

RAFAEL ALVARENGA ALMEIDA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO MUCURI COM A
UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A447m
2016
Almeida, Rafael Alvarenga, 1990-
Modelagem hidrológica na bacia do rio Mucuri com a
utilização do modelo SWAT / Rafael Alvarenga Almeida. –
Viçosa, MG, 2016.
x, 101f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Sílvio Bueno Pereira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.41-46.

1. Recursos hídricos. 2. Simulação por computador.
3. Bacias hidrográficas. 4. Geoprocessamento. 5. Vazante.
6. Solo - Uso. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 333.91

RAFAEL ALVARENGA ALMEIDA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO MUCURI COM A
UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 15 de julho de 2016.

Prof. Gilberto Coelho (UFLA)

Prof. Donizete dos Reis Pereira (UFV)

Prof. Alexandre Sylvio Vieira da Costa
(UFVJM)

Prof. Daniel Brasil Ferreira Pinto
(UFVJM)
(Coorientador)

Prof. Silvio Bueno Pereira (UFV)
(Orientador)

AOS MEUS QUERIDOS PAIS MAXLEY E CIBELE,
E MINHAS IRMÃS, ISABELA E MARIA EDUARDA

Às pessoas que sempre me apoiaram
Nos momentos difíceis,
Me instruíram e orientaram.

À MINHA AMADA ESPOSA,
CAMILA

Por todo o carinho e amor.

OFEREÇO

A persistência é o caminho para o Êxito

AGRADECIMENTOS

Início os meus agradecimentos aos meus pais, que sempre primaram pela minha educação. Obrigado Sr. Maxley e Sra. Cibele, pois além de me oferecerem a oportunidade de estudar, sempre estiveram presentes em minha vida.

Estendo também à minha família, em especial aos meus queridos “Vó Dilza e Vô Bgair”, Isabela e Maria Eduarda pelo carinho, paciência e incentivo.

À minha querida e amada esposa Camila, por cada momento que vivemos juntos desde o início de nossa trajetória.

À Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Ao meu orientador e amigo Professor Silvio Bueno Pereira por acreditar em mim, me mostrar o caminho da ciência e por ser um exemplo de profissional.

Aos coorientadores Daniel Brasil Ferreira Pinto e Mauro Aparecido Martinez pelo apoio, pelas reuniões que se estendiam além do horário, pelos conselhos, ajudas no trabalho desenvolvido e é claro pelos momentos de descontração.

Aos professores membros da banca de defesa da tese, pelas contribuições valiosas.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo conhecimento e experiência passada.

Às Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela consistente formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos amigos da “República Os Largados” de Viçosa, que conviveram mais intensamente, ajudando de diversas formas.

Aos amigos do Laboratório de Hidráulica, do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, que tanto ajudaram nos momentos de aperto.

Aos colegas de trabalho da UFVJM que sempre me ajudaram para o desenvolvimento desta.

Aos amigos, colegas e demais pessoas que seriam impossível nomear todas, que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

Às pessoas que participaram diretamente e indiretamente deste trabalho e me ajudaram em todos os momentos.

BIOGRAFIA

Rafael Alvarenga Almeida, filho de Maxley Sandrs Mendes de Almeida e Cibele Monterrey Alvarenga, nasceu na cidade de Lavras, estado de Minas Gerais, em 04 de setembro de 1990.

Em Julho de 2008 ingressou no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde graduou-se em 2012. Foi bolsista de Iniciação Científica FAPEMIG durante os anos de 2010, 2011 e 2012.

Em Dezembro de 2012 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo a defesa de sua dissertação em Fevereiro de 2014.

Em Março de 2014 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos e Ambientais, junto ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo a defesa de sua tese em Julho de 2016.

Desde Julho de 2014 é docente do quadro efetivo da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) no campus do Mucuri, vinculado ao Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia (ICET), atuando na área de Geoprocessamento e Hidrologia.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. CAPÍTULO 1 - Introdução geral | 01 |
| 1.1. Objetivos..... | 10 |
| 1.2.Referências bibliográficas..... | 11 |
| 2. CAPÍTULO 2 – Influência do número de amostras de treinamento e da utilização de processos de filtragem de áreas menores que a área mínima mapeável na classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança | 14 |
| 2.1. RESUMO..... | 15 |
| 2.2. ABSTRACT..... | 16 |
| 2.3. INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 2.4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 19 |
| 2.4.1. Caracterização da Área de estudo..... | 19 |
| 2.4.2. Base de dados..... | 20 |
| 2.4.3. Tratamentos..... | 21 |
| 2.4.4. Procedimentos utilizados..... | 21 |
| 2.4.4.1. Procedimentos de filtragem de Áreas menores que a AMM..... | 23 |
| 2.4.5. Validação da classificação..... | 24 |
| 2.4.6. Análises comparativas..... | 25 |
| 2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 26 |
| 2.6. CONCLUSÕES..... | 36 |
| 2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 37 |
| 3. CAPÍTULO 3 – Calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Mucuri | 39 |
| 3.1. RESUMO..... | 40 |
| 3.2. ABSTRACT..... | 41 |
| 3.3. INTRODUÇÃO..... | 42 |
| 3.4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 45 |
| 3.4.1. Caracterização da área de estudo..... | 45 |
| 3.4.2. SWAT..... | 46 |
| 3.4.3. Base de dados utilizada..... | 47 |
| 3.4.4. Warm-up, análise de sensibilidade, calibração e validação | 54 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.5. Análises estatísticas..... | 56 |
| 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 58 |
| 3.6. CONCLUSÕES..... | 68 |
| 3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 69 |
| | |
| 4. CAPÍTULO 4 – Aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Mucuri..... | 73 |
| 4.1. RESUMO..... | 74 |
| 4.2. ABSTRACT..... | 75 |
| 4.3. INTRODUÇÃO..... | 76 |
| 4.4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 78 |
| 4.4.1. Caracterização da área de estudo..... | 78 |
| 4.4.2. SWAT..... | 79 |
| 4.4.3. Base de dados utilizada na simulação..... | 80 |
| 4.4.4. Análise de sensibilidade, calibração e validação..... | 85 |
| 4.4.5. Aplicabilidade do modelo na bacia..... | 86 |
| 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 88 |
| 4.6. CONCLUSÕES..... | 96 |
| 4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 97 |
| | |
| 5. CAPÍTULO 5 – Conclusão geral..... | 100 |

RESUMO

ALMEIDA, Rafael Alvarenga, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Mucuri com a utilização do modelo SWAT.** Orientador: Silvio Bueno Pereira. Coorientadores: Daniel Brasil Ferreira Pinto e Mauro Aparecido Martinez.

Os recursos hídricos vem sendo ameaçados cada vez mais, basicamente em função da crescente população mundial. Dessa forma, existe uma crescente demanda de estudos relacionados aos impactos das atividades humanas nos recursos hídricos. Os modelos hidrológicos se encaixam perfeitamente nesse contexto, visto que buscam representar todo o funcionamento físico do sistema hidrológico, sendo capaz assim de simular os impactos das atividades antrópicas no ciclo hidrológico. Com base nessa premissa, avaliou-se a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT como ferramenta de planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Mucuri, bem como o levantamento das suas bases de dados. Buscou-se, neste contexto, a obtenção do melhor método de classificação do uso do solo, com a utilização do classificador supervisionado por máxima verossimilhança (maxver) através da avaliação de diferentes tamanhos das amostras de treinamento do classificador e da utilização de filtros de áreas menores que a área mínima mapeável (AMM); e estudar os impactos no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Mucuri em função de três diferentes cenários de alteração no uso do solo, sendo: substituição da área de agricultura geral pela cultura do eucalipto, substituição da área florestal pela cultura da cana-de-açúcar e substituição da área de pastagem por área de solo exposto. A aplicabilidade do modelo foi testada por meio da comparação entre os resultados simulados e observados para a vazão, obtidos de diversas estações distribuídas ao longo da bacia. Os resultados obtidos demonstraram que a calibração e a validação dos dados apresentaram-se classificadas como bom e satisfatório respectivamente, em uma escala diária. Dessa forma, concluiu-se que o modelo SWAT demonstrou potencial para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Mucuri, ainda se mostrou eficiente para simular o impacto dos cenários de alteração do uso do solo no regime de vazões. A substituição de agricultura por eucalipto na bacia propiciou uma diminuição nas vazões médias e mínimas de referência, e as substituições de cobertura florestal por cana-de-açúcar e de pastagem por solo exposto propiciaram um aumento nas vazões média e mínimas de referência.

ABSTRACT

ALMEIDA, Rafael Alvarenga, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Application of SWAT model for Mucuri catchment.** Advisor: Silvio Bueno Pereira. Co-advisors: Daniel Brasil Ferreira Pinto and Mauro Aparecido Martinez.

