil de solo, sendo o volume de água infiltrado que se desloca de uma

determinada camada de solo para outra, considerado o tempo necessário para atingir o aquífero.

- Fluxo de base – O SWAT utiliza um modelo de armazenamento cinemático baseado na equação de continuidade de massa, em que todo o comprimento da rampa é utilizado como volume de controle.

A subdivisão da bacia hidrográfica possibilita que o modelo represente diferentes evapotranspirações em diversas culturas e solos. O escoamento superficial é previsto separadamente em cada HRU's, direcionado para obter o escoamento superficial total da bacia. Isso aumenta a precisão de obter uma melhor descrição física do balanço hídrico (NEITSCH et al., 2011).

3. 5.2. Análise de sensibilidade, calibração e validação

A capacidade do modelo hidrológico simular adequadamente advém da necessidade de calibração e validação com dados experimentais da própria bacia, visto que muitos modelos divergem da realidade para qual foram programados. Em muitos casos, a calibração manual é complexa, podendo assim utilizar a calibração semi-manual ou automática. Essas etapas são realizadas a fim de obter um ajuste satisfatório, entre os valores simulados e observados, tendo como parâmetro de decisão índices estatísticos (BONUMÁ et al., 2015; EDUARDO et al., 2016; MORIASI et al., 2007).

Para saber se os parâmetros obtidos estão sendo descritos de forma coerente, a calibração, validação e análise de sensibilidade são realizados rotineiramente como parte da modelagem. A análise de sensibilidade tem como objetivo identificar os parâmetros que estão influenciando as alterações nos resultados (ABBASPOUR et al., 2015).

A calibração é necessária para o modelo SWAT obter boas previsões hidrológicas (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Representa o ajuste dos parâmetros para que se obtenha uma aceitável concordância entre os dados observados e simulados (ARNOLD et al., 2000).

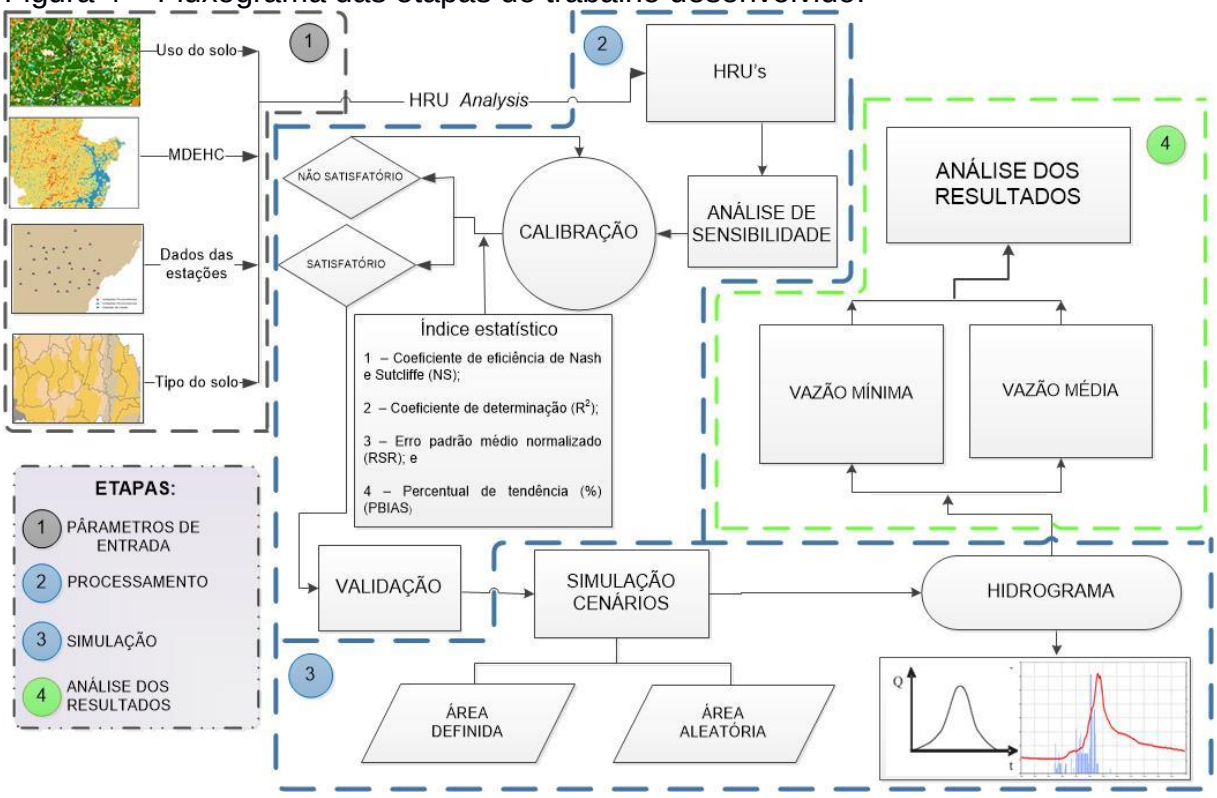
Os dados utilizados para calibração devem ser independentes dos que serão utilizados na validação. Se os mesmos dados forem utilizados para ambos os processos, obtém-se uma validação tendenciosa. A divisão da série de dados disponíveis em “série para calibração” e “série para validação” geralmente é a solução para esse problema.

O propósito da validação do modelo é avaliar se o modelo é capaz de prever as observações de campo para diferentes períodos de tempo a partir do período de calibração (ASHRAF, 2013).

4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no presente trabalho consistiu de quatro etapas. Inicialmente foi constituído um banco de dados composto por tipo e uso do solo, topografia e clima, de acordo com a Etapa 1 da Figura 4. Estas são informações requeridas pelo SWAT para simular o ciclo hidrológico. Na Etapa 2 (Figura 4) foi realizada a calibração e validação do SWAT. Na Etapa 3 (Figura 4) foram realizadas as simulações dos cenários (descritos posteriormente no item 4.4) que consistiram na alteração do uso do solo, sendo gerado, ao final de cada simulação, hidrogramas de vazão. Na Etapa 4 foi realizada a análise dos resultados das simulações.

Figura 4 – Fluxograma das etapas do trabalho desenvolvido.

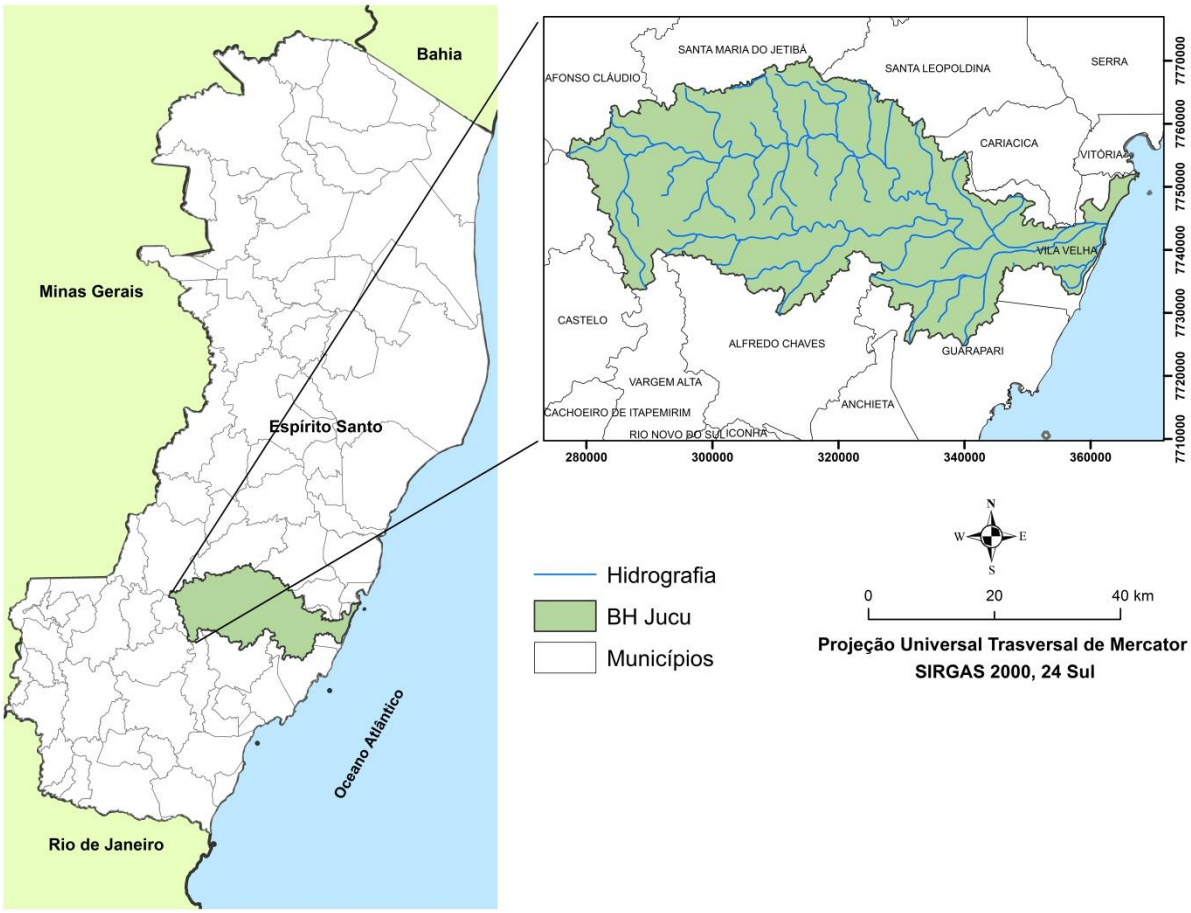


Fonte: a autora.

4. 1. Caracterização da área em estudo

A bacia hidrográfica do rio Jucu (BHRJ), situada entre os paralelos 19,90° e 20,65° Sul e entre os meridiano 41,20° e 40,20° Oeste, encontra-se inserida na região Sudeste do Brasil, no estado do Espírito Santo (Figura 5). Abrange uma superfície aproximada de 4.133 km^2. A classificação climática de Köppen indica a predominância do tipo climático Cfa e Cfb (ALVARES et al., 2013).

Figura 5 – Localização da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

Inserida no bioma Mata Atlântica, a BHRJ conta com fitofisionomia predominante de Floresta Ombrófila Densa (Floresta Tropical Pluvial). Na região central encontra-se uma faixa transversal, de remanescente de Floresta Ombrófila aberta (Faciações da Floresta Ombrófila Densa) (SIMONELLI; FRAGA, 2007).

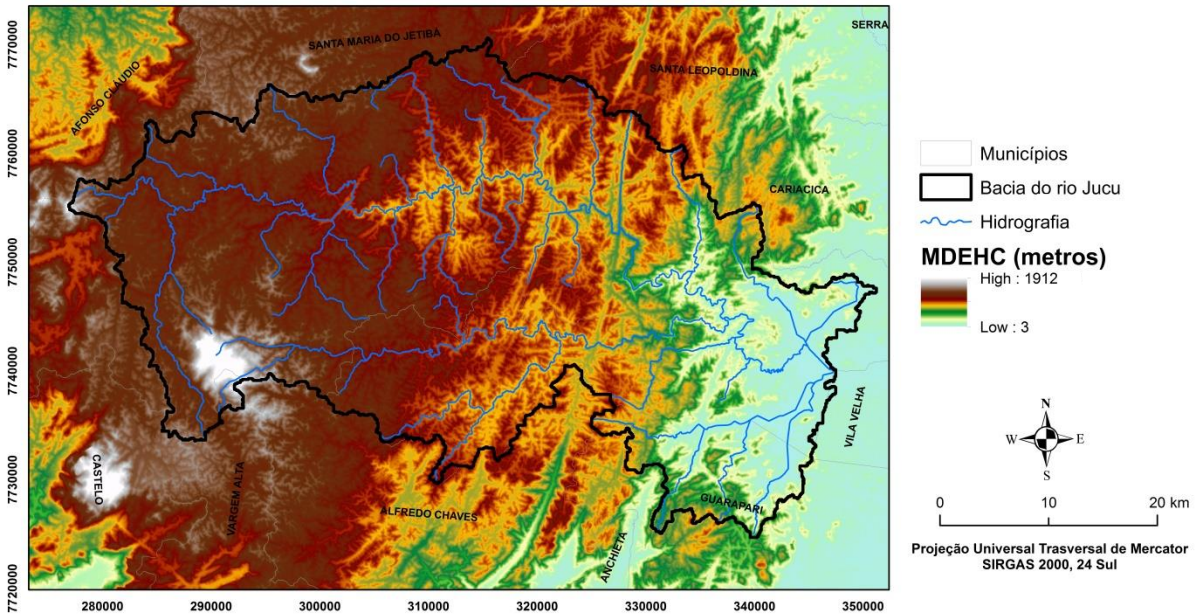
O rio Jucu nasce na Serra do Castelo, próximo a serra da Pedra Azul, e percorre uma extensão de aproximadamente 166 km, desaguando no Oceano Atlântico, na praia da Barra do Jucu, em Vila Velha (IJSN, 2011). Tem como seus principais constituintes o rio Braço Norte, no município de Domingos Martins (MUSSO, 2002) e o rio Braço Sul, nos municípios de Conceição do Castelo e Marechal Floriano (TEIXEIRA; SENHORELO, 2000; TERRA et al., 2010).

4. 2. Base de dados

4.2.1. Topografia

Como informação do relevo (dados topográficos), utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) originário da *Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM), obtido no site da *United States Geological Survey* (USGS) (http://earthexplorer.usgs.gov), com resolução espacial de 30 metros. Este MDE foi convertido em um modelo hidrologicamente consistente (MDEHC), apresentado na Figura 6, seguindo a metodologia proposta por Chaves (2002).