Water resources have been increasingly threatened as the world population grows. Under these circumstances, there is a greater demand in studies focused on the impacts of human activities on water resources. Hydrological models fit perfectly in this context, since they can represent the entire physical operation of the water system and, hence, simulating the impacts of human activities on the hydrological cycle. Based on this premise, this thesis aims to evaluate the applicability of the hydrological model SWAT as a planning and management tool of water resources in the Mucuri River basin and data collection. In this context, we analyzed the best method of land use classification. We used the classifier supervised by maximum likelihood (Maxver), evaluating different sizes of the classifier training samples and using a filter of areas smaller than the minimum mappable area (AMM). We also studied the impacts on the watershed flow regime of the Mucuri river according to three different scenarios of land use: replacement of the general field of agriculture by eucalyptus cultivation, replacement of the forest area by the culture of sugarcane and replacement of pasture for exposed soil area. The applicability of the model was tested by comparing the simulated and observed results from several stations distributed throughout the basin. The comparison shows that the calibration and validation data are classified as good and satisfactory, respectively, on a daily scale. Thus, we concluded that the SWAT model demonstrates potential for planning and management of water resources in the river basin Mucuri. It is also efficient to simulate the impact of change scenarios of land use in flow regime. The replacement of eucalyptus for agriculture in the basin led to a decrease in the average and minimum flows of reference while the substitution of forest cover by sugarcane and pasture for soil exposed provided an increase in average and minimum flows of reference.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1. INTRODUÇÃO GERAL

Uma das principais preocupações do homem na atualidade têm sido a distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos, que são de fundamental importância para o desenvolvimento da economia e da sociedade, e demandados para os mais diversos usos. No entanto, poucos especialistas têm condições para quantificar os recursos no tempo e espaço, dada a escassez de informações hidrológicas, principalmente em países em desenvolvimento.

É de conhecimento geral que os recursos hídricos e o uso e ocupação do solo estão estreitamente ligados, sendo que um depende fortemente do outro.

Em ambientes diversos, o código florestal estabelece normas de regulação do uso do solo, sempre visando a preservação dos meios bióticos bem como a constante preservação e melhoria dos recursos naturais presentes, incluindo os hídricos.

Dessa forma, torna-se importante que se tenham instrumentos eficazes para o monitoramento da cobertura do solo, por meio de estudos que correlacionem o impacto de alterações no uso do solo com os recursos naturais.

Imagens obtidas de sensores remotos, e a análise de suas características diversas, nos fornecem subsídios para o mapeamento do uso e ocupação do solo, por meio da técnica de classificação das imagens de satélite. Tal processo consiste na rotulação das características espectrais da imagem em classes.

Durante a fase de interpretação de uma imagem são utilizadas as mais variadas informações disponíveis, além do conhecimento científico. As principais informações que são utilizadas são: cor, textura, sombra, estrutura, localização, proximidade, homologia e tonalidade. Essas características são inerentes ao tipo de alvo e dessa forma o representam, sendo possível a distinção deste dos demais.

Cabe ressaltar que nem sempre a obtenção das características disponíveis em uma imagem de satélite são suficientes para a sua classificação, sendo necessária assim uma determinação da classe em campo. Esse tipo de verificação aumenta a acurácia do estudo pois dá a certeza de uma identificação da classe, porém aumenta os custos do estudo.

O reconhecimento dos padrões consiste na ciência de extração de informações através de operadores automatizado das imagens de satélite. Na grande maioria das vezes estes padrões são facilmente identificados pelo cérebro humano que correlaciona certas

cores, texturas, localizações, dentre outras, com objetos conhecidos. Esse processo requer treinamento e experiência. Também pode ser realizado por ferramentas computacionais, por meio de medições estatísticas derivadas das características espectrais dos pixels da imagem. Todas estas informações servem de base para uma tomada de decisão (PAULINO, 2014).

Cabe ressaltar que em função da utilização do reconhecimento de padrões por meio do cérebro humano, é provável que essa classificação gere diferentes resultados, pois cada analista tem um treinamento/experiência diferente, além da questão associada ao comprometimento com o trabalho que também pode afetar os resultados. Sendo assim, um mesmo pixel dentro de uma imagem pode apresentar duas diferentes classificações de acordo com o analista. Outro fato que deve ser levado em consideração é o possível dispêndio de tempo na classificação de imagens, pois as imagens geralmente apresentam grandes áreas, várias bandas espectrais, dentre outros.

Em função destas, surgiram técnicas de classificação de imagens digitais que tornam o processo de extração das informações automatizadas, reduzindo assim o problema da subjetividade humana e reduzindo o esforço do analista. Ressalta-se que, ainda assim, o analista é de fundamental importância no processo de classificação das imagens.

O resultado final esperado é uma imagem digital que constitui uma junção de pixels classificados, formando polígonos de mesma classificação, gerando um mapa temático.

Existem diferentes regras para a classificação automatizada, por exemplo as paramétricas e não paramétricas, espectrais e espaciais, supervisionadas e não supervisionadas, dentre outras.

A classificação não-supervisionada consiste na premissa de que o algoritmo é capaz de definir as classes mais distintas entre si a partir do número de classes de interesse do usuário, geralmente é realizada por métodos de agrupamentos.

Na classificação do tipo supervisionada são colhidas amostras de treinamento pelo analista, de acordo com sua experiência e conhecimento técnico-científico. Essas amostras são áreas com características homogêneas que representam cada classe de interesse para a classificação final da imagem. A classificação supervisionada é um método muito utilizado em estudos de mapeamento e avaliação de mudanças de uso e ocupação do solo (HORNING et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013)

A informação numérica contida nos pixels destas amostras, inclusive em diferentes bandas espectrais, é utilizada para “treinar” o software capaz de captar as

respostas espectrais de cada diferente classe. Segundo Congalton (1991) a definição das amostras de treinamento e a quantidade de amostras coletadas são dois dos principais fatores que influenciam na acurácia final da classificação.

O software de classificação cria diferentes assinaturas espectrais para cada diferente classe, para posterior comparação com as áreas a serem classificadas por meio da atribuição da proximidade digital. Após a classificação inicial, torna-se necessária apenas um processo de refinamento dos resultados, as quais identificam e descartam pixels isolados (PAULINO, 2014).

Para o método da Máxima-Verossimilhança faz-se uso da estatística para o cálculo do diagrama de dispersão das classes e sua distribuição de probabilidade por meio das amostras de treinamento. Então, cria-se um limiar de decisão para classificação de cada pixel com base na probabilidade de pertencer aquela classe. As principais limitações estão no fato de serem necessárias uma grande quantidade de pixels para a classificação e a provável ocorrência de regiões de não classificação.

Segundo Moreira (2007), a qualidade de um mapa pode ser avaliada com base em dois principais critérios: precisão e exatidão ou acurácia do mapeamento. A precisão diz respeito a área de cada classe com relação a verdade no campo, já a exatidão trata-se de um índice que avalia a distribuição espacial de cada uma das classes mapeadas.

Após o processo de classificação da imagem, faz-se necessário a verificação de possíveis inconsistências, que podem ser avaliadas utilizando-se de uma matriz de erros na classificação, e por meio dessa, é possível gerar medidas estatísticas com o objetivo de medição das confusões, tais como a Exatidão Global e o Índice Kappa (FONSECA et al., 2014).

A Exatidão Global é um modelo que considera apenas a diagonal principal de pixels da cena, comparando-os a pontos amostrais confiáveis. A correlação destes é usada como parâmetro para o cálculo da exatidão, que indica assim a discordância existente (CONGALTON, 1991).

O Índice Kappa trata de um coeficiente em escala nominal, variando de 0 a 1, e leva em consideração toda a matriz de confusão da cena. A concordância existente entre as amostras de referência e os pixels da cena é calculada. Trata-se de um índice mais eficiente pois faz uso de toda a matriz de confusão e não só da diagonal principal, como no caso da Exatidão Global (FONSECA et al., 2014).

Oliveira et al. (2013) ao analisarem a acurácia da classificação em relação a sua resolução espacial inferiram que para estudos florestais, o algoritmo da máxima verossimilhança foi superior ao das redes neurais artificiais para uma imagem com

resolução espacial de 5 metros. Ainda, Mendes et al. (2015), para imagens com uma altíssima resolução espacial, a classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança mostrou-se a mais adequada.

Os modelos hidrológicos buscam uma forma de representar o comportamento da bacia hidrográfica mediante condições diferentes das observadas, além de representar a parcela do ciclo hidrológico que transforma precipitação em vazão (TUCCI, 2005).

O uso do solo, como citado anteriormente, trata-se de uma importante condicionante dos processos do ciclo hidrológico, dessa forma sua identificação é primordial para desenvolvimento de diversos estudos. Portanto, o mapa de uso e ocupação do solo é um dos mais importantes dados de entrada nos modelos hidrológicos. Os modelos tratam de representações matemáticas construídas a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos fazendo a utilização de diversas equações, tais como as de conservação da massa, e as da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada. Os modelos hidrológicos com embasamento físico são de grande valia para interpretação e análise de problemas pois fornecem base ao entendimento geral do funcionamento hidrológico de uma bacia (TUCCI, 2005).