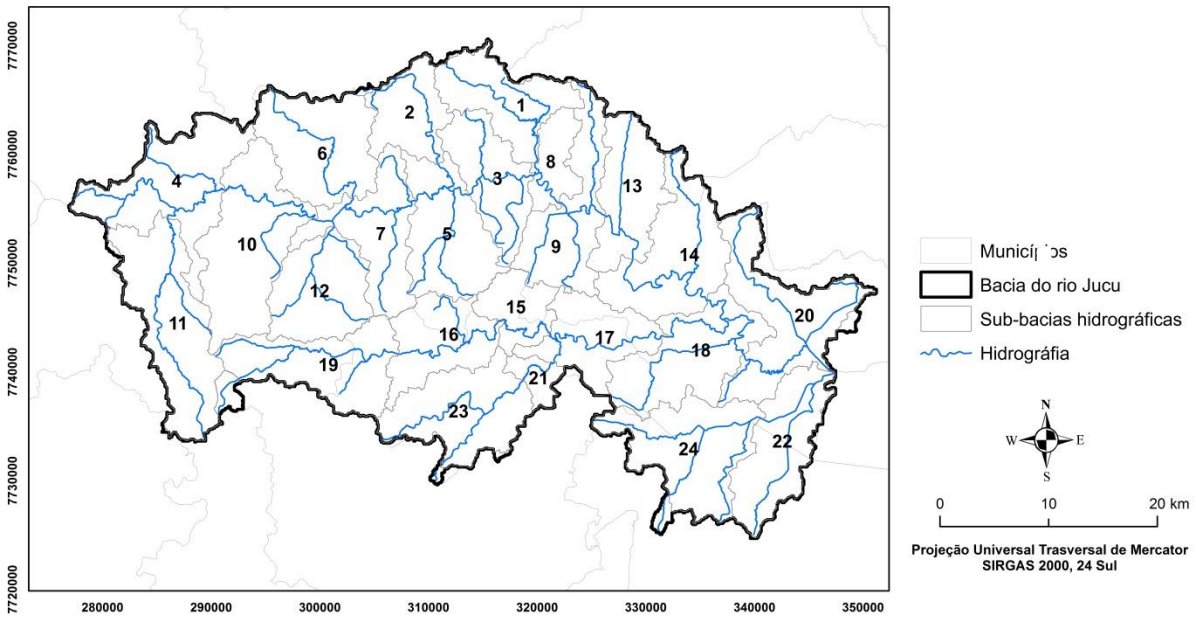
Figura 6 – Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

Os dados foram inseridos no SWAT por meio da interface ArcSWAT. A partir do MDEHC foi delimitada a bacia hidrográfica, com auxílio da ferramenta *Watershed Delineator*. Após esse processo a bacia foi subdividida em sub-bacias, com tamanhos entre 2 e 6% da área total da bacia, como proposto por Jha et al. (2004). Desta maneira, foram delimitadas 24 sub-bacias, conforme apresentado na Figura 7. Na sub-bacia de número 20 está localizada a estação fluviométrica da bacia do rio Jucu, utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 7 – Sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT, dentro da bacia hidrográfica do rio Jucu.

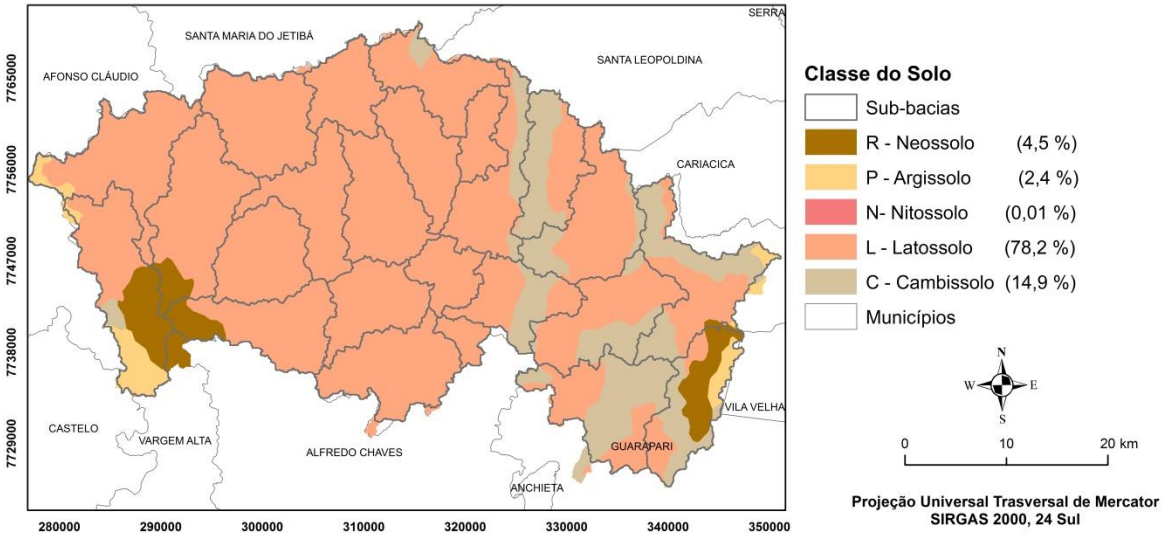


Fonte: a autora.

4.2.2. Tipo de solo

O mapa contendo as características pedológicas da bacia hidrográfica do rio Jucu (Figura 8) foi obtido junto ao site do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (Geobases) (http://www.geobases.es.gov.br). Contém a taxonomia e características pedológicas que são disponibilizadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), coordenado pela EMBRAPA (EMBRAPA, 2013).

Figura 8 – Mapa de classes de solos da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

As informações pertinentes aos solos, fornecidas ao SWAT, consistem na caracterização física e química dos solos, com os parâmetros listados na Tabela 1 (ARNOLD et al., 1998a). As características físicas e químicas de cada solo foram obtidas da tabulação de dados feita por Correia (2016), para a própria BHRJ. Os valores para cada característica do solo estão apresentados, camada a camada na Tabela 2.

Tabela 1 – Características dos solos requeridas pelo SWAT para a caracterização da bacia hidrográfica

Sigla no SWAT	Descrição do parâmetro
SNAM	Nome dado à classe 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^3)
SOL_AWC	Capacidade de retenção de agua do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm/hr)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (% peso 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 equação de MUSLE

Fonte: Fukunaga (2012), adaptado pela autora.

Tabela 2 – Valores das características físicas e químicas para cada classe de solos existente na bacia hidrográfica do rio Jucu

Parâmetros	Classe dos solos				
	Argissolo	Cambissolo	Latossolo	Neossolo	Nitossolo
NLAYERS	9	3	8	2	2
HYDGRP	B	C	B	B	C
SOL_ZMX (mm)	1800	2630	1910	320	180
ANION_EXCL	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
TEXTURE	LS	C	SCL	S	SLC
SOL_Z1 (mm)	100	260	60	105	30
SOL_BD1 (g/cm³)	1,5	1,4	1,14	1,34	1,3
SOL_AWC1	0,057	0,111	0,18	0,08	0,2311
SOL_K1 (mm/h)	58,2643	1,2016	7,9295	9,33	1,3
SOL_CBN1 (%)	0,58	3,22	1,09	2,07	0,4
CLAY1 (%)	10	45	27	18	65
SILT1(%)	7	18	7	22	32
SAND1(%)	83	37	66	60	3
ROCK1(%)	8	2	1	1	1
SOL_ALB1	0,4025	0,0654	0,2834	0,2	0,15
USLE_K1	0,1018	0,1031	0,1094	0	0,1225
SOL_Z2 (mm)	220	1630	250	320	180
SOL_BD2 (g/cm³)	1,5	1,37	1,1	1,4	1,3
SOL_AWC2 (mm)	0,151	0,123	0,25	0,08	0,1393
SOL_K2 (mm/hr)	48,7517	0,1253	4,4844	7,53	1,3
SOL_CBN2 (%)	0,3	0,92	0,91	1,67	0,4
CLAY2 (%)	12	57	31	18,5	76
SILT2 (%)	4	11	5	20,7	31
SAND2 (%)	84	32	64	60,8	3
ROCK2(%)	9	2	1	1	1
SOL_ALB2 (%)	0,4881	0,3186	0,3208	0,2	0,1
USLE_K2	0,0850	0,1086	0,1022	-	0,1225
SOL_Z3 (mm)	310	2630	410	-	-
SOL_BD3 (g/cm³)	1,6463	1,5800	1,03	-	-
SOL_AWC3 (mm)	0,0460	0,1037	0,25	-	-
SOL_K3 (mm/hr)	71,5436	12,7354	4,3108	-	-
SOL_CBN3 (%)	0,22	0,92	0,61	-	-
CLAY3 (%)	8	21	31	-	-
SILT3 (%)	7	24	7	-	-
SAND3 (%)	85	55	62	-	-
ROCK3(%)	10	2	1	-	-
SOL_ALB3 (%)	0,5157	0,3186	0,3943	-	-
USLE_K3	0,0982	0,1548	0,1166	-	-

Continua...

Continuação.

Parâmetros	Classe dos solos				
	Argissolo	Cambissolo	Latossolo	Neossolo	Nitossolo
SOL_Z4 (mm)	450	-	720	-	-
SOL_BD4 (g/cm³)	1,6586	-	1,15	-	-
SOL_AWC4 (mm)	0,0469	-	0,24	-	-
SOL_K4 (mm/hr)	63,6142	-	3,6582	-	-
SOL_CBN4 (%)	0,12	-	0,37	-	-
CLAY4 (%)	9	-	32	-	-
SILT4 (%)	7	-	6	-	-
SAND4 (%)	84	-	62	-	-
ROCK4(%)	10	-	0	-	-
SOL_ALB4 (%)	0,5524	-	0,4651	-	-
USLE_K4	0,1009	-	0,1129	-	-
SOL_Z5 (mm)	580	-	1110	-	-
SOL_BD5 (g/cm³)	1,6612	-	1,5971	-	-
SOL_AWC5 (mm)	0,0737	-	0,0906	-	-
SOL_K5 (mm/hr)	12,3359	-	4,2280	-	-
SOL_CBN5 (%)	0,33	-	0,41	-	-
CLAY5 (%)	23	-	31	-	-
SILT5 (%)	8	-	7	-	-
SAND5(%)	69	-	62	-	-
ROCK5(%)	7	-	1	-	-
SOL_ALB5(%)	0,4781	-	0,4525	-	-
USLE_K5	0,1270	-	0,1181	-	-
SOL_Z6 (mm)	740	-	1420	-	-
SOL_BD6 (g/cm³)	1,6693	-	1,5751	-	-
SOL_AWC6 (mm)	0,0893	-	0,0969	-	-
SOL_K6 (mm/hr)	2,6553	-	2,3186	-	-
SOL_CBN6 (%)	0,33	-	0,5	-	-
CLAY6 (%)	34	-	35	-	-
SILT6 (%)	8	-	6	-	-
SAND6 (%)	58	-	59	-	-
ROCK6 (%)	16	-	1	-	-
SOL_ALB6 (%)	0,4781	-	0,4253	-	-
USLE_K6	0,1204	-	0,1103	-	-

Continua...

Continuação.

Parâmetros	Classe dos solos				
	Argissolo	Cambissolo	Latossolo	Neossolo	Nitossolo
SOL_Z7 (mm)	1050	-	1760	-	-
SOL_BD7 (g/cm³)	1,5605	-	1,5650	-	-
SOL_AWC7 (mm)	0,1055	-	0,1012	-	-
SOL_K7 (mm/hr)	0,7044	-	1,6381	-	-
SOL_CBN7 (%)	0,32	-	0,25	-	-
CLAY7 (%)	42	-	37	-	-
SILT7 (%)	7	-	7	-	-
SAND7 (%)	51	-	56	-	-
ROCK7 (%)	7	-	1	-	-
SOL_ALB7 (%)	0,4814	-	0,5051	-	-
USLE_K7	0,1108	-	0,1144	-	-
SOL_Z8 (mm)	1400	-	1910	-	-
SOL_BD8 (g/cm³)	1,3952	-	1,5551	-	-
SOL_AWC8 (mm)	0,1200	-	0,1030	-	-
SOL_K8 (mm/hr)	0,0290	-	1,4034	-	-
SOL_CBN8 (%)	0,27	-	0,35	-	-
CLAY8 (%)	57	-	38	-	-
SILT8 (%)	4	-	7	-	-
SAND8 (%)	39	-	55	-	-
ROCK8 (%)	4	-	1	-	-
SOL_ALB8 (%)	0,4982	-	0,4715	-	-
USLE_K8	0,0880	-	0,1134	-	-
SOL_Z9 (mm)	1800	-	-	-	-
SOL_BD9 (g/cm³)	1,397263	-	-	-	-
SOL_AWC9 (mm)	0,1192	-	-	-	-
SOL_K9 (mm/hr)	0,037	-	-	-	-
SOL_CBN9 (%)	0,32	-	-	-	-
CLAY9 (%)	57	-	-	-	-
SILT9 (%)	5	-	-	-	-
SAND9 (%)	38	-	-	-	-
ROCK9 (%)	5	-	-	-	-
SOL_ALB9 (%)	0,4814	-	-	-	-
USLE_K9	0,0935	-	-	-	-

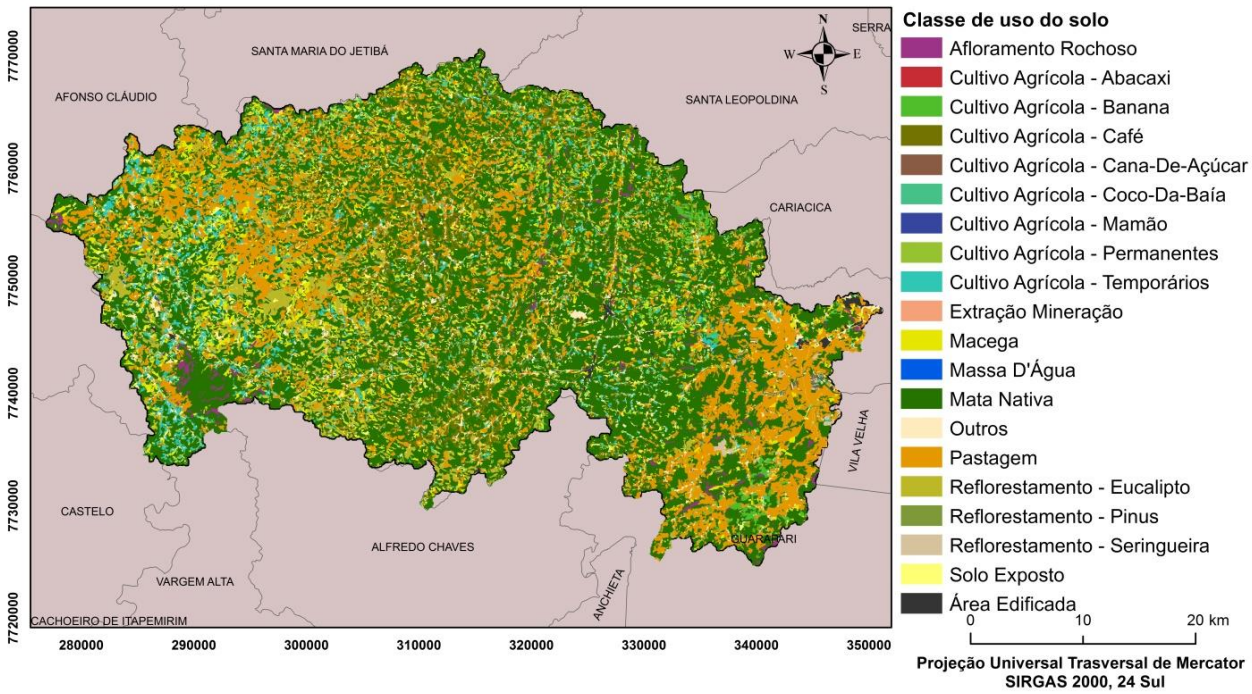
O número após o parâmetro representa a camada do solo ao qual o valor se refere.
Fonte: Correia (2016), adaptado pela autora.