Um aspecto importante em relação ao uso de modelos hidrológicos está relacionado principalmente ao alcance do processo hidrológico, sendo que, enquanto alguns dos modelos hidrológicos visam a obtenção do hidrograma de cheia no interior e no exutório de uma bacia, outros buscam a obtenção do comportamento de diversos componentes do ciclo hidrológico, possibilitando a quantificação de variáveis de grande importância para a análise e a tomada de decisão (ABBASPOUR et al., 2015; MEAURIO et al., 2015; AWAN; ISMAEEL, 2014).

O monitoramento contínuo do comportamento hidrológico em áreas experimentais, é uma ótima alternativa para o entendimento das componentes principais do ciclo hidrológico, como também serve para fornecer dados para diversas análises: identificação das culturas que provocam a menor perda do solo da região, técnicas de cultivo que favorecem a conservação do solo, coberturas de solos mais propensas a erosão, áreas agrícolas favoráveis a mecanização, necessidade de irrigação em áreas agrícolas, impactos de mudanças do uso do solo na produção de sedimentos, contaminação dos recursos hídricos subterrâneos devido a sua incorreta utilização, dentre outras. Para essas análises são necessárias a utilização de modelos hidrológicos de base física, os quais tem sido aplicados em várias bacias hidrográficas do mundo, tais como: NAM (NIELSEN; HANSEN, 1973), TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979), SHE (ABBOTT et al., 1986a, 1986b), MGB-IPH (COLLISCHONN et al.; 2007), LASH

(BESKOW; MELLO; NORTON, 2011) e SWAT (ARNOLD et al., 1998).

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Ferramenta de Avaliação de Solo e Água) é atualmente o de maior destaque em todo o mundo, principalmente por estar apto à aplicação em bacias hidrográficas agrícolas onde se pretende estudar aspectos quantitativos referentes ao escoamento, erosivos, perdas de sedimentos e nutrientes de áreas agricultáveis e qualidade da água (ARNOLD et al., 2012).

Outra poderosa ferramenta que o modelo SWAT faz uso é a avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em função de possíveis alterações no uso e cobertura do solo. Essa ferramenta tem grande importância no contexto atual, visto que o planeta sofre grandes mudanças impulsionadas, principalmente, pela ação antrópica.

O SWAT requer para a simulação informações em três níveis de escala espacial: bacia hidrográfica, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). De acordo com Zhang et al. (2009), o SWAT divide a bacia, objeto de estudo, em sub-bacias conectadas pela rede de drenagem e traça as HRUs com base em combinações únicas de tipo, relevo e cobertura do solo.

Dentro desse contexto, para a utilização do modelo, são necessários diversos dados, desde a caracterização físico-hídrica do solo até dados pluviométricos da região de estudo. Estes dados podem ser levantados em campo ou por meio da utilização de técnicas de geoprocessamento para sua determinação.

A grande maioria dos estudos necessitam de informações de entrada de alguns parâmetros fundamentais para a simulação, como por exemplo o índice de área foliar, a profundidade do sistema radicular e parâmetros vinculados à cultura, os quais são obtidos com base na literatura e extrapolados para as condições da bacia hidrográfica com a utilização de mapas de uso do solo.

A partir da obtenção dos dados geoespaciais da bacia hidrográfica (mapas de elevação, uso e ocupação do solo e tipo de solo), faz-se necessário a aquisição de informações tabulares para os modelos, tais como informações meteorológicas, pluviométricas e da variável a ser simulada (ARNOLD et al., 2012).

A partir da aquisição de uma série histórica de dados da variável a ser simulada, tais como: vazão, sedimentos, nutrientes, qualidade da água, pesticidas, dentre outros, faz-se necessário a divisão da massa de dados em dois grupos, um para a calibração dos parâmetros do SWAT e outra para a validação deste (ARNOLD et al., 2012).

O modelo SWAT segue um fluxograma de funcionamento (Figura 1.1) para a execução da modelagem em uma bacia hidrográfica.

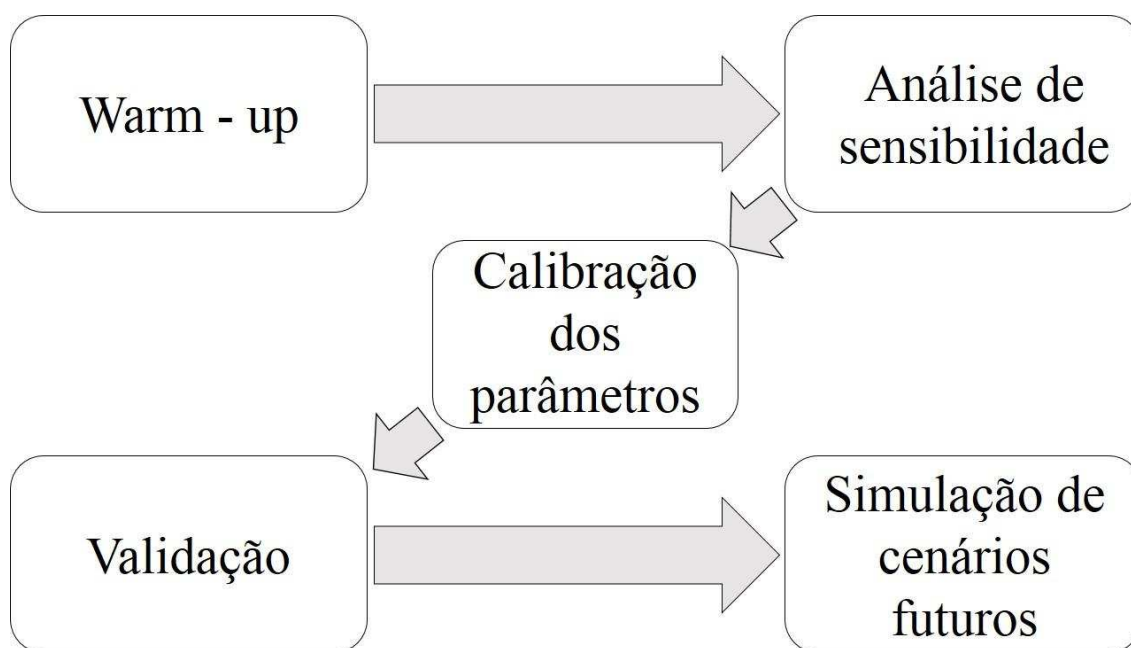


Figura 1.1. Fluxograma das principais fases de funcionamento do SWAT.

A fase de análise de sensibilidade do modelo hidrológico diz respeito a avaliação dos parâmetros que serão utilizados em função da qualidade de resposta do modelo. É uma fase de extrema importância, pois, possibilita dedicar maior atenção aos parâmetros que exercem mais influência na resposta do modelo durante a fase de calibração.

O processo de calibração consiste no ajuste dos valores dos parâmetros do modelo para que os valores simulados se aproximem dos observados, representando melhor o processo simulado. Torna-se importante salientar que o modelo hidrológico desconhece as condições iniciais de simulação, condições essas que podem exercer grandes impactos no processo simulado, e portanto necessita de um tempo para “aquecimento” ou warm-up. O warm-up do modelo é uma fase que requer certa precaução, pois até então, os parâmetros não eram conhecidos e o modelo trata da obtenção de um melhor ajuste destes sem o conhecimento das condições iniciais (MELLO et al., 2008). Segundo Mello e Silva (2013) um dos principais componentes a serem contornados pelo warm-up é a umidade do solo anterior ao evento de precipitação, influenciando expressivamente na componente que regula a infiltração de água no solo.

Na etapa de calibração o modelo SWAT executa o procedimento de forma automática dos dados através do algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE), que realiza a combinação da sistemática de evolução dos parâmetros calibráveis com a melhoria dos dados preditos (VAN GRIESVEN, 2005). Segundo Sharma et al. (2006) e Ajami et al. (2004) o algoritmo SCE envolve algumas etapas:

1. Pontos amostrais são gerados a partir do limites inferior e superior pré-definidos, que são então ordenados e classificados em ordem crescente.
2. As amostras são divididas em sub-grupos com tamanho pré-definido de $2n+1$, onde n representa o número de parâmetros a ser calibrados.
3. Cada sub-grupo é iniciado de forma independente e um número determinado de vezes. A evolução dos grupos ocorre sob três formas: reflexão, contração e mutação, em função de um critério estabelecido.
 - Na reflexão é identificado o ponto mais distante do centroide dos demais. Se esse ponto tem um valor de desempenho (diferença entre valor observado e simulado) maior que o critério, ele então é substituído pelo centroide e refaz-se esta etapa. Se a etapa de reflexão não for suficiente para o atendimento do critério pré-estabelecido, realiza-se a contração.
 - Na etapa de contração é utilizado a meia distância entre o ponto mais longe e o baricentro dos demais, aplica-se o mesmo mecanismo de comparação e substituição da fase anterior. Se após esta etapa ainda não for suficiente, passa-se então a etapa de mutação.
 - Na mutação escolhe-se aleatoriamente um ponto dentro dos limites pré-estabelecidos para a substituição do ponto com pior desempenho.
4. Os grupos que evoluíram a partir da etapa anterior são reintegrados em um único grupo populacional. A amostra é ordenada com base na diferença do critério. As etapas 2 até a 4 são repetidas até o atendimento da etapa 5.
5. O ciclo de evolução do grupo é interrompido se o número de evoluções excedeu um valor pré-determinado ou o valor do critério não apresentou melhoria de acordo com uma percentagem pré-definida.

No modelo hidrológico SWAT há ainda a calibração do tipo manual. Essa dá ao usuário a liberdade de calibrar cada parâmetro como melhor convir. Em geral, recomenda-se que se faça a autocalibração para um resultado geral, e após, realize a calibração manual para uma melhor aproximação dos resultados (LELIS et al., 2012; NETO et al., 2014; ARNOLD et al., 2012). Em um estudo comparativo, Arnold et al. (2012) discutiram as diferenças na modelagem utilizando-se de ambas as calibrações. Os autores concluíram que a utilização da calibração manual é difícil e quase que inviável em muitas aplicações de larga escala, todavia, quando utilizada, força o usuário a entender melhor o modelo, os principais processos que ocorrem na bacia e a sensibilidade dos parâmetros.

Diferentes parâmetros são evidenciados como sendo mais susceptíveis à calibração. Este fato ocorre devido ao modelo SWAT basear-se nas características físicas das bacias hidrográficas e estes estudos serem realizados em bacias hidrográficas diferentes.

Pinto et al. (2013) determinaram que para uma bacia hidrográfica de 6,88 km², na região da Serra da Mantiqueira, os principais parâmetros na simulação de vazão estão relacionados ao coeficiente de recessão do escoamento de base, coeficiente de condutividade hidráulica do canal, número da curva e coeficiente de retardamento do escoamento superficial. Para uma bacia hidrográfica de 32 km², na região do Alto Rio Grande, Andrade, Mello e Beskow (2013) identificaram que os parâmetros mais sensíveis foram número da curva, coeficiente de recessão do escoamento de base, fração percolada que abastece o aquífero subterrâneo e o coeficiente de compensação de evaporação de água no solo.

Pereira et al. (2014), estudando uma bacia hidrográfica de 943 km², no Estado do Espírito Santo, evidenciaram como os principais parâmetros na análise de sensibilidade: coeficiente de recessão do escoamento de base, coeficiente de rugosidade de Manning, número da curva e o coeficiente de compensação de evaporação de água no solo.

O processo de validação do modelo está fundamentado na utilização dos parâmetros pré-calibrados. Estes são aplicados em uma massa de dados independente para que se possa avaliar, por meio de procedimentos estatísticos, a aplicabilidade do modelo para dado evento. Em trabalhos de aplicação do modelo SWAT têm-se utilizado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFE, 1970).

Se após a validação e aplicação do coeficiente estatístico o modelo obtiver um desempenho satisfatório, torna-se possível a realização de simulações do processo modelado de acordo com diversos cenários.

Uma avaliação da qualidade do modelo é extremamente importante, pois mais do que aplicar um modelo, existe o interesse de que, com os parâmetros ajustados e o modelo funcionando perfeitamente, se possam fazer simulações diversas e obter seus impactos no contexto do ciclo hidrológico.

Blainski et al. (2011) realizaram simulações de variação do uso do solo, substituindo a área agrícola (rizicultura) por reflorestamento e solo exposto. Com esse estudo foi evidenciado que, para a bacia em questão, a implantação de florestas proporcionou um menor número de dias com vazão menor que a vazão de referência Q₉₅ e também a redução dos picos de vazão em eventos de precipitação.

As vantagens da modelagem hidrológica são várias, desde questões referentes ao

planejamento e gestão dos recursos hídricos, até questões referentes a segurança pública em eventos extremos, tais como enchentes ou secas. O grande entrave existente no desenvolvimento dos modelos para as condições brasileiras esbarra na escassez de dados existente. Nesse contexto, torna-se conveniente para o desenvolvimento de modelos, estudos para que se tenha uma base de dados consistente para as condições edafoclimáticas brasileiras. Dessa forma o modelo SWAT é uma ferramenta que tem um grande potencial, principalmente para o Brasil, pois foi criado com o intuito de simulação de bacias agrícolas, desde que se desenvolvam as atuais plataformas de coleta de dados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT como ferramenta de planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Mucuri.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Comparar diferentes tamanhos das amostras de treinamento do classificador com a utilização ou não dos filtros de áreas menores que a área mínima mapeável para o classificador supervisionado por máxima verossimilhança, visando a obtenção do mapa de uso do solo.
- Calibrar e validar o modelo SWAT para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri, bem como testar seu desempenho.
- Avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT para diversos cenários de uso do solo e seus respectivos impactos no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Mucuri.

1.2. Referências Bibliográficas

- ABBASPOUR, K. C. ROUHOLAHNEJAD, E. VAGHEFI, S. SRINIVASAN, R. YANG, H. KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, **Journal of Hydrology**, v. 524, pp. 733-752. 2015.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. Na introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically – based distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p. 45-59, 1986a.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. Na introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique European, 'SHE', 2: Structure of a physically based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p. 45-59, 1986b.
- AJAMI, N. K.; GUPTA, H.; WAGENER, T.; SOROOSHIAN, S. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of hydrology**, v. 298, p. 112-135, 2004.
- 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, 2013.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, p.73-89, 1998.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, pp.1491-1508, 2012.
- AWAN, U. K.; ISMAEEL, A. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. **Journal of Hydrology**, v. 519, pp. 1368-1382, 2014.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and a uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 258-294, 2011.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrol. Sci. Bull.**, v. 24, p. 43-69, 1979.
- BLAINSKI, E.; SILVIERA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGC-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing Environmental**, v. 37, n. 1, p.35-46, 1991.

FONSECA, D. de S. R.; CLEMENTE, C. M. S.; REIS, D. de C.; CARDOSO, T. de R.; MELO, W. J. de.; FRANÇA, M. A. Estatística experimental aplicada na avaliação da eficiência de métodos baseados em classificação supervisionada de imagens. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 537-544, 2014.

HORNING, N.; ROBINSON, J.; STERLING, E.; TURNER, W.; SPECTOR, S. **Remote sensing for ecology and conservation**. Oxford: New York, 2010. 451 p.

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

MEAURIO, M.; ZABALETA, A.; URIARTE, J.; SRINIVASAN, R.; ANTIGÜEDAD, I. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 326-334, 2015.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras, Editora UFLA, 2013. 455 p.

MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R.; NORON, L. D.; SILVA, A. M.; ACERBI JUNIOR, F. W. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian head water basin. **Catena**, v. 75, p.235-247, 2008.

MENDES, D. F.; SILVA, S. F. de; FERRARI, J. L.; SANTOS, A. R. dos; GARCIA, R. F. Acurácia temática do classificador por máxima verossimilhança em imagem de alta resolução especial do satélite Geosy-1. **Nucleus**, v. 12, n. 1, 2015.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2007. 320 p.

NASH, J. E.; SUTCLIFE, J. E. River flow forecasting through conceptual model: Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. V. 10, n. 3, pp. 282-290. 1970.

NETO, J. O. M.; SILVA, A. A. da; MELLO, C. R. de; JÚNIOR, A. V. M. Simulação Hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, pp. 177-188, 2014.

NIELSEN, S. A.; HANSEN, E. Numerical simulation of the rainfall runoff processo n a daily basis. **Nordic Hydrology**, v. 4, p. 171-190, 1973.

OLIVEIRA, F. P.; FILHO, E. I. F.; SOARES, V. P.; SOUZA, A. L. de. Mapeamento de fragmentos florestais com monodominância de aroeira a partir da classificação supervisionada de imagens Rapideye. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 151-161. 2013.

PAULINO, M. B. **Diagnóstico da relação entre o uso do solo e a qualidade da água na bacia hidrográfica do rio dos Sinos – Novo Hamburgo – RS, com o auxílio de técnicas de geoprocessamento.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

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

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M. da; BESKOW, S.; MELLO, C. R. de; COELHO, G. Application of the soil and water assessment tool (SWAT) for sediment transport simulation at a headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. **Transactions of the ASABE**, v.56, n.2, p. 697-709, 2013.

SHARMA, V.; SWAYNE, D. A.; LAM, D.; SCHERTZER, W. Parallel shuffled complex evolution algorithm for calibration of hydrological models. In: **High-Performance computing in an advanced collaborative environment**, 2006. HPCS 2006. 20th International Symposium on. IEEE, 2006. p.30-33.