4.2.3. Uso do solo

O mapa de uso do solo foi obtido junto ao mapeamento feito pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA). Tal mapeamento foi elaborado por uma empresa especializada contratada pelo estado (Hiparc Geotecnologia), a partir da fotointerpretação manual do ortofotomosaico retificado do IEMA, referentes ao ano de 2007/2008, sendo processado com SIG para conversão ao formato utilizado pelo SWAT (Figura 9).

Com relação ao uso do solo, o SWAT incorpora uma grande base de dados contendo características de coberturas vegetais e coberturas urbanas. Para configurar as informações do uso do solo da bacia realizou-se uma correlação das classes de uso do solo mapeadas com aquelas disponíveis no banco de dados do SWAT (Tabela 3).

Figura 9 – Classes de usos do solo na bacia hidrográfica do rio Jucu, no período de 2007/2008.



Fonte: a autora.

Tabela 3 – Tipos de cobertura do solo existentes na BHJ e a correlação com o banco de dados do SWAT

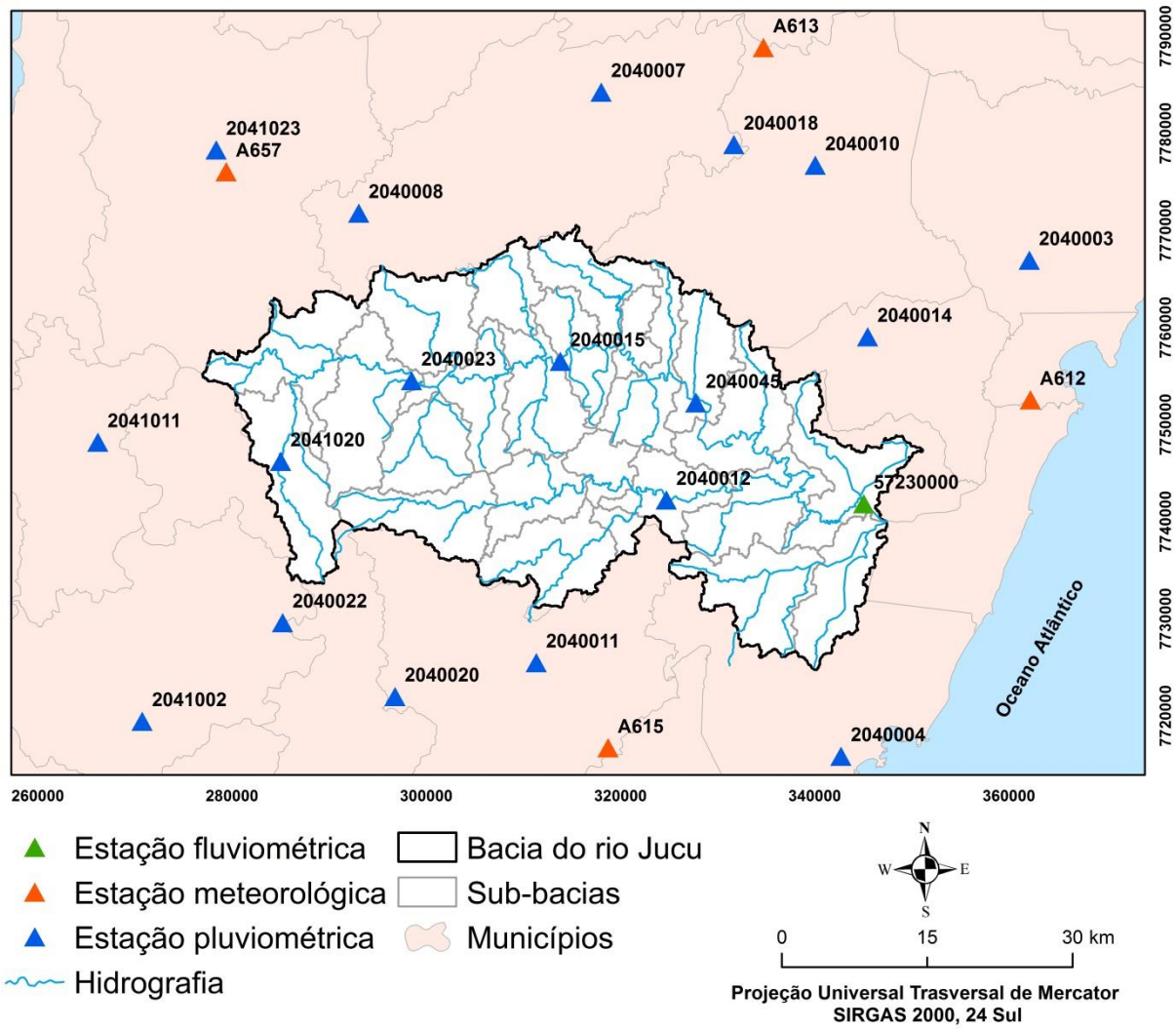
Siglas	Classe adotada no SWAT	Classe de uso do solo
AGRL	Agricultural Land-Generic	Cultivo Agrícola - Temporário
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	Cultivo Agrícola - Permanente
ORCD	Orchard	Outros
FRSE	Forest-Evergreen	Mata Nativa
PAST	Pasture	Pastagem e Macega
WATR	Water	Massas de Água
SUGC	Sugarcane	Cultivo Agrícola - Cana-de-Açúcar
PINE	Pine	Reflorestamento - Pinus
RUBR	Rubber Trees	Reflorestamento - Seringueira
BANA	Bananas	Cultivo Agrícola - Bananas
COFF	Coffee	Cultivo Agrícola- Café
BARR	Barren	Solo Exposto
EUCA	Eucalyptus	Reflorestamento - Eucalipto
PINP	Pineapple	Cultivo Agrícola - Abacaxi
COCO	Coconut	Cultivo Agrícola - Coco-da-Baía
GRAR	Grarigue	Mineração
URLD	Residential-Low Density	Área Urbana e Afloramento Rochoso
PAPA	Papayas	Cultivo Agrícola - Mamão

Fonte: a autora.

4.2.4. Dados hidro-meteorológicos

As séries históricas diárias de precipitação e vazão foram obtidas a partir de postos pluviométricos e fluviométricos, disponibilizados no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), gerenciado pela Agência Nacional de Água (ANA). Os dados meteorológicos diários foram obtidos junto à base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Anexo A). Na Figura 10 estão ilustradas as estações distribuídas na bacia e área de entorno. O período de dados utilizados foi de nove anos (outubro de 2005 a dezembro de 2014).

Figura 10 - Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas situados na bacia do rio Jucu e adjacências, cujos dados foram usados no presente estudo.



Fonte: a autora.

A evapotranspiração potencial (ET_0) foi calculada pelo modelo SWAT, por intermédio do método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

4. 3. Calibração e validação do SWAT

Para efetuar a calibração e, posteriormente, a validação do SWAT, o primeiro procedimento consistiu na sobreposição dos mapas básicos descritos anteriormente (MDEHC, tipo de solo e uso do solo). Desta forma geraram-se as unidades de resposta hidrológica (HRU's), as quais são áreas com características hidrológicas semelhantes. Segundo Han e Zheng (2016), essa etapa é fundamental, pois parte das equações do modelo é solucionada tendo-se as HRU's como distribuição geográfica.

Após esta etapa, foram fornecidos os dados climáticos diários: temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar global, temperatura no ponto de orvalho, e lâmina precipitada.

Para a calibração e validação as séries dos elementos climáticos e vazão foram separadas em três períodos distintos: aquecimento, calibração e validação. Para a fase de aquecimento a série foi duplicada, utilizando os dados do ano de 2007, ação realizada porque nesta fase os dados são descartados, não influenciando nos processos decorrentes. Na fase de calibração manual utilizou-se o período de 2008 a 2011. Depois do processo de calibração manual realizou-se a simulação para a validação dos dados, que compreendeu o período de 2012 a 2014.

Os parâmetros do SWAT a serem calibrados (Tabela 4) foram obtidos de estudos de análise de sensibilidade realizados por Oliveira (2014b), Fukunaga et al. (2015), Lelis et al. (2012), Arnold et al. (2012), Correia (2016) e Moreira (2017), sendo os dois últimos feitos na própria BHRJ.

Durante o processo de calibração alterou-se os valores considerados mais sensíveis. Cada parâmetro foi calibrado manualmente em escala mensal, até que os resultados da simulação do modelo fossem considerados aceitáveis segundo análise da qualidade dos resultados, para posterior simulação diária (ARNOLD et al., 2012).

Tabela 4 - Parâmetros do modelo SWAT utilizados na calibração para a bacia hidrográfica do rio Jucu

Parâmetros	**Descrição**
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adimensional)
ALPHA BF	Constante de recessão do escoamento de base (adimensional)
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H2O/mm solo)
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap” (mm)
SURLAGE	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm³)
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (mm)
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta (adimensional)
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico (adimensional)
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h-1)
FFCB	Armazenamento inicial de água do solo inicial expressa como uma fração do teor de água na capacidade de campo (fração)
OV_N	Valor "n" de Manning para escoamento superficial
GWQMN	Profundidade do limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (mm)
GW_REVAP	Coeficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)
CNCOEF	Coeficiente de ponderação usado para calcular a retenção nos dependentes da evapotranspiração das plantas (adimensional)
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h-1)
SOL_ALB	Albedo do solo úmido (decimal)

Fonte: Correia (2016), adaptado pela autora.

Na finalização do processo realizou-se a fase de validação, com o propósito de averiguar se o modelo tem habilidade de simular com eficiência dados de outros períodos ou condições diferentes das quais foi calibrado. Nesta fase utilizaram-se os parâmetros finais obtidos na fase de calibração.

A avaliação da qualidade das simulações, tanto na calibração, quanto na validação, foi realizada por intermédio de índices estatísticos de desempenho, além de uma análise visual dos hidrogramas. De acordo com os critérios e qualidade dos resultados propostos por Moriasi et al. (2007), calcularam-se os seguintes índices: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) (Equação 2), coeficiente de determinação (r^2) (Equação 3), percentual de tendência (PBIAS) (Equação 4), e erro padrão médio normalizado (RSR) (Equação 5).

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

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)\left(S_i - \overline{S}\right)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(S_i - \overline{S}\right)^2} \tag{3}$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i - O_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i\right)}\right]100 \tag{4}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - S_i\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2}} \tag{5}$$

Em que:

n = número de observações durante o período simulado;

O_i = valores observados;

S_i = valores simulados pelo modelo;

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

$\overline{S}$ = média dos valores simulados.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe varia de -∞ a 1, sendo que os valores próximos a 1 correspondem à simulação ótima. Os valores positivos de PBIAS indicam superestimação do modelo, enquanto os valores negativos indicam subestimação. Os valores baixos para RSR indicam um bom desempenho do modelo, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação dos resultados com base em índices de qualidade da vazão mensal simulada

Classificação	NS	RSR	PBIAS (%)
Muito bom	0,75 < NS ≤ 1,00	0,00 ≤ RSR ≤ 0,50	PBIAS < ±10
Bom	0,65 < NS ≤ 0,75	0,50 < RSR ≤ 0,60	±10 ≤ PBIAS < ±15
Satisfatório	0,5 < NS ≤ 0,65	0,60 < RSR ≤ 0,7	±15 ≤ PBIAS < ±25
Insatisfatório	NS ≤ 0,5	RSR > 0,7	PBIAS ≥ ±25

Fonte: Moriasi et al. (2007).

4. 4. Construção de cenários

Como continuidade da pesquisa, após a calibração e validação do modelo foram realizadas simulações de cenários alternativos de uso do solo na bacia do rio Jucu. A simulação foi executada com as mesmas séries de dados meteorológicos usados na calibração e validação do SWAT.

Optou-se por duas formas distintas de abordagem na simulação dos cenários, doravante denominadas abordagem “aleatória” (AA) e abordagem “definida” (AD). Na AA a localização geográfica das áreas onde foram feitas alterações no uso do solo não foram impostas, mas realizadas aleatoriamente e de forma homogênea em toda bacia hidrográfica pelos algoritmos do SWAT. Apenas os tipos de usos alterados foram indicados, os quais consistiram em troca de pastagem por floresta (reflorestamento) ou troca de floresta por pastagem (desflorestamento). Simularam-se os seguintes cenários para a bacia hidrográfica do rio Jucu:

- AA – cenário atual, com mata nativa correspondente a 45% da área da bacia.
- AA+04 – áreas sob mata nativa, correspondente a 47% da área da bacia.
- AA+07 – áreas sob mata nativa, correspondente a 49% da área da bacia. Este valor coincide, em termos percentuais, com a meta do Programa Estadual de Ampliação da Cobertura Florestal (Programa Reflorestar), proposto em Junho de 2011 pelo Governo do Estado do Espírito Santo, onde a cada 01 hectare a mais de mata nativa ira-se considerar 01 hectare a menos de pastagem (INCAPER, 2016).
- AA+16 – áreas sob mata nativa, correspondente a 53% da área da bacia.

- AA+20 – áreas sob mata nativa, correspondente a 55% da área da bacia.
- AA+24 – áreas sob mata nativa, correspondente a 56,6% da área da bacia.
- AA-25 – áreas sob mata nativa, correspondente a 34,2% da área da bacia.
- AA-50 – áreas sob mata nativa, correspondente a 22,5% da área da bacia.

Essas alterações foram executadas diretamente pelo modelo SWAT utilizando a comando *Rewrite SWAT input files* para a alteração do uso do solo, e a ferramenta *Edit SWAT Input > Land Use Lupdate* (OLIVEIRA, 2014b). Ressalta-se que as áreas alteradas pelo modelo não são de controle do usuário, sendo assim não é possível extrair ou identificar as áreas que foram alteradas, apenas as culturas que foram alteradas.

A abordagem AD foi realizada baseando-se na premissa de que a posição geográfica na qual será realizada a alteração do uso do solo pode interferir no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Desta forma, na AD a localização geográfica das áreas em que houve alteração do uso do solo foi definida e indicada por meio de novo conjunto de mapas de uso do solo para cada cenário de simulação. Apenas cenários de reflorestamento foram simulados para a AD, sendo que, em todos, os percentuais de incremento da cobertura floresta foram idênticos aos cenários AA, sendo a posição geográfica das alterações foi previamente imposta, respeitando o critério legal da localização de áreas de preservação permanente (APP's) e um critério técnico simplificado de conversão para floresta apenas de áreas sob pastagem mais próximas à configuração de macega. Simularam-se os seguintes cenários:

- AD+04 – incremento sob as áreas de mata nativa. Estas áreas referem-se a todas as APP de entorno de cursos d'agua, em uma faixa com largura de 30 metros, além de 50 metros ao redor das nascentes.
- AD+07 – incremento sob as áreas de mata nativa, necessariamente sobre o uso do solo tomado como pastagem, mais próximo à configuração de macega, comumente denominado "pasto sujo". Nesse cenário consideraram-se apenas as áreas de "pasto sujo" localizadas nas regiões mais altas da bacia do rio Jucu. Ademais, o valor coincide, em termos percentuais, com a meta do Programa Reflorestar, anteriormente citado.
- AD+16 – incremento sob as áreas de mata nativa, necessariamente sobre o uso do solo tomado como pastagem, mais próximo à configuração de macega,

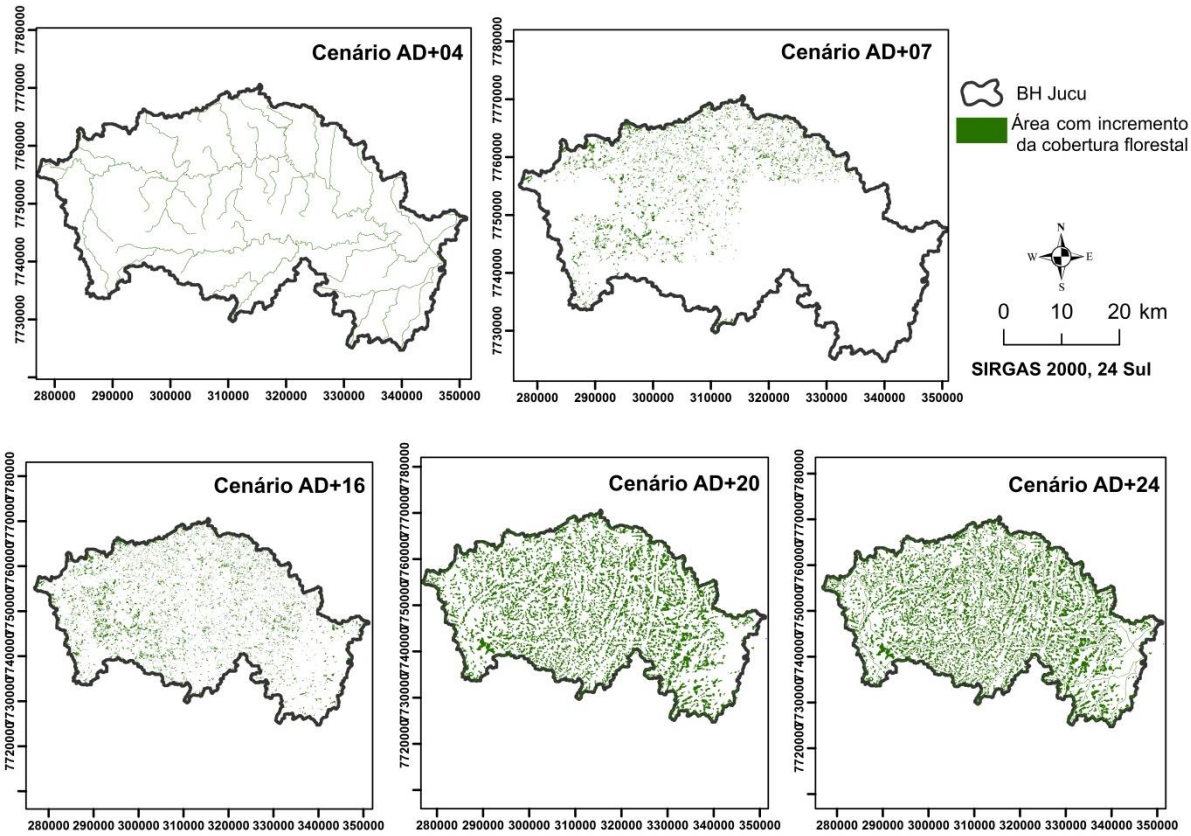
comumente denominado “pasto sujo”. Nesse cenário consideraram-se todas as áreas de “pasto sujo” localizadas da bacia do rio Jucu.

- AD+20 – incremento sob as áreas de mata nativa. Estas áreas referem-se às APP de topo de morros e encostas com declividade superior a 45° em altitudes mínimas de 100 m.
- AD+24 – incremento sob as áreas de mata nativa. Estas áreas correspondem à junção das APP simuladas nos cenários AD+04 e AD+20.

Os cenários AD+04, AD+20 e AD+24 foram elaborados tendo como base nos critérios estabelecidos pelo Novo Código Florestal, Lei nº. 12.727, de outubro de 2012. Para a delimitação das APP’s seguiu-se a metodologia proposta por Peluzio, Santos e Fiedler (2010).

A Figura 11 ilustra, para cada cenário, as áreas nas quais houve conversão de uso para mata nativa.

Figura 11 – Localização das áreas simuladas como florestas nos cenários de alocação definida, na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

A análise dos resultados das simulações foi realizada comparando-se as vazões simuladas em cada cenário com aquelas simuladas no cenário de uso atual do solo. Avaliaram-se as alterações nas vazões médias de longa duração (Q_{med}), nas vazões de permanência em 90% do tempo (Q_{90}) e nas vazões mínimas médias com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). A determinação destas vazões foi realizada conforme SOUSA et al. (2009).

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5. 1. Análise estatística do modelo SWAT

5.1. 1. Analise pré-calibração

O desempenho do SWAT foi avaliado por intermédio de comparação gráfica (análise de hidrogramas) e análise de índices estatísticos. A avaliação por meio da análise dos hidrogramas auxilia na interpretação e serve de base para a seleção dos parâmetros a serem ajustados na fase de calibração (NEITSCH et al., 2011). Nas Figuras 13 e 14 apresentam-se os hidrogramas reais e simulados (antes da calibração do SWAT), em escala de tempo mensal e diária, respectivamente. Observa-se que as vazões simuladas foram superiores às observadas, principalmente aquelas resultantes dos maiores eventos de precipitação. Fukunaga et al. (2015), Oliveira (2014a), Oliveira (2014b), Correia (2016) e Moreira (2017), em estudos no estado do Espirito Santo também observaram a superestimativa das vazões de pico simuladas, reforçando a necessidade de calibração dos parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos que utilizaram. Pela análise visual dos hidrogramas (Figuras 12 e 13) é possível verificar que o modelo SWAT não conseguiu simular a vazão da bacia hidrográfica do rio Jucu de forma satisfatória.

A avaliação estatística do desempenho do SWAT antes da calibração foi realizada por intermédio dos índices estatísticos ilustrados na Tabela 6. Todos os índices estatísticos indicados por Moriasi et al. (2007) mostraram que o desempenho do SWAT foi insatisfatório. Na fase anterior à calibração, valores elevados de PBIAS e RSR, assim como valores negativos de NS, são comuns na literatura, inclusive em bacias hidrográficas do Espírito Santo. Estudos realizados por Correia (2016) e Moreira (2017), na bacia do rio Jucu, assim como Campanharo (2013) e Oliveira (2014b), em estudos realizados em outras bacias no estado do Espirito Santo, usando outros de modelos hidrológicos observaram o mesmo comportamento antes do processo de calibração do SWAT.

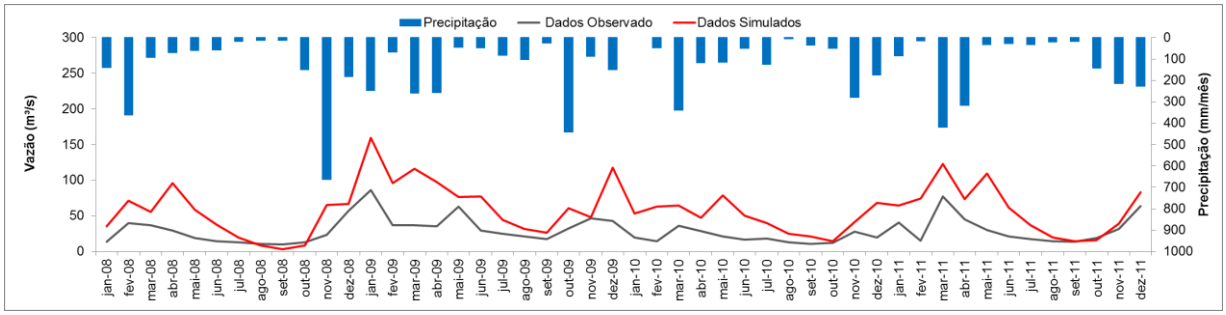
Os hidrogramas das Figuras 13 e 14 e os índices estatísticos da Tabela 6 indicam a necessidade de calibração dos parâmetros de entrada do SWAT.

Tabela 6 – Índices estatísticos utilizados na avaliação das simulações de vazão feitas pelo SWAT antes de sua calibração para a bacia hidrográfica do rio Jucu, Espírito Santo

Índice estatístico	**diária**	**mensal**
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	-4,75	-3,55
Coeficiente de determinação (R^2)	0,18	0,56
Erro padrão médio normalizado (RSR)	2,40	2,13
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	250,32	122,20

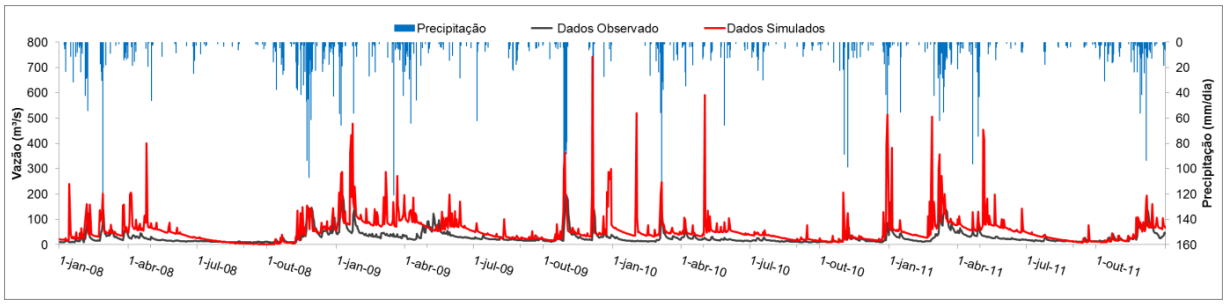
Fonte: a autora.

Figura 12 – Hidrogramas das vazões mensais observadas e simuladas pelo SWAT na bacia do rio Jucu, antes da etapa de calibração, referentes aos anos de 2008 a 2011.



Fonte: a autora

Figura 13 – Hidrogramas das vazões diárias observadas e simuladas pelo SWAT na bacia do rio Jucu, antes da etapa de calibração, referentes aos anos de 2008 a 2011.



Fonte: a autora

5.1. 2. Calibração e validação do SWAT

Para a bacia do rio Jucu, os valores calibrados dos onze parâmetros selecionados como de maior sensibilidade estão ilustrados na Tabela 7. Os valores foram calibrados manualmente um a um, observando a interação e variação entre os mesmos, após cada alteração realizada. No presente estudo não se utilizou o programa SWAT *Calibration and Uncertainty Programa (*SWAT - CUP), por já ter sido utilizado por Oliveira (2014b), Correia (2016) e Moreira (2017), não apresentando resultados satisfatórios em comparação com a calibração manual, especialmente.

Tabela 7 – Parâmetros do SWAT calibrados para a bacia do rio Jucu

Parâmetro	**Valor inicial**	**Valor calibrado**	**Método de variação**
CN2 (adimensional)	25 – 98	- 0,5	Multiplicação
CANMX (MM)	0 –100	*	Substituição
SOL_AWC (mm H_2O mm $solo^{-1}$)	0,028 – 0,118	1,4	Multiplicação
SURLAG (adimensional)	4	2	Substituição
ALPHA_BF (dias)	0,048	0,95	Substituição
GW_DELAY (dias)	31	150	Substituição
GW_REVAP (adimensional)	0,02	0,2	Substituição
GWQMN (mm)	5000	2300	Substituição
REVAPMN (mm)	1.000	500	Substituição
EPCO (adimensional)	0,1	0,3	Substituição
ESCO (adimensional)	0,95	0,6	Substituição

*O parâmetro variou de acordo com a cultura, eucalipto (15 mm); floresta (26 mm) e café (10 mm). Fonte: a autora.

Observa-se, pela Tabela 7, que os valores de CN2 foram multiplicados por 0,5, ou seja, todos os usos do solo tiveram seus valores de CN2 reduzidos em 50%. Peterson e Hamlett (1998) classificam o CN2 como o parâmetro de maior sensibilidade, por influenciar diretamente o escoamento superficial. Estudos similares realizados na bacia do rio Jucu, por Correia (2016) e por Moreira (2017),

mostraram a redução deste mesmo parâmetro em 35% e 25%, respectivamente. Em trabalhos realizados no sudeste do Brasil, Andrade et al. (2013) reduziram o CN2 em 38% e Fukunaga et al. (2015) o reduziram em 9 %. Ainda em bacias brasileiras, Bonumá et al. (2010, 2015) reduziram-no em 10%.

O segundo parâmetro a ser alterado foi o CANMX. Este parâmetro afeta significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração (ARNOLD et al., 2012), e representa a lâmina de água interceptada pela vegetação. Apenas os valores para o eucalipto (CORREIA, 2016), mata nativa (CORREIA, 2016) e café foram adequados para 15 mm, 26 mm e 10 mm, respectivamente.

O terceiro parâmetro a ser alterado foi o SOL_AWC. A alteração deste parâmetro, que representa a capacidade de água disponível no solo, afeta diretamente na estimativa da vazão. Seus valores foram multiplicados por 1,4, ou seja, sua capacidade foi aumentada em 40%. Moreira (2017) em estudo realizado na bacia do rio Jucu, bem como Fukunaga et al. (2015) e Andrade, Mello e Beskow (2013) em estudo no sudeste do Brasil, calibraram acréscimos de 39%, 41,8% e 44%, respectivamente, os quais são muito próximos ao valor utilizado nesta calibração.