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

VAN GRIENSVEN, A. **Sensitivity, auto-calibration, unvertainty and model evaluation in SWAT2005.** 2006. Disponível em: <http://swatuser.googlegroups.com/web/swat2005-unc-sens-calib.pdf>>. Acesso em 16 de março de 2015.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using genetic algorithms and Bayesian model averaging. **Journal of Hydrology**. v. 374, p. 307-317, 2009.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS DE TREINAMENTO E DA UTILIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FILTRAGEM DE ÁREAS MENORES QUE A ÁREA MÍNIMA MAPEÁVEL NA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA PELO MÉTODO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA

2. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS DE TREINAMENTO E DA UTILIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FILTRAGEM DE ÁREAS MENORES QUE A ÁREA MÍNIMA MAPEÁVEL NA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA PELO MÉTODO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA

2.1. RESUMO

O estudo da cobertura do solo é uma importante ferramenta no planejamento e gestão dos recursos hídricos, visto que fornece informações importantíssimas sobre os principais processos hidrológicos que ocorrem. Dessa forma, este estudo possui como objetivo a comparação de diferentes tratamentos para amostras de treinamento do classificador supervisionado por máxima verossimilhança, com a utilização de um conjunto de filtros para áreas menores que a área mínima mapeável. Realizou-se a classificação de uma imagem Landsat 8, para a bacia hidrográfica do rio Mucuri, com seis classes de uso, sendo: área urbana, floresta, pastagem, agricultura, solo exposto e água. Os tratamentos foram compostos por diferentes números de amostras de treinamento, variando de 50 a 150 amostras, com 12 pixels em cada, e a presença de um filtro de áreas menores que a área mínima mapeável, definida como sendo de 1,0 hectare. Foram validadas as classificações propostas nos diferentes tratamentos pelos índices Kappa e Exatidão Global. Os resultados foram comparados entre si pelo teste z ao nível de significância de 1%. Com base nos resultados obtidos houveram alterações na área de cada classe de uso do solo de acordo com os diferentes tratamentos utilizados; os valores dos índices Kappa e Exatidão Global foram classificados como muito bons e bons em todos os tratamentos das imagens; os melhores tratamentos para as classificações das imagens foram com 150, 130 e 90 amostras com a utilização dos filtros e 90 amostras sem a utilização dos filtros, os quais não diferiram significativamente entre si.

Palavras-chaves: Bacia do Mucuri; Índice Kappa; Uso do Solo.

2.2. ABSTRACT

INFLUENCE OF SAMPLES TRAINING NUMBER AND AREAS OF SCREENING PROCESS USING AREAS UNDER THE MINIMUM MAPPABLE AREAS FOR THE SUPERVISED CLASSIFICATION FOR MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD

The study of soil cover is an important tool in the planning and management of water resources and provides very important information on hydrological processes that occur. Thus, this study has aimed to compare different treatments for the supervised classification by maximum likelihood using different sizes of training samples and a set of filters to areas smaller than the minimum mappable area. Held the classification of an image Landsat 8, to the basin of the Mucuri river with six classes of use, namely: urban area, forest, grassland, agriculture, bare soil and water. The treatments were composed of different numbers of training samples, ranging from 50 to 150 samples, each with 12 pixels, and the presence of a filter areas smaller than the minimum mappable area, defined as a 1.0 hectare. The classifications proposed in the different treatments by Kappa and Global accuracy indices validated. The results were compared by z test at a significance level of 1%. Based on the results obtained there were changes in the area of each land use class according to the different treatments used; the values of indexes Kappa and Global accuracy were classified as very good and good in all of the images treatments; the best treatments for the ratings of the images were 150, 130 and 90 samples with the use of filters and 90 samples without the use of filters, which did not differ significantly from each other.

Keywords: Mucuri Catchment; Kappa Index; Soil use.

2.3. INTRODUÇÃO

A cobertura do solo é uma importante variável que tange diversos aspectos e estudos, tais como o clima, segurança alimentar, hidrologia, erosão do solo, qualidade atmosférica, estudos de população, dentre diversos outros. A cobertura do solo tende a sofrer mudanças ao longo do tempo, antrópicas ou mesmo naturais. Essas mudanças afetam de maneira significativa todos os processos anteriormente citados (BAN; GONG; GIRI, 2015).

Visando o acompanhamento destes fenômenos, faz-se necessário que ocorra um monitoramento de modo contínuo. Para tal, o sensoriamento remoto é uma importante ferramenta nos estudos hidrológicos, como principal alternativa econômica e funcional. O sensoriamento remoto trabalha com a reflectância da superfície em diferentes faixas espectrais, e por meio dessa informação, pode-se obter dados conclusivos, por exemplo, sobre o uso do solo (GONG, 2012).

No mercado estão disponíveis uma ampla gama de imagens advindas de sensoriamento remoto, com as mais diversas características. Tais imagens podem ser compradas ou até mesmo obtidas gratuitamente. Diversos trabalhos tem utilizados imagens advindas do satélite americano Landsat, devido estarem disponíveis gratuitamente na internet e possuírem boa qualidade (VUOLO; MATTIUZZI; ATZBERGER, 2015; LI; GONG, LIANG, 2015; BARROS et al., 2013).

O processo de classificação consiste na categorização automática de todos os pixels em uma imagem, atribuindo a cada um rótulo que contenha informações sobre o mundo real (MENDES et al., 2015). Devido a existência de diferentes métodos de classificação do uso do solo, diversos trabalhos objetivam a comparação dos resultados obtidos da classificação de determinada área por meio de diferentes métodos, sendo encontrado as mais diversas recomendações em função dos objetivos do mapeamento (FONSECA et al., 2014; AMARAL et al., 2013; MAHMON et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2013; BAN, GONG; GIRI, 2015).

Um dos principais métodos utilizados na classificação de determinada área é o método da Máxima-Verossimilhança. Sua utilização faz-se perante o uso da estatística, para o cálculo do diagrama de dispersão das classes, e sua distribuição de probabilidade por meio das amostras de treinamento. Cria-se, portanto, um limiar de decisão para

classificação de cada pixel com base na probabilidade de pertencer aquela classe. As principais limitações estão no fato de serem necessárias uma grande quantidade de pixels para a classificação e a provável ocorrência de regiões de não classificação. O algoritmo encontra-se disponível no ambiente de trabalho do ArcGis (TSO; MATHER, 2009).

O tamanho da amostra de treinamento é essencial para o desenvolvimento de um bom mapeamento da cobertura do solo. Diversas recomendações do número ideal de amostras de treinamento tem sido elencadas sendo a mais comum, a de 50 unidades amostrais por classe de uso (CONGALTON; 2005) ou de 50 a 100 unidades amostrais por classe de uso (CONGALTON; GREEN, 1999).

Para uma avaliação da precisão da classificação faz-se necessário a validação. Vale ressaltar que uma avaliação da precisão muito raramente envolve um censo completo da imagem classificada, visto que tornaria muito trabalhoso esse processo. Portanto, faz-se necessário a avaliação por um novo processo de amostragem para comparação entre a classificação obtida e a verdade de campo, gerando assim, a matriz de confusão, que pode ser analisada por meio de algum dos índices disponíveis, como por exemplo a Exatidão Global e o índice Kappa (CONGALTON, 2005). A Exatidão Global é um modelo que considera apenas a diagonal principal de pixels da cena, comparando-os a pontos amostrais confiáveis; a correlação é usada como parâmetro para o cálculo da precisão e indica a discordância existente (CONGALTON, 1991).

O Índice Kappa trata-se de um coeficiente em escala nominal, variando de 0 a 1, e leva em consideração toda a matriz de confusão da cena. O seu cálculo é realizado com base na concordância existente entre as amostras de treinamento e os pixels da cena classificada. Trata-se de um índice mais eficiente, pois faz uso de toda a matriz de confusão e não só da diagonal principal, como no caso da Exatidão Global (FONSECA et al., 2014).

Neste contexto, este estudo teve por objetivo comparar tratamentos para a obtenção do mapa de uso do solo com diferentes tamanhos das amostras de treinamento do classificador, com a utilização ou não dos filtros de áreas menores que a área mínima mapeável para o classificador supervisionado por máxima verossimilhança, visando aplicação em estudos hidrológicos.

2.4. MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mucuri é uma importante bacia situada na bacia do Atlântico Leste, estende-se por 17 municípios, sendo que destes, 13 mineiros (95% da área da bacia) e outros quatro capixabas e baianos. Compõe uma área de cerca de 15.400 km², sendo responsável por uma população de aproximadamente 450.000 habitantes. Faz divisa com as bacias dos rios Jequitinhonha, Peruíbe, São Mateus e Doce. Possui vasta atividade mineradora, principalmente na cidade de Teófilo Otoni, além das atividades de agricultura, pecuária e reflorestamento (IGAM, 2011).

O clima na bacia é considerado semiúmido, com período seco se estendendo por quatro a cinco meses, com exceção da divisa com o Espírito Santo, onde o clima é úmido e o período seco tem duração de um a dois meses por ano. A disponibilidade hídrica situa-se entre 2 e 10 l s⁻¹ km⁻², com exceção do divisor com o rio São Mateus, onde a vazão específica pode variar de 10 a 20 l s⁻¹ km⁻², sendo o Índice de Qualidade das Águas no rio Mucuri classificado como Bom (IGAM, 2011).