O valor de SURLAG foi reduzido em 50%, ou seja, passou de 4 para 2 dias. Este representa o coeficiente de retardo do escoamento superficial direto, que controla a entrada de água oriunda do escoamento superficial no canal principal (ARNOLD et al., 2012). Pinto (2011), Salles (2012) e Carvalho (2014) também obtiveram reduções substituindo seus valores de SURLAG por 1,32 dias, 0,01 dias e 2,75 dias, respectivamente.

Os parâmetros ALPHA_BF, GW_DELAY e GW_REVAP foram substituídos por 0,95 dias, 150 dias e 0,2 respectivamente. Esses parâmetros representam a constante de recessão do escoamento de base, o tempo de retardo da água subterrânea e o coeficiente de ascensão de água à zona de saturação. Eles influenciam na simulação da resposta do fluxo de retorno da recarga da água subterrânea, refletindo assim na redução da disponibilidade de água no escoamento de base. Os valores para GWQMN e REVAPMN foram substituídos por 2300 e 500 respectivamente. Esses parâmetros representam o limite de profundidade do solo. A água encontrada abaixo deste limite começa a contribuir para o escoamento de base, contribuindo para o “revap” ocorrer. A alteração desses parâmetros em conjunto interferiu na simulação da ascensão da água para a zona insaturada.

Correia (2016), em estudo realizado na bacia do rio Jucu, alterou os parâmetros de ALPHA BF (0,94), GW DELAY(304,89), GW REVAP (0,15) GWQMN (1953,57) e REVAPMN (446,42). Já Moreira (2017), para a mesma bacia, alterou os parâmetros por 0,0007 dias, 39 dias, 0,0509, 408 mm e 647 mm, respectivamente. Oliveira (2014b) e Fukunaga et al. (2015), em estudos no sudeste brasileiro, Salles (2012) e Strauch et al. (2012), em estudos no centro oeste, adotaram valores similares aos descritos neste trabalho, corroborando que as alterações influenciam na dinâmica da modelagem e, consequentemente, nas vazões simuladas.

O parâmetro EPCO foi alterado para 0,3 e o ESCO para 0,6, ou seja, o valor de ECPO foi maior que o inicial, enquanto o valor de ESCO foi reduzido. Esses parâmetros representam o fator de compensação de evaporação da planta e coeficiente de compensação de evaporação de água no solo, respectivamente. Interferem na disponibilidade de água em níveis mais profundos do solo, ou seja, após a alteração dos parâmetros houve uma maior simulação na demanda evaporativa do solo e da evapotranspiração. Correia (2016), obteve uma alteração idêntica aos valores utilizados neste estudo. Oliveira (2014b), Fukunaga et al. (2015), Moreira (2017), Brighenti et al. (2016) e Blainski et al. (2017), em estudos no território brasileiro, calibraram valores similares ou na mesma ordem de grandeza aos utilizados neste estudo.

Com relação à calibração, Beven (2012) e Cibin et al. (2010) ressaltam que pode haver grande variedade nos valores finais calibrados, isso porque naturalmente existem grandes variabilidades espaciais e temporais dos parâmetros de entrada do SWAT. Desta forma, é improvável que a calibração de apenas um parâmetro seja satisfatório e sim a interação entre os parâmetros, que ocasionará valores aceitáveis. No presente trabalho, todos estes ajustes realizados contribuíram para melhorar a previsão das vazões simuladas, conforme mostram os índices da Tabela 8, em que observam-se valores satisfatórios dos índices estatísticos, de acordo com os critérios de Moriasi et al. (2007).

Tabela 8 - Índices estatísticos utilizados na avaliação das simulações de vazão feitas pelo SWAT em sua calibração para a bacia hidrográfica do rio Jucu, Espírito Santo

Índice estatístico	**diária**	**mensal**
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	0,40	0,60
Coeficiente de determinação (R^2)	0,42	0,64
Erro padrão médio normalizado (RSR)	0,81	0,66
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	28,82	11,83

Fonte: a autora.

Observa-se que em escala diária as estatísticas da Tabela 8 são inferiores às da escala mensal. Gassman et al. (2007) e Bauwe et al. (2016), ressaltam que para as simulações em escala mensal os modelos apresentam um melhor desempenho. Moriasi et al. (2007), ressalta que a calibração diária é um processo complexo em relação a dados mensais. Desta forma os limites dos índices estatísticos devem ser menos rigorosos para a escala diária.

Na análise do RSR obtiveram-se valores satisfatórios, de 0,81 para dados diários e 0,66 para dados mensais.

O NS foi igual a 0,40 para os valores diários e 0,60 para os valores mensais, a qual é uma estatística considera confiável na avaliação de ajuste em modelos hidrológicos (SERVAT; DEZETTER, 1991). Silva et al. (2008) ressaltam que quando o valor de NS estiver entre 0,36 e 0,75 o desempenho é considerado satisfatório. Desta forma ao analisar-se a Tabela 8, os valores obtidos através das simulações diárias e mensais estão dentro dos limites de aceitação propostos tanto por Moriasi et al. (2007) quanto por Silva et al. (2008).

Oliveira (2014a), Correia (2016) e Moreira (2017), em estudos na bacia do rio Jucu, obtiveram calibrações satisfatórias, com índices estatísticos mensais semelhantes aos do presente estudo. Em seus trabalhos, o NS variou entre 0,50 e 0,85; o RSR entre 0,38 e 0,72; e o PBIAS entre -1,55 e 20,7.

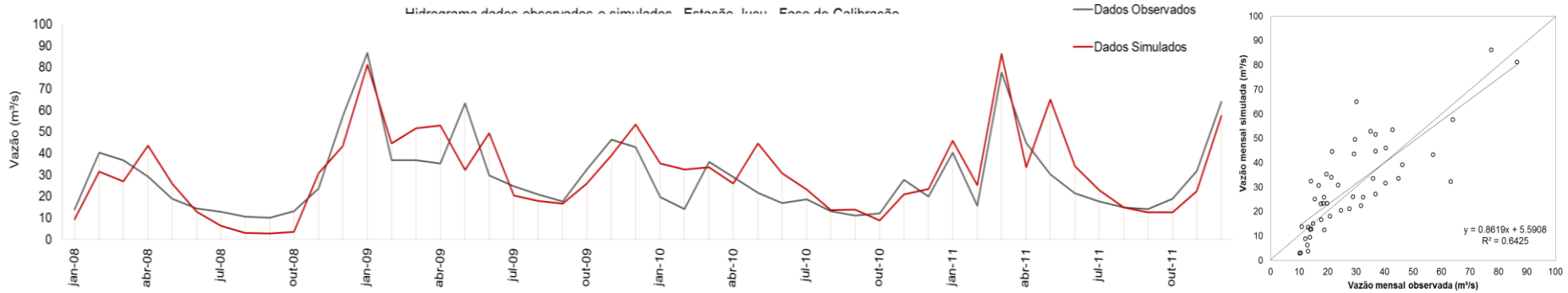
Já para os dados em escala diária, Correia (2016) e Oliveira (2014b) observaram desempenho pior que o do presente trabalho, embora ainda satisfatório, com NS iguais a 0,06 e 0,38; RSR iguais a 0,97 e 2,44; e PBIAS iguais a 0,07 e -17,53. Valores diários muito próximos ao do presente estudo também foram observados por Bauwe et al. (2016), em estudo no nordeste da Alemanha, quando utilizou o método do numero da curva (SCS) para simular o escoamento superficial. Os valores foram: NS igual a 0,56; RSR igual a 0,71; e PBIAS igual a 13,2.

Analisando os gráficos de correlação (Figuras 14 e 15), observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,42 para a simulação diária e 0,64 para a simulação mensal, sendo classificados como satisfatórios. Os gráficos ilustram também o bom ajuste do modelo para os dados mensais, onde se obteve um coeficiente angular de 0,86 e coeficiente linear de 5,59. Já para os dados diários, o coeficiente angular foi de 0,60 e o coeficiente linear de 11,55.

Nas Figuras 14 e 15 observam-se os hidrogramas de vazão para os dados diários e mensais, ilustrando a eficácia da calibração, sendo os valores simulados próximos aos observados. Os gráficos de dispersão dos hidrogramas (Figuras 15 e16) e os índices da Tabela 10 indicam uma melhoria no ajuste das vazões simuladas após a calibração, em relação às vazões observadas, apesar das vazões simuladas ainda tenderem a ser subestimadas.

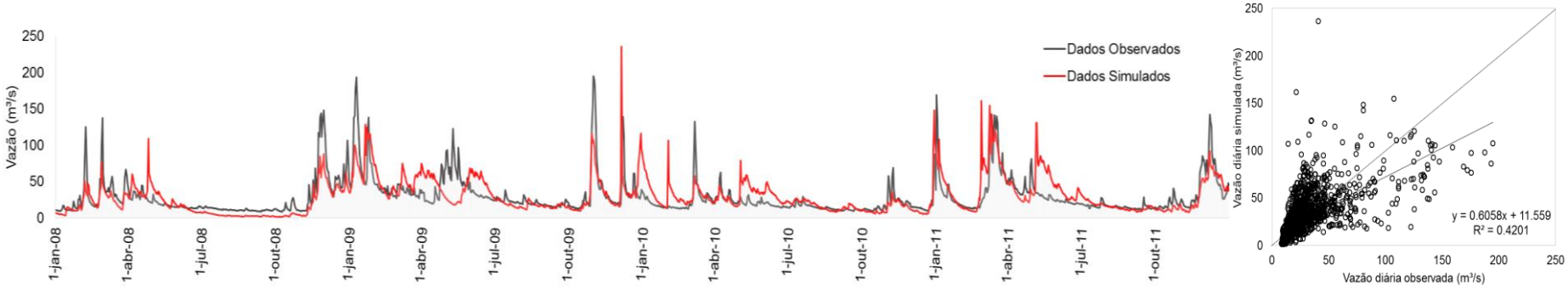
Ressalta-se que a etapa de calibração dos dados não assegura a exatidão das predições do modelo. Os parâmetros obtidos do modelo calibrado contêm incertezas; porem, estas são minimizadas quando se aplica os dados em qualidade e quantidade satisfatórios. Desta forma, após os dados serem calibrados, estes deve ser validados para situações semelhantes àquelas em que se quer aplicá-los (LELIS et al., 2012).

Figura 14 – Hidrogramas das vazões mensais observadas e simuladas pelo SWAT, fase de calibração para a bacia do rio Jucu e gráfico de correlação, referentes aos anos de 2008 a 2011.



Fonte: a autora

Figura 15 – Hidrogramas das vazões diárias observadas e simuladas pelo SWAT, fase de calibração para a bacia do rio Jucu e gráfico de correlação, referentes aos anos de 2008 a 2011.



Fonte: a autora

A etapa de validação permitiu confirmar a eficiência do modelo. Na Tabela 9 estão apresentados os valores da estatística da vazão diária e mensal.

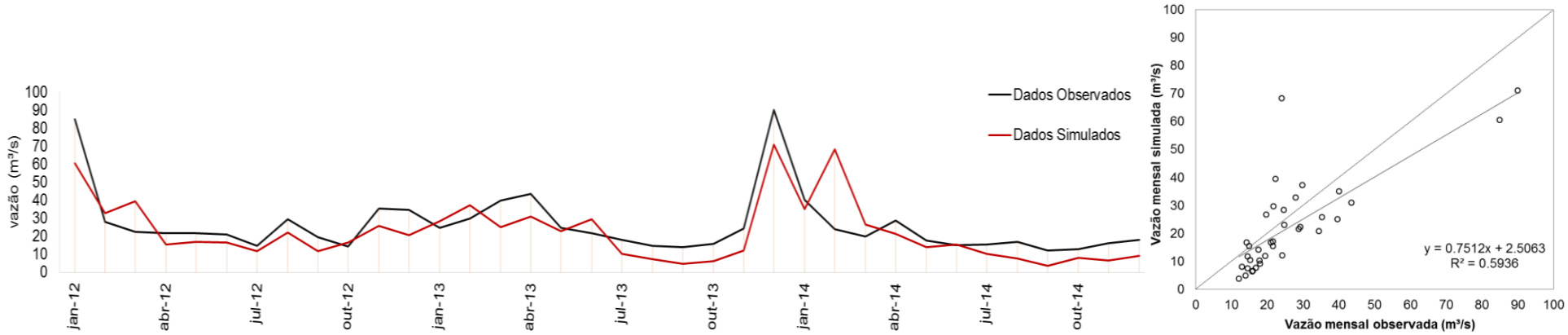
Tabela 9 – Índices estatísticos utilizados na avaliação das simulações de vazão feitas pelo SWAT na fase de validação para a bacia hidrográfica do rio Jucu, Espírito Santo

Índice estatístico	**diária**	**mensal**
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	0,52	0,50
Coeficiente de determinação (R^2)	0,56	0,59
Erro padrão médio normalizado (RSR)	0,71	0,70
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	22,11	14,83

Fonte: a autora.

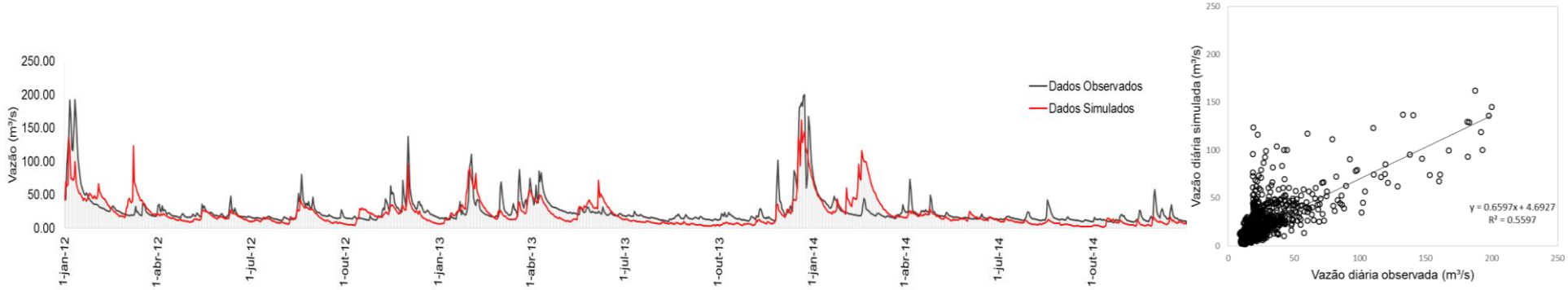
Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas as vazões observadas e simuladas em escala mensal e diária pelo modelo, para o período da validação (2012 a 2014). Observa-se um melhor ajuste da simulação na fase de validação para os dados diários, fato comprovado pelo coeficiente angular da reta, que passou 0,60 para 0,65 e coeficiente linear, advindo de 11,55 para 4,60, e R^2, saindo de 0,42 para 0,55.

Figura 16 – Hidrogramas vazões mensais observadas e simuladas pelo SWAT, fase de validação para a bacia do rio Jucu e gráfico de correlação, referentes aos anos de 2012 a 2014.



Fonte: a autora

Figura 17 – Hidrogramas vazões diárias observadas e simuladas pelo SWAT, fase de validação para a bacia do rio Jucu e gráfico de correlação, referentes aos anos de 2012 a 2014.

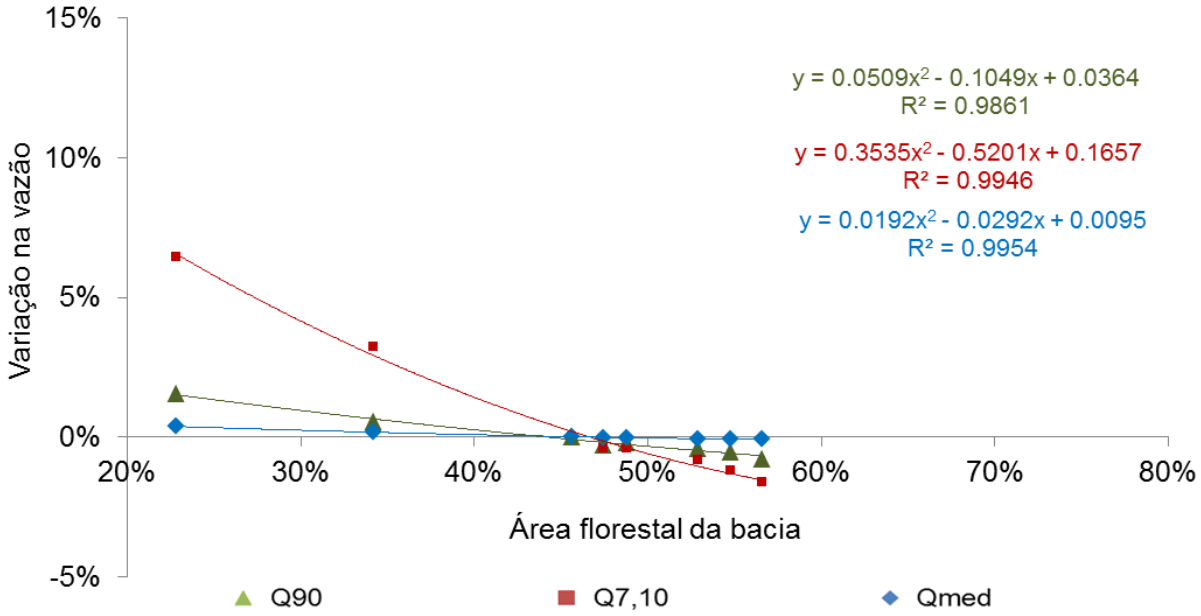


Fonte: a autora

5. 2. Cenários simulados

A proposta de simulação de cenários teve como objetivo avaliar as simulações das vazões médias (Q_{med}) e mínimas (Q_{90} e $Q_{7,10}$), para diferentes cenários de uso do solo. Sendo assim, foram simulados pelo modelo SWAT sete cenários com alteração no uso do solo como citado no item 4.4, além do cenário de uso atual. Na Figura 18 observam-se, em comparação com o cenário de uso do solo atual, a variação das vazões simuladas em cada cenário de uso do solo decorrentes do desflorestamento ou reflorestamento em área de pastagem.

Figura 18 - Variação percentual das vazões médias (Q_{med}), de permanência em 90% do tempo (Q_{90}) e mínima média com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), em função do percentual de alteração na área total da bacia, tendo como base do comparação o cenário de uso do solo atual.



Fonte: a autora.

Observa-se na Figura 18 tendência de redução das vazões simuladas, conforme incrementa-se área de floresta sob o uso de pastagem. A Q_{med} simulada variou entre 26,66 e 26,78 m³/s (26,68 m³/s no cenário atual); a Q_{90} variou entre 6,96 e 7,12 m³/s (7,01 m³/s no cenário atual) e a $Q_{7,10}$ variou entre 2,44 m³/s e 2,65 m³/s

(2,48 m³/s no cenário atual). Tais diferenças são muito pequenas, sendo apenas matematicamente perceptíveis nas casas decimais.

No “senso comum” tem-se a compreensão que a cobertura florestal é responsável por aumentar as vazões médias e, ou mínimas, pois ajudam na restauração e melhoria das funções hidrológicas do solo, melhorando a infiltração e a recarga dos aquíferos (BRUIJNZEEL, 2004a; MENDES, 2016; OLIVEIRA, 2014b). Todavia, normalmente o aumento da cobertura florestal está associado ao aumento da evapotranspiração e da interceptação da precipitação pelo dossel da floresta. Alguns autores (ZHANG; DAWES; WALKER, 2001) classificam a evapotranspiração como o principal processo hidrológico responsável pelas mudanças, em escala anual, nas vazões de bacias hidrográficas. Como a evapotranspiração e a interceptação das florestas são expressivamente superiores à da vegetação de menor porte (BACELLAR, 2005), o impacto final sobre as vazões pode ser positivo, negativo, ou inexpressivo. O impacto final das florestas sobre as vazões dos cursos d’água depende do balanço entre o impacto positivo do aumento da infiltração com o impacto negativo do aumento da evapotranspiração.

Essa tendência matemática de redução da Q_{med} com o incremento da área sob floresta é evidenciada em diversos estudos baseados em coleta de dados de vazões médias em diversas bacias hidrográficas no planeta (ANDRÉASSIAN, 2004; BALBINOT et al., 2008; BOSCH; HEWLETT, 1982; BRUIJNZEEL, 1990; COE et al., 2011; FARLEY; JOBBÁGY; JACKSON, 2005; LOCATELLI; VIGNOLA, 2009; SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010; ZHANG et al., 2008). Nas proximidades da bacia do rio Jucu, Mendes (2016), em estudo na bacia do rio Itapemirim – ES, observou que a redução do percentual de floresta no decorrer do tempo, ocasionou aumentos na Q_{med}. Da mesma forma, e utilizando-se de modelagem hidrológica, Perazzoli et al. (2013), Oliveira (2014b), Nóbrega (2014) e Li et al. (2017) observaram um aumento médio no escoamento, em consequência da redução de área coberta por floresta, onde a mesma foi convertida em pastagem.

No presente trabalho, com relação à Q_{med}, embora a tendência matemática seja de decréscimo das vazões em função do aumento da área florestada, a variação foi muito pequena, menor que 1% de diferença entre os cenários de menor (56% da bacia com floresta) e maior (23% da bacia florestada) Q_{med} simulada. Tendência semelhante, isto é, mudança inexpressiva na Q_{med} devido ao reflorestamento (com a espécie florestal eucalipto, apenas) sob área de pastagens

também foi evidenciada, em bacias do Espírito Santo, com dados de campo (ALMEIDA et al., 2007) ou em estudos de simulação realizadas, com o modelo SWAT (OLIVEIRA; CECÍLIO; ZANETTI, 2015). De forma semelhante, Eugénio et al. (2013) não evidenciaram alterações expressivas na Q_{med} na bacia do rio Itapemirim, ES, decorrentes do desflorestamento da Mata Atlântica. Finalmente, e da mesma forma que no presente trabalho, Souza (2015) e Nunes (2007), analisando a influência das mudanças no uso do solo em outras regiões do Brasil, observaram que não há alteração expressiva na Q_{med}.

O impacto da variação da cobertura florestal na vazão média é nulo ou de difícil identificação quando o desmatamento é menor que 20% da área da bacia (BOSCH; HEWLETT, 1982). O valor de 20% da área da bacia deve ser tomado apenas como uma referência, pois a literatura indica uma faixa de variação entre 15% e 50% da área da bacia desmatada (BRUIJNZEEL, 2004b; JOHNSON, 1998; STEDNICK, 1996). Através da Figura 19, foi possível observar que os valores de alterações na área de florestal (reflorestamento ou desflorestamento), apresentaram o percentual de 23%, tornando a influência muito pequena nas Q_{med}.

Especificamente tratando da bacia hidrográfica do rio Jucu, Correia (2016) também observou aumento (12,68 %) na vazão média quando simulou um cenário extremo, com a conversão de 100% da área da bacia em pastagem. Porém quando simulou área da bacia com cobertura florestal de 50% para 100%, essa mudança foi pouco expressiva. Vale salientar que a autora só identificou essas alterações expressivas com extrema mudança do uso do solo, corroborando com os resultados deste estudo, onde pequenas alterações feitas se tornaram pouco expressivas para a vazão media.

No tocante às vazões mínimas (Q_{90} e $Q_{7,10}$), observa-se, na Figura 19, que estas sofreram maiores alterações: a ($Q_{7,10}$) variou entre o incremento em 7% (cenário com menor área florestada) e o decréscimo de 2% (cenário com maior área florestada), sendo que para a (Q_{90}) as variações foram inferiores.

Na literatura encontram-se resultados de experimentos que ilustram tanto aumento quanto redução das vazões mínimas depois do desmatamento (TUCCI; CLARKE, 1997). Tal impacto depende do balanço entre a redução da evapotranspiração e a redução da infiltração e, consequentemente, da recarga do aquífero, decorrentes do desmatamento. Caso o desmatamento implique em severa degradação das propriedades do solo ligadas à infiltração, a recarga será reduzida e

a erosão do solo significativamente incrementada. Por outro lado, caso o novo cultivo não permita uma degradação severa do solo, pode ocorrer uma maior recarga do aquífero, decorrente da menor evapotranspiração, aumentando, dessa forma, as vazões no período de estiagem (vazões mínimas).

Silberstein et al. (2003) verificaram, ao monitorar a bacia de Collie desde 1970, ao sudoeste da Austrália, a mudança da vegetação nativa por culturas agrícolas e pastagens causou aumento do lençol freático e, consequentemente, um escoamento básico (associado às vazões mínimas) elevado.

Correia (2016), também em estudo na bacia do rio Jucu, observou mudanças pouco expressivas nas vazões médias e mínimas simuladas pelo SWAT, decorrentes de cenários de cobertura floresta correspondentes a 20, 36, 50 e 100% da bacia. Embora sejam pouco expressivas, as variações nas vazões mínimas apresentaram comportamento oposto ao encontrado no presente trabalho, tendendo em aumentar com o incremento da área florestada. Sabe-se que diferentes valores dos parâmetros de entrada e formas de modelagem dos processos hidrológicos influenciam nas vazões estimadas. Embora não esteja muito claro no trabalho de Correia (2016), há grande diferença entre o CANMX considerado nos dois trabalhos. Ambos consideram CANMX igual a 26 mm para a floresta. Todavia, para demais usos aparentemente Correia (2016) atribuiu um valor de 63,35 mm, enquanto esses valores são expressivamente inferiores a 26 mm no presente trabalho. Salienta-se ainda, algumas das diferenças nas configurações de uso do SWAT, onde Correia (2016) utilizou, para o cálculo da evapotranspiração, o método de Hargreaves & Samani[1], o qual possui tendência em superestimar a evapotranspiração em períodos úmidos (PEREIRA et al., 1997). Além disso, o modelo de elevação digital de 90 m, classificação do uso e tipo de solo, juntamente com o ajuste nos demais parâmetros de calibração, provavelmente podem ter influenciado os resultados.

Pesquisa realizada por Rodrigues et al. (2015) também observou um aumento da vazão mínima, para a simulação na bacia hidrográfica do vale do Rio Pará no estado de Minas Gerais, conforme houve o acréscimo na área de floresta, apresentou uma maior vazão. Porém estudos realizados por Oliveira (2014b), Pereira (2013), Blainski et al. (2015) e Smethurst et al. (2015) corroboram com os

[1] Comunicação pessoal da Tamires Partélli Correia, autora do trabalho Correia (2016).

resultados em que há diminuição da vazão conforme há o incremento de área de floresta.

Mendes (2016) discute que, em alguns casos, as florestas tendam a reduzir a disponibilidade hídrica nos rios, mediante os processos de evapotranspiração, mas as mesmas são importantes recursos naturais no que diz respeito aos aspectos de conservação de bacias hidrográficas. A floresta melhora os parâmetros físicos do solo colaborando para uma maior infiltração e consequentemente, uma redução do escoamento superficial, assim como na geração de sedimentos na bacia.

Correia (2016) ressalta que a retirada extrema da cobertura florestal não é uma boa estratégia para a gestão e conservação hídrica da bacia, pois resulta em um maior escoamento superficial e, também, o aumento da carga de sedimentos e erosão. De maneira geral, as florestas possuem impactos positivos ao ambiente; porém, há inúmeras discussões sobre desempenho da floresta no regime hidrológico dos cursos d' agua. Balbinot et al. (2008) e Lelis et al. (2012) abordam, em seus estudos, que em bacias reflorestadas não há maior produção no volume das vazões quando comparado com bacias de usos alternados de cobertura vegetal. Porém, observa-se frequentemente, em bacias com grande porcentagem de cobertura florestal, que o fluxo de água é mais estável e sustentável que em cenários contrários.

A composição da paisagem pode afetar processos hidrológicos em relação a transporte de sedimentos e nutrientes nos cursos d' agua, podendo influenciar as concentrações de contaminantes da água direta ou indiretamente. As áreas agrícolas contribuem para a degradação da qualidade da água devido a vários fatores, como a aplicação de fertilizantes, alterações nas condições de superfície do solo, aumento da área impermeável e geração de poluição (ZHOU et al., 2017).