O rio Mucuri estende-se por 346 km, até o limite com o Estado da Bahia, daí até a sua foz, no Oceano Atlântico, possui aproximadamente 100 km, totalizando, portanto 446 km de extensão, com largura média de 45 metros. Os principais afluentes são: rio Todos os Santos, rio Pampã, rio Marambaia e rio Negro (IGAM, 2011). A Figura 2.1 apresenta a localização da bacia do rio Mucuri.

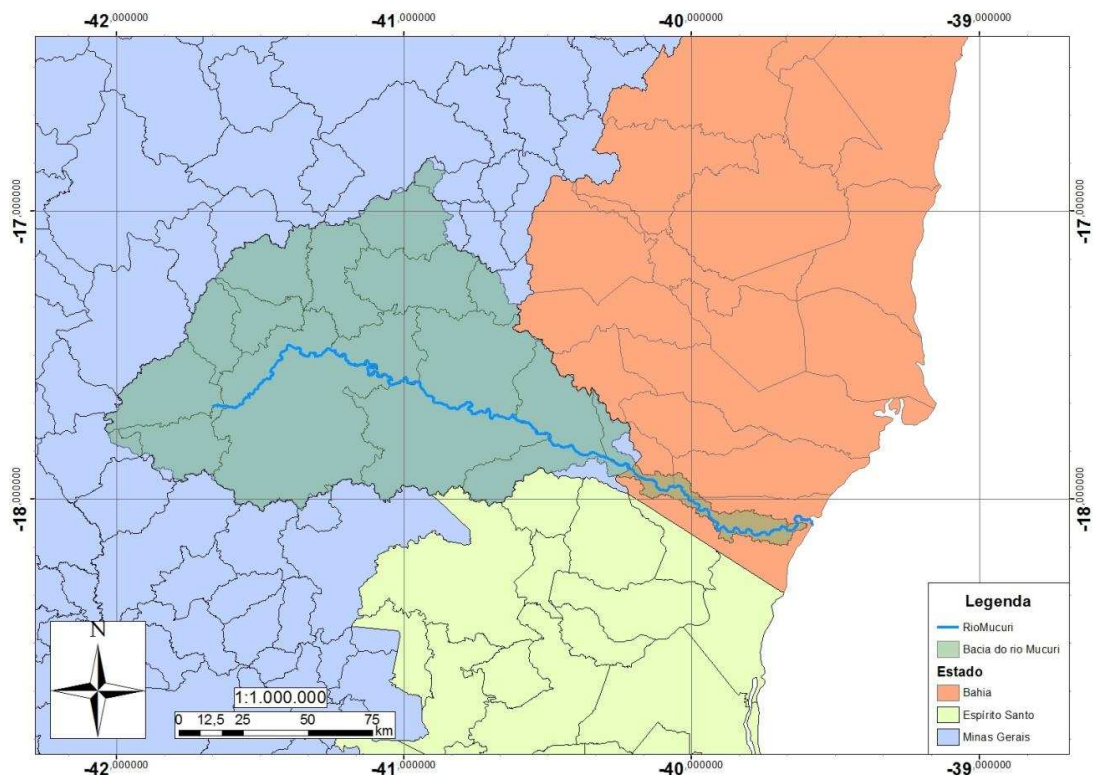


Figura 2.1. Localização espacial da bacia do rio Mucuri.

2.4.2. Base de dados

As imagens de satélite utilizadas foram do satélite LANDSAT 8, adquiridas a partir de dados disponíveis gratuitamente na internet, obtidos no site da USGS (United States Geological Survey), com as devidas correções radiométricas e geométricas pré-processadas pelo sistema. Foi utilizado a interface dos softwares ArcGis 10.0 para finalizar o processamento dos dados e análises necessárias, sendo necessários a utilização de três diferentes cenas para a composição da área total da bacia, conforme apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Dados das cenas utilizadas

| Órbita | Ponto | Data de passagem | Nome do arquivo |
|--------|-------|------------------|-----------------------|
| 217 | 72 | 05/08/2014 | LC82170722015217LGN00 |
| 216 | 72 | 24/04/2014 | LC82160722015114LGN00 |
| 215 | 73 | 30/01/2015 | LC82150732015030LGN00 |

Cabe ressaltar que optou-se por essas imagens em função da não existência de cobertura de nuvens na região para não influenciar nas análises realizadas no trabalho de mapeamento da cobertura do uso do solo. Importante mencionar ainda a utilização das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 para a execução do presente trabalho.

2.4.3. Tratamentos

Optou-se por variar o número de amostras para o treinamento do classificador, partindo de 50 amostras por classe de uso do solo até 150. A escolha da técnica de amostragem partiu da coleta de um grupo de pixels vizinhos (polígonos) com a menor área capaz de ser mapeada, definida como Área Mínima Mapeável (AMM), definida como 1,0 hectare, ou seja, 12 pixels com 30 metros de resolução espacial, a fim de que fosse possível realizar a comparação da utilização ou não dos filtros de áreas menores que a AMM na classificação. Tal procedimento filtra e substitui da imagem os conjuntos de pixels isolados pela média de seus vizinhos. A Tabela 2.2 apresenta os diferentes tratamentos.

Tabela 2.2. Tratamentos propostos

| N° de amostras de treinamento | Filtro de áreas menores que a | | N° de amostras de treinamento | Filtro de áreas menores que a | |
|-------------------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| | AMM | Nome | | AMM | Nome |
| 50 | Com | 50c | 50 | Sem | 50s |
| 70 | Com | 70c | 70 | Sem | 70s |
| 90 | Com | 90c | 90 | Sem | 90s |
| 110 | Com | 110c | 110 | Sem | 110s |
| 130 | Com | 130c | 130 | Sem | 130s |
| 150 | Com | 150c | 150 | Sem | 150s |

2.4.4. Procedimentos utilizados

A sequência de procedimentos utilizados para a classificação das imagens estão apresentadas na Figura 2.2.

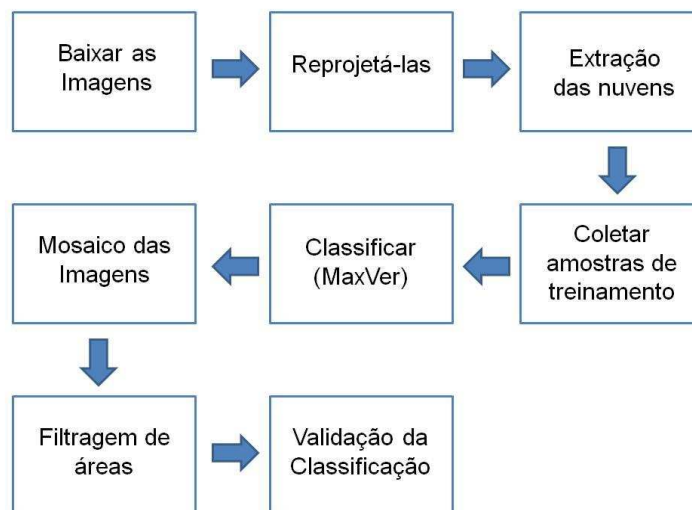


Figura 2.2. Sequência de processos utilizados para a classificação das imagens.

Após o download das imagens, uma importante etapa consistiu em sua reprojeção para um sistema de coordenadas e datum compatível com o interesse. Para este trabalho optou-se por utilizar sempre o datum SIRGAS 2000, fuso 24 do hemisfério Sul e o sistema de coordenadas UTM, com unidade em metros.

O arquivo obtido contém uma camada que traz consigo um campo com quatro diferentes usos, sendo estes nuvem, sombra de nuvem, água e outras coberturas. Por meio deste arquivo criou-se uma máscara para a retirada de áreas afetadas por nuvens. Para tal procedimento tornou-se necessário o comando “Reclassify”, disponível no “Spatial Analyst Tools”. O novo shape criado foi necessário para reclassificar o campo em apenas duas modalidades, sendo uma composta por nuvem e sombra de nuvem e a outra por água e outras coberturas.

Na sequência fez-se necessário selecionar a modalidade correspondente a água e outras coberturas e vetorizá-la através do comando “Raster to polygon”, disponível no “Conversion Tools”. Por fim, extraiu-se as nuvens e suas sombras das bandas da imagem para gerar uma imagem capaz de ser classificada sem as interferências. O comando utilizado foi o “Extract by mask”, disponível no “Spatial Analyst Tools”, onde a máscara é o arquivo vetorial gerado no procedimento anterior. Após, foi realizada a coleta das amostras de treinamento por meio do comando “Create Signatures” que se encontra dentro do módulo “Spatial Analyst Tools”.

A priori, foram coletadas um total de 900 amostras, sendo que cada amostra apresenta-se na forma de um polígono retangular com 4x3 pixels, ou seja, um total de 10.800 pixels coletados dentro da área da bacia. Estas amostras estão distribuídas em toda a área de estudo, abarcando seis classes de interesse para a maioria dos estudos hidrológicos, sendo: urbana, floresta, pastagem, agricultura, solo exposto e água.