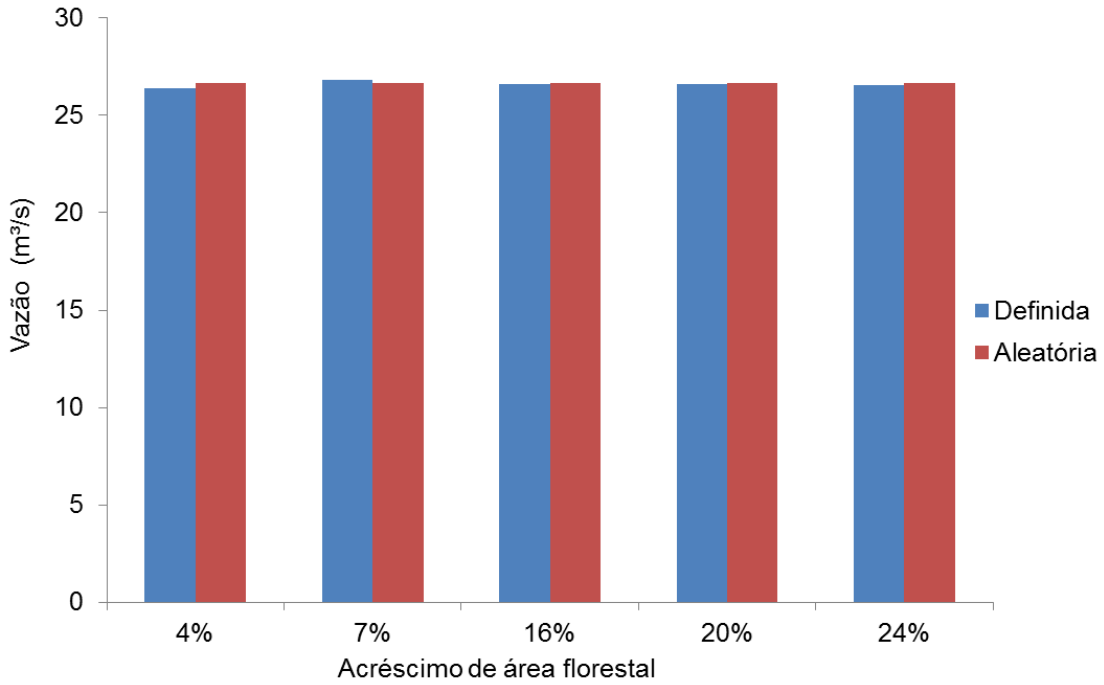
Bacellar (2005) conclui, em sua pesquisa, que a preservação das florestas é fundamental para o funcionamento adequado e equilibrado dos ecossistemas e para a manutenção da diversidade biológica, sendo este um dos motivos pelos quais a recomposição florestal é prática repetidamente recomendada na recuperação de bacias hidrográficas (MENDES, 2016).

5. 3. Comparação dos cenários simulados: definidos e aleatórios

Na Figura 19 estão ilustradas as vazões médias simuladas para os cenários de igual incremento da cobertura florestal, mas com diferentes formas de incremento: alocação definida (de acordo com critérios técnicos ou legais) ou alocação aleatória (realizada pelo SWAT). Percebe-se que o impacto nas vazões médias é pequeno variando entre esses cenários em, no máximo, 0,11 m³/s, ou seja, não existe diferença expressiva entre os cenários definidos e aleatórios. Desta forma, independentemente do local onde se faça a alteração, não houve influência na vazão média. Essa diferença não expressiva provavelmente pode ser explicada pela relação da infiltração da água no solo com a evapotranspiração, que tende a ter um equilíbrio no balanço hídrico anual.

Da mesma forma, Oliveira et al. (2015), no estado do Espírito Santo, analisando as vazões médias em áreas alocadas (áreas de APP's), reforça que não foram observadas variações expressivas na Q_{med}.

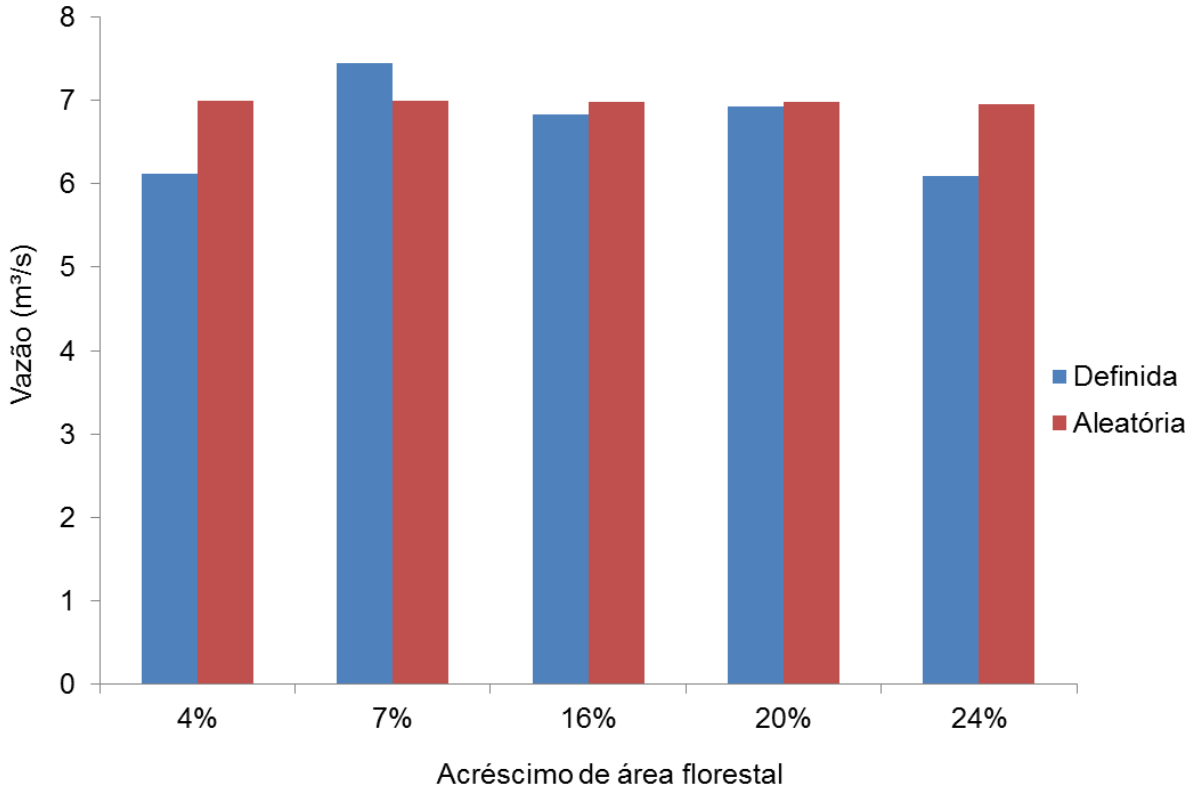
Figura 19 – Vazões médias (Q_{med}) para os cenários alocados e simulados aleatoriamente pelo modelo SWAT, com alteração do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

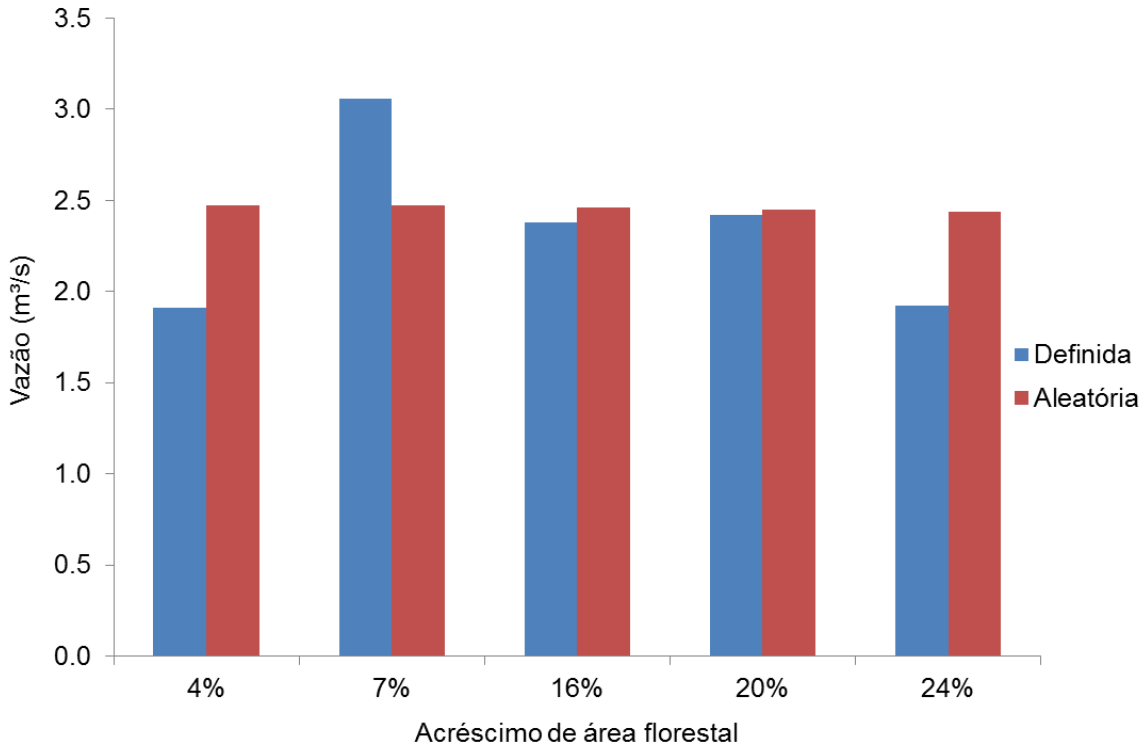
Nas figuras 20 e 21 são ilustradas as vazões mínimas (Q_{90} e $Q_{7,10}$) simuladas para os cenários de igual incremento da cobertura florestal, mas com diferentes formas de alocação. Da mesma forma que para a Q_{med}, observa-se que não houve grande diferença nas vazões mínimas simuladas para o reflorestamento definido e aleatório, considerando-se os cenários de incremento de 16 e 20% na cobertura florestal total. Porém nos incrementos de 4, 7 e 24% houve diferença expressiva entre o reflorestamento definido e o aleatório.

Figura 20 – Vazões de permanência em 90% do tempo (Q_{90}) simuladas para os cenários de reflorestamento considerando-se o incremento definido e simulado aleatoriamente pelo modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

Figura 21 – Vazões mínimas com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) simuladas para os cenários de reflorestamento considerando-se o incremento definido e simulado aleatoriamente pelo modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: a autora.

Conforme apresentado anteriormente no item Material e Métodos, para os incrementos definidos o cenário com 16% de acréscimo de floresta (Figura 11) referente-se à conversão de todas as áreas atualmente mapeadas como macega em floresta (AD+16). Já o cenário de 20% de acréscimo de floresta (Figura 11) refere-se à conversão de todas as áreas de preservação permanente de topo de morro em florestas (AD+20), de acordo com os preceitos legais do Código Florestal Brasileiro. Na Figura 11 observa-se que essas áreas estão bem distribuídas em toda a bacia, o que faz com que não existam grandes diferenças entre a distribuição das florestas nas formas de incremento definida e aleatória. Consequentemente, as vazões simuladas foram muito parecidas nos cenários definidos (AD+16 e AD+20) e aleatórios (AA+16 e AA+20).

Situação diferente refere-se aos cenários com 4% de acréscimo de floresta (Figura 12), referente ao reflorestamento das APP's em torno de cursos d' água (AD+04); e com 7% de acréscimo de floresta (Figura 11), referente ao

reflorestamento da metade das áreas atualmente de macega, com o detalhe de que estas estão localizadas nas partes mais altas da bacia do rio Jucu (AD+07). Nestes dois cenários, a distribuição espacial das áreas reflorestadas é menos homogênea dentro da bacia, sendo bem localizadas no entorno dos cursos d'água (AD+04) e nas porções norte e oeste da bacia do rio Jucu, mais próximos às nascentes mais elevadas (AD+07).

Situação intermediária é apresentada no cenário AD+24, com 24% de acréscimo de floresta (Figura 11), referente ao reflorestamento conjunto das duas áreas de APP (topo de morro e entorno de cursos d' água). Neste, embora o reflorestamento esteja bem distribuído dentro da bacia, existe um componente de localização devido às APP's de entorno de cursos d'água.

Nos cenários de AD+04 e AD+24, os quais consideram a existência da cobertura floresta nativa nas APP de entorno dos cursos d'água, ocorreram menores valores das vazões mínimas (Q_{90} e $Q_{7,10}$), comparativamente aos cenários aleatórios equivalentes (AA+04 e AA+24). A justificativa de tal fato pode residir na evapotranspiração simulada para estas áreas de APP, a qual mantem-se por mais tempo próxima a ET_0, especialmente nos períodos de estiagem, devido à maior disponibilidade de água nas proximidades dos rios, onde há menor profundidade do lençol freático. A forte influência da APP de curso d'água, para esta situação, é reforçada pelos resultados do cenário AD+20, o qual difere do AD+24 apenas pela ausência de APP no entorno dos rios. No AD+20 as vazões mínimas simuladas foram muito semelhantes ao cenário aleatório equivalente (AA+20).

No cenário AD+07 ocorreu o inverso, as vazões mínimas simuladas foram superiores às do cenário AA+07. Tal fato provavelmente pode ser explicado devido a essas áreas estarem localizadas nas partes mais altas da bacia, onde há maior potencial de recarga do lençol freático, com consequente aumento das vazões no período de seca. Como para o cenário AD+07 não foi incrementada a área florestal nas partes mais baixas da bacia, onde o lençol freático fica mais próximo à superfície, não houve grande incremento na evapotranspiração real no período mais seco, também refletindo no comportamento das vazões mínimas.

Desta maneira, se mostra de grande valia, na modelagem das vazões mínimas, a definição prévia da localização das áreas a serem alteradas. Desta forma, considera-se essa uma importante ferramenta de tomada de decisão em

relação ao gerenciamento de bacias hidrográfica, conforme alertado em outros trabalhos (ALVARENGA et al., 2017).

Os dados do presente estudo ilustram que o reflorestamento em áreas próximas a cursos de água causaram a redução das vazões mínimas, devido ao aumento da evapotranspiração e da intercepção de chuvas, com redução do escoamento básico. Todavia, convém ressaltar que o impacto nas vazões médias foi pouco expressivo, e que as áreas de APP no entorno dos rios são fundamentais para o equilíbrio ambiental, proporcionando à estabilidade dos taludes dos rios, e protegendo a biodiversidade e o solo. Zhao et al. (2013), em estudos com zonas riparias, onde ficam estas APP's, ainda ressaltam sua importância em armazenar carbono, servir como habitats de vida selvagem, prover um micro-clima específico, reter sedimentos e produtos químicos e serem eficazes para mitigar o impacto da poluição na qualidade da água. Estes benefícios advindos das APP's de entorno de cursos d'água superam largamente o impacto negativo da pequena redução das vazões mínimas.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que, para a bacia do rio Jucu:

1. O modelo SWAT foi capaz de simular, com desempenho satisfatório, as vazões mensais e diárias, após a etapa de calibração e validação;
2. Nas simulações de alteração de uso do solo, evidenciou-se impacto inexpressivo do percentual da bacia coberta com florestas sobre as vazões médias simuladas;
3. Nas simulações de alteração de uso do solo, evidenciou-se pequeno impacto do percentual da bacia coberta com florestas sobre as vazões médias simuladas, existindo tendência de redução das vazões com o incremento da área florestal, em substituições às áreas de pastagem;
4. A posição geográfica na qual foi realizada a alteração do uso do solo não interferiu expressivamente nas vazões médias simuladas;
5. A posição geográfica na qual foi realizada a alteração do uso do solo interferiu nas vazões mínimas simuladas;
6. O reflorestamento concentrado em áreas próximas a cursos d'água causaram a redução das vazões mínimas, enquanto o reflorestamento concentrado nas partes mais altas da bacia ocasionou o aumento das vazões mínimas;
7. O conhecimento prévio de localização das áreas a serem alteradas é uma importante ferramenta de tomada de decisão em relação ao gerenciamento de bacias hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine / alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007.

ABBASPOUR, K. C. et al. A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranpiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.

ALMEIDA, A. C. et al. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1–2, p. 10–21, 2007.

ALVARENGA, L. A. et al. Hydrologic Impacts Due To the Changes in Riparian Buffer in a Headwater Watershed. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 95–102, 2017.

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. DE; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 69–76, jan. 2013.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, n. 1–2, p. 1–27, 2004.

ARAI, F. K.; PEREIRA, S. B. S. B.; GONÇALVES, G. G. G. Characterization of water availability in a hydrographic basin. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 591–601, jun. 2012.

ARCOVA, F. C. S.; CICCO, V. DE; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - São Paulo. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257–262, 2003.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998a.

ARNOLD, J. G. et al. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model developmentJournal of the American Water Resources Association**, 1998b.

ARNOLD, J. G. et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v. 227, n. 1–4, p. 21–40, jan. 2000.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

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.

ASHRAF, A. Changing hydrology of the Himalayan watershed. **InTech**, v. 54492, p. 222–241, 27 fev. 2013.

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

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 100–111, 2013.

BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência, Guarapuava - PR**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BAUWE, A.; KAHLE, P.; LENNARTZ, B. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 311–321, 2016.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. JohnWiley ed. [s.l.] 2012, 2012.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BLAINSKI, É. et al. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAMBORIÚ - SC. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2015.

BLAINSKI, É. et al. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 2, p. 226, fev. 2017.

BONUMÁ, N. B. et al. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. **IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, p. 1–17, 2010.

BONUMÁ, N. B. et al. Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological swat model in brazilian watersheds and river basins. **Ciência do Solo**, v. 9, n. 6, p. 241–290, 2015.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1–4, p. 3–23, 1982.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**,

v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BROGNA, D. et al. How does forest cover impact water flows and ecosystem services? Insights from “real-life” catchments in Wallonia (Belgium). **Ecological Indicators**, v. 72, p. 675–685, 2017.

BROWN, A. E. et al. Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves. **Journal of Hydrology**, v. 483, p. 39–50, 2013.

BROWN, S. C. et al. Assessing the impact of drought and forestry on streamflows in south-eastern Australia using a physically based hydrological model. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 7, p. 6047–6063, 2015.

BRUIJNZEEL, L. A. **Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review**. 1. ed. Amsterdam: UNESCO, 1990.

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, 2004a.

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, 2004b.

CAMPANHARO, W. A. **Análise do Modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) para as bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu. Jerônimo Monteiro: UFES, 2013, 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Jerônimo**. [s.l: s.n.].

CARVALHO, F. H. DE. Uso Do Modelo Swat Na Estimativa Da Vazão E Da Produção De Sedimentos Em Bacia Agrícola Do Cerrado Brasileiro. n. 83, p. 1–17, 2014.

CHAVES, M. D. Á. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia Amazônica. Viçosa: UFV, 2002, 115f. Diss. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa ,MG, 2002.** [s.l: s.n.].

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 9, p. 1133–1148, 2010.

COE, M. T. et al. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1, p. 119–131, 2011.

CORREIA, T. P. **Aplicação do modelo SWAT para simulação de cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Jucu**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO, 2016.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p.

111–124, 2008.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001–1007, 2015.

DONIZETE, DOS R. P. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 14–37, 2016.

EDUARDO, E. N. et al. Hydrological simulation as subside for management of surface water resources at the Mortes River Basin. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 390–404, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nac ed. [s.l.] 3ª ed. Rio de Janeiro, 2013.

ESHTAWI, T. et al. Integrated hydrologic modeling as a key for sustainable urban water resources planning. **Water Research**, v. 101, p. 411–428, 2016.

EUGÉNIO, F. C. et al. Influência do Desmatamento na Disponibilidade Hídrica da Bacia Hidrográfica de Rive, Alegre, ES, Brasil. **Silva Lusitana**, v. 21, n. 2, p. 205–208, 2013.

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.

FENG, H.; LIU, Y. Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin. **Journal of Hydrology**, v. 531, p. 1129–1140, 2015.

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206–213, 2015.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT. Jerônimo Monteiro: UFES, 2012, 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Jerônimo Monteiro, ES, 2012**. [s.l: s.n.].

GARCIA, A. V. et al. Disponibilidade hídrica e volume de água outorgado na micro-bacia do ribeirão abóbora, município de rio Verde, Estado de Goiás. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 22, p. 97–106, 2007.

GASSMAN, P. P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool : historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASAE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GEORGE, C.; LEON, L. F. WaterBase: SWAT in an open source GIS. **The Open Hydrology Journal**, v. 1, p. 19–24, 2007.

GOOSEFF, M. N. et al. Hydrologic connectivity and implications for ecosystem

processes - Lessons from naked watersheds. **Geomorphology**, 2016.

HAN, F.; ZHENG, Y. Multiple-response Bayesian calibration of watershed water quality models with significant input and model structure errors. **Advances in Water Resources**, v. 88, p. 109–123, 2016.

HIBBERT, A. R. **Forest Treatment Effects on Water Yield**. Southeastern Forest Experiment Station: Coweeta Hydrologic Laboratory, 1965.

HORNBECK, J. W. et al. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2–4, p. 323–344, 1993.

HUO, A.-D. et al. Simulation modeling for water governance in basins based on surface water and groundwater. **Agricultural Water Management**, v. 174, p. 22–29, 2016.

INCAPER (INSTITUTO DE CAPIXABA DE PESQUISA, A. T. E E. R. **Programa Reflorestar**. Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br>. Acesso em: 15 set. 2016.

JAYASURIYA, M. D. A. et al. Some factors affecting water yield from mountain ash (Eucalyptus regnans) dominated forests in south-east Australia. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2–4, p. 345–367, 1993.

JHA, M. et al. Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, and Nutrient Predictions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 3, p. 811–825, 2004.

JOHNSON, R. The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies. **Forest Ecology and Management**, v. 109, n. 1–3, p. 1–7, set. 1998.

LELIS, T. A. et al. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 2, p. 623–634, 2012.

LI, K. Y. et al. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. **Journal of Hydrology**, v. 337, n. 3–4, p. 258–268, 2007.

LI, Q. et al. Forest cover change and water yield in large forested watersheds: A global synthetic assessment. **Ecohydrology**, n. January, 2017.

LIMA, W. D. P. et al. Forest Plantations and Water Consumption: A Strategy for Hydrosolidarity. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1–8, 2012.

LIMA, W. DE P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALq/USP, 2008.

LLERENA, C.; HERMOZA, R.; LLERENA., L. Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. **Debate agrario**, v. 1, n. 42, p. 79–110, 2007.

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.

MENDES, N. G. D. S. **MENDES, N. G. D. S. Estudo das vazões na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Jerônimo Monteiro: UFES, 2016, 98f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Jerônimo Monteiro, ES, 2016.** [s.l: s.n.].

MINGOTI, R. Efeitos da espacialização da cobertura florestal e da profundidade dos solos na produção de água de uma bacia hidrográfica Piracicaba 2012. p. 1–170, 2012.

MO, W.; WANG, H.; JACOBS, J. M. Understanding the influence of climate change on the embodied energy of water supply. **Water Research**, v. 95, p. 220–229, 2016.

MOREIRA, L. L. **Análise De Sensibilidade De Parâmetros E De Desempenho Do Modelo Soil and Water Assessment Tools (Swat) Na Estimativa De Vazões Médias Em Bacias Análise De Sensibilidade De Parâmetros E De Desempenho Do Modelo Soil and Water Assessment Tools (Swat) Na**. [s.l: s.n.].

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUSSO, C. M. **Zoneamento Ambiental da Reserva Ecológica de Jacarenema, Vila Velha-ES: Clima e Condições Meteorológicas/Hidrografia e Hidrologia. Associação Vila-velhense de Proteção Ambiental (AVIDEPA)**. Associação ed. Vila Velha: [s.n.].

NEITSCH, S. . et al. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. **Texas Water Resources Institute**, n. 406, p. 1–647, 2011.

NIAZI, M.; OBROPTA, C.; MISKEWITZ, R. Pathogen transport and fate modeling in the Upper Salem River Watershed using SWAT model. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 167–177, 2015.

NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia Ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 111–120, 2014.

NUNES, F. G. **A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do Rio Atuba**. [s.l.] Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental., 2007.

OLIVEIRA, K. D. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu Utilizando o modelo DHSVM. 2014. 177 f. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) -**

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014b. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT Para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES. Jerônimo Monteiro: UFES, 2014, 162f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Jerônimo Monteiro, ES**. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, L. T.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. **ESTUDO HIDROLÓGICO EM SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO DOCE RELATÓRIO FINAL**. [s.l: s.n.].

OLIVERA, F. et al. Arcgis-Swat: a Geodata Model and Gis Interface for Swat. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p. 295–309, 2006.

PAGIOLA, S.; GLEHN, H. C. VON; TAFFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. SMA/CBRN ed. SÃO PAULO: 2013, 2013.

PARAJULI, P. B.; OUYANG, Y. Watershed-Scale Hydrological Modeling Methods and Applications. In: **Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability**. [s.l.] InTech, 2013. p. 57–80.

PELUZIO, T. M. O.; SANTOS, A. R.; FIEDLER, N. C. **Mapeamento de áreas de preservação permanente no ArcGIS 9.3.** 1. ed. Ale ed. [s.l: s.n.].

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

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; C., S. G. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: Fealq, 1997.

PEREIRA, D. DOS R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2013.

PEREIRA, D. DOS R. et al. Impacts of Deforestation on Water Balance Components of a Watershed on the Brazilian East Coast. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1350–1358, 2014a.

PEREIRA, D. DOS R. et al. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 789–799, ago. 2014b.

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**, v. 34, n. 3, p. 531–544, 1998.

PINTO, D. B. F. **Aplicação Do Modelo Swat (Soil and Water Assessment Tool) Na Simulação Hidrográfica Da Serra Da Mantiqueira , Mg**. [s.l: s.n.].

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. DA; KOETZ, M. **Estudo da Vazão em Curso d' Água**. Viçosa: UFV, 2002.

REIS, J. A. T. DOS et al. Regionalização de Curvas de Permanência de Vazão para

rios do Estado do Espírito Santo. **Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia**, v. 3, p. 28–35, 2006.

RODRIGUES, E. L. et al. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 3, p. 485–500, 2015.

SALLES, L. DE A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. [s.l: s.n.].

SANTOS, E. H. M. DOS; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. DE. Relação entre o uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 826–834, 2010.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias bidrográficas : teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002.

SERVAT, E.; DEZETTER, A. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. **Hydrological Science**, v. 36, n. 4, 1991.

SHEN, Z. et al. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones. **Water Research**, v. 68, p. 563–571, 2015.

SILBERSTEIN, R.; ADHITYA, A.; DABROWSKI, C. **Catchment hydrology changes in flood flows , saturated area and salinity associated with forest clearing for agricultureCooperative Research Centre for Catchment Hydrology**. [s.l: s.n.].

SILVA, P. M. D. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. February 2014, p. 258–265, 2008.

SIMONELLI, M.; FRAGA, C. N. **Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção no Estado do Espírito Santo**. IPEMA ed. Vitória: [s.n.].

SMETHURST, P. J.; ALMEIDA, A. C.; 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.

SOUSA, H. T. DE et al. **SisCAH 1.0 - Sistema computacional para análises hidrológicas**, 2009.

SOUZA, K. B. DE. **INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA VAZÃO DA BACIA DO RIO URUÇUÍ-PRETO, PIAUÍ**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ CAMPUS, 2015.

SREEKANTH, J.; DATT, B. Genetic Programming: Efficient Modeling Tool in Hydrology and Groundwater Management. In: **Genetic Programming - New Approaches and Successful Applications**. [s.l.] InTech, 2012. p. 225–238.

STEDNICK, J. D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. **Journal of Hydrology**, v. 176, n. 1–4, p. 79–95, mar. 1996.

STRAUCH, M. et al. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 414–415, p. 413–424, 2012.

TEIXEIRA, E. C.; SENHORELO, A. P. Avaliação de correlação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos em bacias hidrográficas com uso e ocupação diferenciada. **In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,** n. 1, p. 1–5, 2000.

TERRA, V. R. et al. Estudo limnológico visando avaliação da qualidade das águas do rio Jucu Braço Norte, ES. **Natureza on line**, v. 8, n. 1, p. 8–13, 2010.

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

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciencia e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2015.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 135–152, 1997.

TUO, Y. et al. Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). **Science of The Total Environment**, v. 573, p. 66–82, 2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Apliada**. SÃO PAULO: McGraw-Hill, 1975.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem Hidrológica em uma Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Rio Araguaia, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 3, p. 38–47, 2012.

YANG, D. et al. Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, p. 1–13, 2009.

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

ZANETTI, S. S. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.** [s.l: s.n.].

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. **Coopera Tive Research Centre for Catchment Hydrology**, v. TECHNICAL, n. November, p. TECHNICAL REPORT 99/12, p. 42, 1999.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources**

Research, v. 37, n. 3, p. 701–708, 2001.

ZHANG, S. et al. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 34–45, 2017.

ZHANG, X. et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, p. 1–12, 2008.

ZHAO, P. et al. A spatial multi-criteria planning scheme for evaluating riparian buffer restoration priorities. **Ecological Engineering**, v. 54, p. 155–164, 2013.

ZHOU, Y. et al. Hydrological and environmental controls of the stream nitrate concentration and flux in a small agricultural watershed. **Journal of Hydrology**, v. 545, p. 355–366, 2017.

ANEXO A – Estação pluviométrica, fluviométrica e meteorológica utilizada no trabalho

Código	Estação	Tipo	Altitude (m)	Responsável
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
57230000	Faz. Jucuruaba	Fluviométrica	80	ANA
A612	Vitória	Meteorológica	9	INMET
A613	Santa Tereza	Meteorológica	998	INMET
A615	Alfredo Chaves	Meteorológica	35	INMET
A657	Afonso Cláudio	Meteorológica	520	INMET

Fonte: Correia (2016) adaptada pela autora.