A escolha da técnica de amostragem partiu da coleta de um grupo de pixels vizinhos (polígonos) com a menor área capaz de ser mapeada, definida como Área Mínima Mapeável (AMM), definida como 1,0 hectare, ou seja, 12 pixels com 30 metros de resolução espacial, a fim de que fosse possível realizar a comparação da utilização ou não dos filtros de áreas menores que a AMM na classificação.

A fase de classificação da imagem foi realizada por meio da ferramenta “Maximum Likelihood Classification”, também disponível em “Spatial Analyst Tools”. A partir da entrada de um arquivo de amostras de treinamento, criado anteriormente, tornou-se possível a classificação da imagem pelo método da Máxima Verossimilhança (maxver).

Para a realização do mosaico das imagens foi necessário o comando “Mosaic to New Raster”, contido no “Data Management tools”.

2.4.4.1. Procedimento de filtragem de áreas menores que a AMM

Para a filtragem de áreas menores que a AMM utilizou-se uma série de procedimentos, tal como ilustrados na Figura 2.3. Ressalta-se que foram aplicados estes filtros ao conjunto de dados e comparados os resultados com outros as quais não foram aplicados. A justificativa para a não aplicação desses filtros decorre devido ser uma simplificação da realidade da ocupação do solo de forma que, para alguns tipos de trabalho, como por exemplo, estudos hidrológicos, podem distorcer os resultados. Desta forma, vislumbrou-se a comparação entre a aplicação ou não desta etapa.

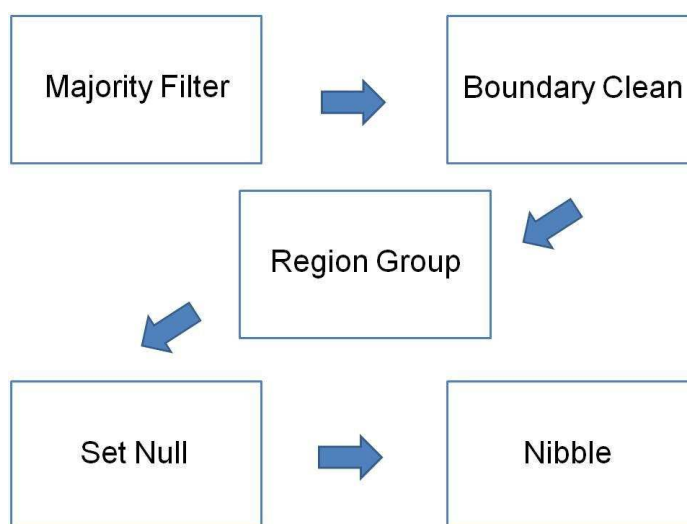


Figura 2.3. Sequência de processos utilizados para a filtragem de áreas menores que a Área Mínima Mapeável (AMM).

O comando “Majority Filter”, encontrado no “Spatial Analyst Tools”, trata-se de um filtro que faz com que o pixel tenha a média dos seus vizinhos. Neste caso optou-se por escolher a dos quatro vizinhos mais próximos. O comando “Boundary Clean” funciona como um suavizador de fronteiras, disponível no “Spatial Analyst Tools”.

O comando “Region Group” é responsável por separar cada grupo de pixels vizinhos e que contém uma mesma classificação, criando um campo com um identificador único para cada “região”, também disponível no “Spatial Analyst Tools”.

A partir das regiões geradas pelo “Region Group”, executa-se o comando “Set Null” que, por meio de uma expressão de entrada, torna todos os valores que não atendem

a expressão nulos ou constantes. A expressão utilizada refere-se a pressuposição de que todas regiões devem ter sua área maior que a AMM, que no presente trabalho, utilizou-se 12 pixels.

Por fim, o comando “Nibble” trata-se de transformar as regiões que anteriormente foram rejeitadas pelo “Set Null” (área < AMM) e aplicar sobre elas o valor dos vizinhos mais próximos.

2.4.5. Validação da classificação

A validação da classificação se deu pela comparação de pontos aleatórios na área com a verdade de campo, com quatro fases principais. A primeira fase consiste na criação de pontos para verificação, para tal, foram amostrados um total de 100 pixels por meio do comando “Create Random Points”, utilizando o polígono de delimitação da bacia do rio Mucuri como limite. A segunda fase é a de verificação de que os pontos de validação não coincidam com as amostras de treinamento do classificador. A terceira consiste na identificação da cobertura do solo real dos pixels pela verdade de campo. Esta fase foi realizada por meio de observações locais da cobertura do solo na bacia. Por fim, a quarta fase consiste em criar a matriz de confusão por meio do comando “Tabulate Area”, no módulo “Spatial Analyst Tools”. Essa matriz serve de base para o cálculo dos índices Kappa e Exatidão Global (CONGALTON, 1991), que foram escolhidos como índices de avaliação da classificação. O índice Kappa foi calculado de acordo com a Equação 2.1.

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (2.1)$$

Onde,

P_o = Proporção de pontos de referência que concordam; e

P_c = somatório do produto dos elementos das linhas e colunas marginais, e indica a proporção de elementos atribuídos a determinada classe ao acaso.

Landis e Koch (1977) definiram intervalos de classificação para o Índice Kappa, conforme apresentados pela Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Classificação do índice Kappa (K)

| Índice Kappa | Classificação |
|---------------------|---------------|
| $K < 0,199$ | Ruim |
| $0,200 < K < 0,399$ | Razoável |
| $0,400 < K < 0,599$ | Bom |
| $0,600 < K < 0,799$ | Muito Bom |
| $K > 0,800$ | Excelente |

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977)

Outro índice utilizado para a validação da classificação foi a Exatidão Global (G), representada pela Equação 2.2 para seu cálculo.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{n} \quad (2.2)$$

Onde,

n_{ii} = Elementos da diagonal principal da matriz de confusão;

n = número total de observações; e

M = número total de classes mapeadas.

2.4.6. Análises comparativas

Visando a comparação dos resultados analisou-se as classificações obtidas sob diferentes tamanhos de amostra, também as áreas correspondentes a cada diferente tratamento. Posteriormente, analisou-se os valores do índice Kappa obtidos para cada uma das situações e então comparados entre si a partir da aplicação do teste z ao nível de 1% de significância (VIEIRA, 2001; CONGALTON, 1991).

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam as classificações obtidas sob os diferentes tratamentos propostos. Pode-se observar que, de forma geral as classificações apresentaram os mesmos aspectos visuais, porém apresentaram grandes variações em diversas classes, principalmente se promovido uma análise em uma escala com maior grau de detalhamento, conforme Figura 2.6 e 2.7.

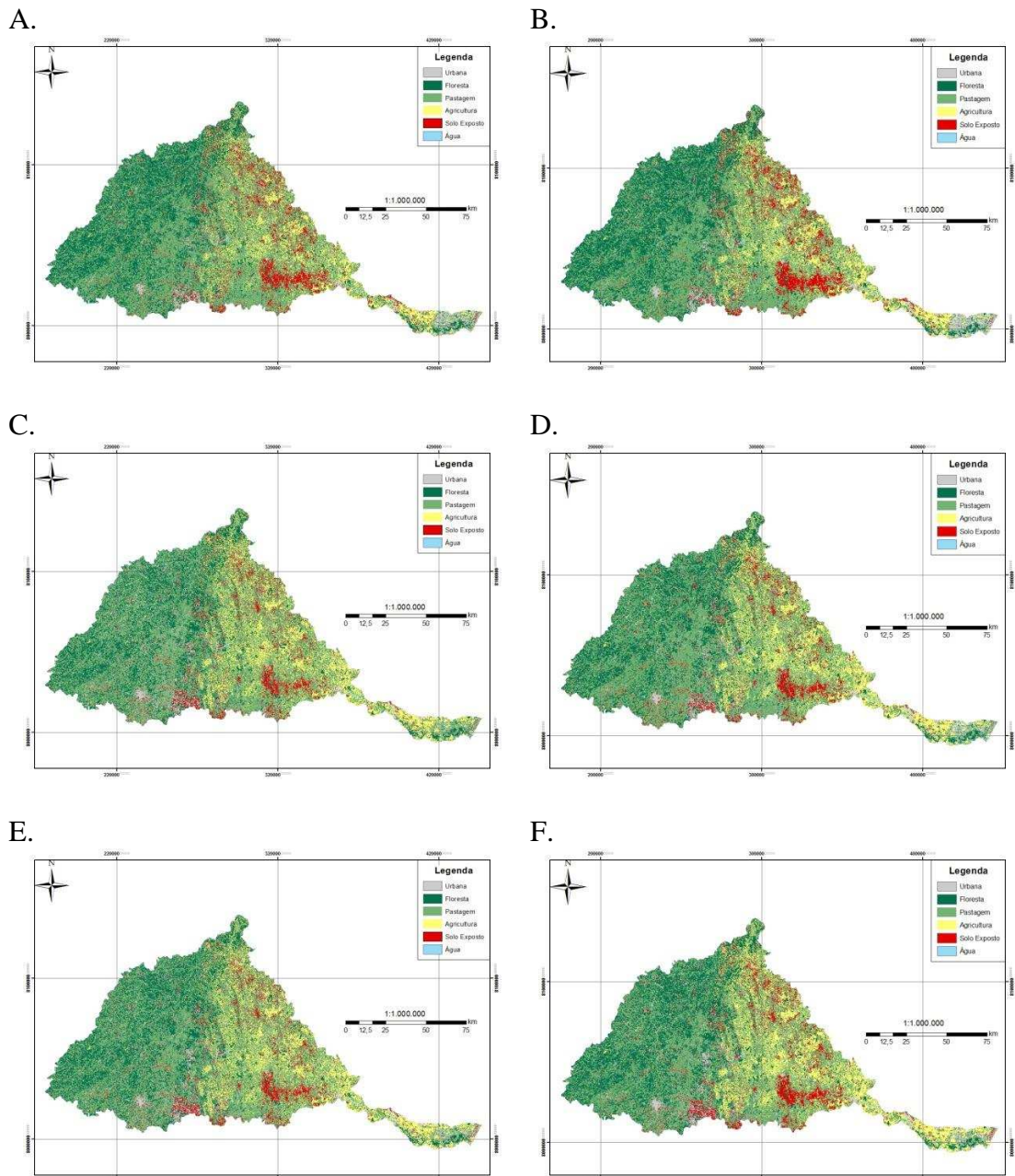


Figura 2.4. Diferentes classificações obtidas para a bacia do Mucuri, sendo: a) Classificação com a utilização de 50 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (50s); b) Classificação com a utilização de 50 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (50c); c) Classificação com a utilização de 70 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (70s); d) Classificação com a utilização de 70 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (70c); e) Classificação com a utilização de 90 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (90s); e f) Classificação com a utilização de 90 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (90c).

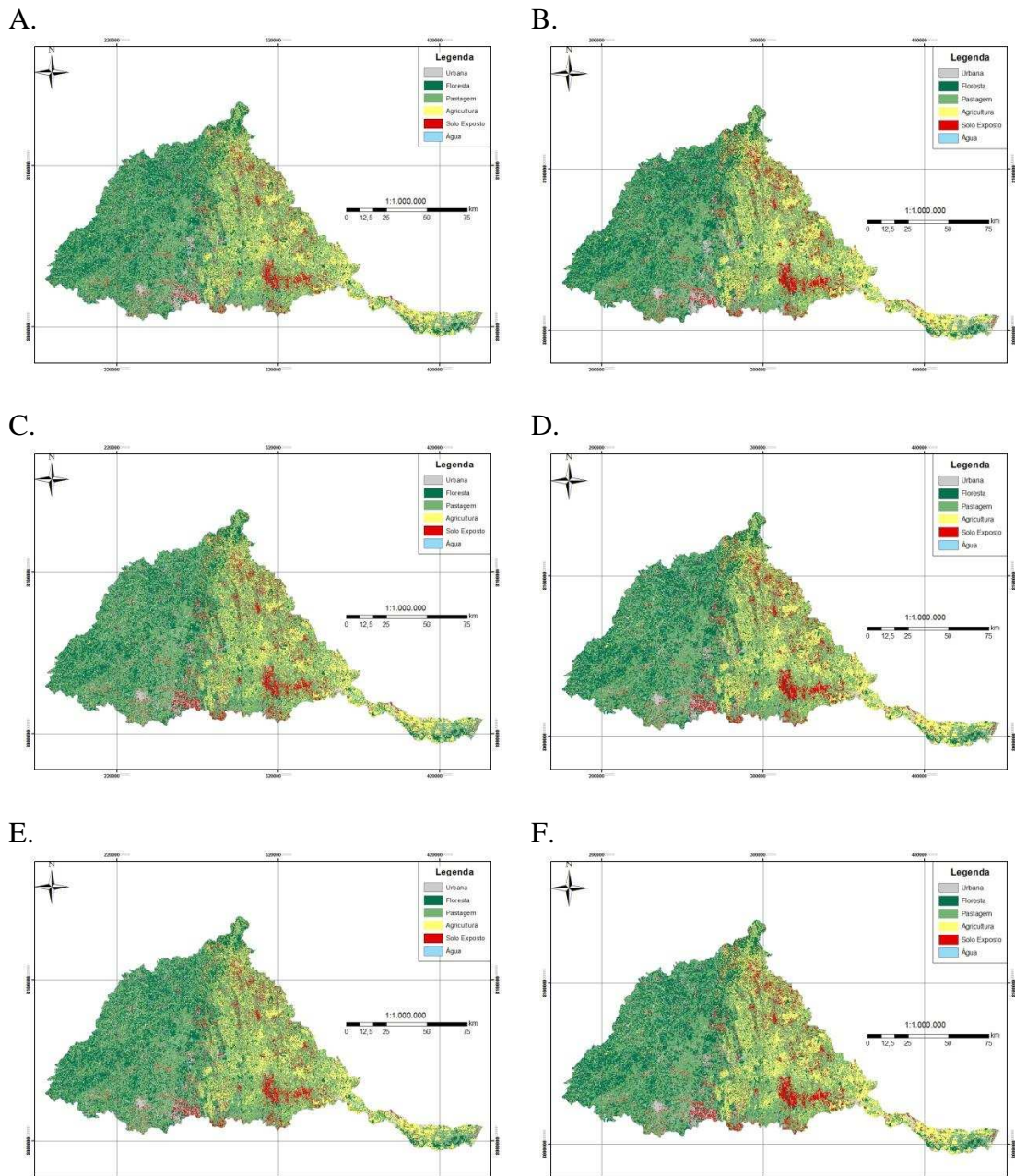
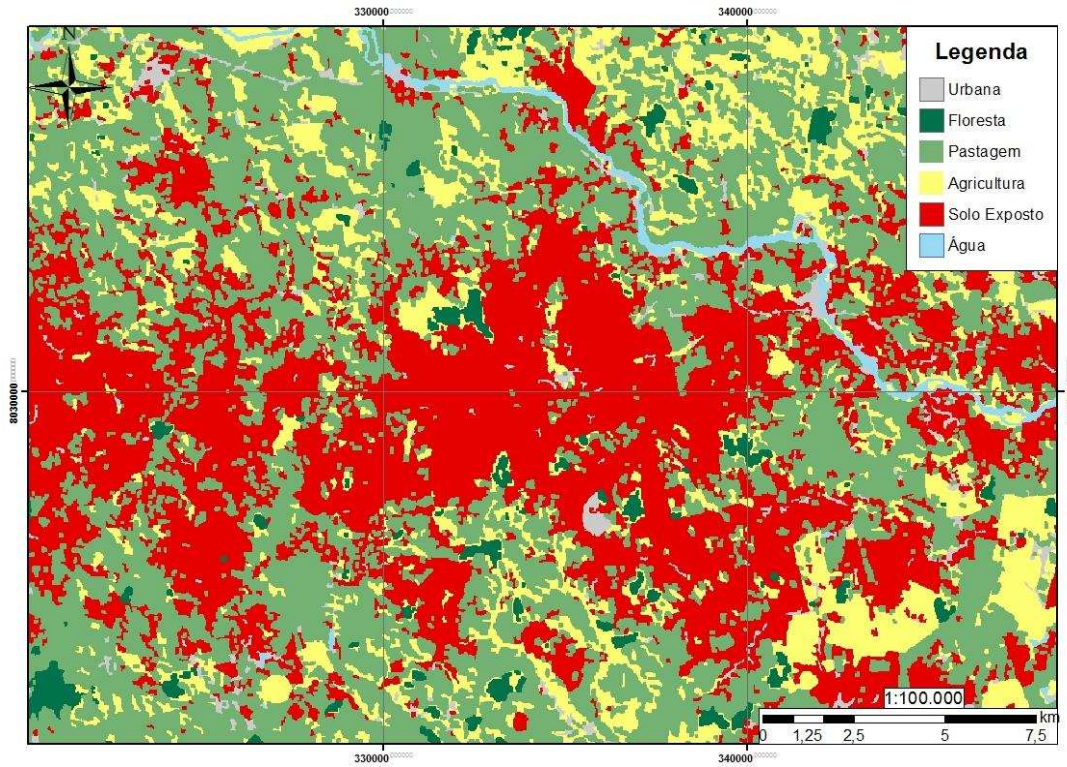


Figura 2.5. Diferentes classificações obtidas para a bacia do Mucuri, sendo: a) Classificação com a utilização de 110 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (110s); b) Classificação com a utilização de 110 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (110c); c) Classificação com a utilização de 130 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (130s); d) Classificação com a utilização de 130 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (130c); e) Classificação com a utilização de 150 amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro (150s); e f) Classificação com a utilização de 150 amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro (150c).

A.



B.

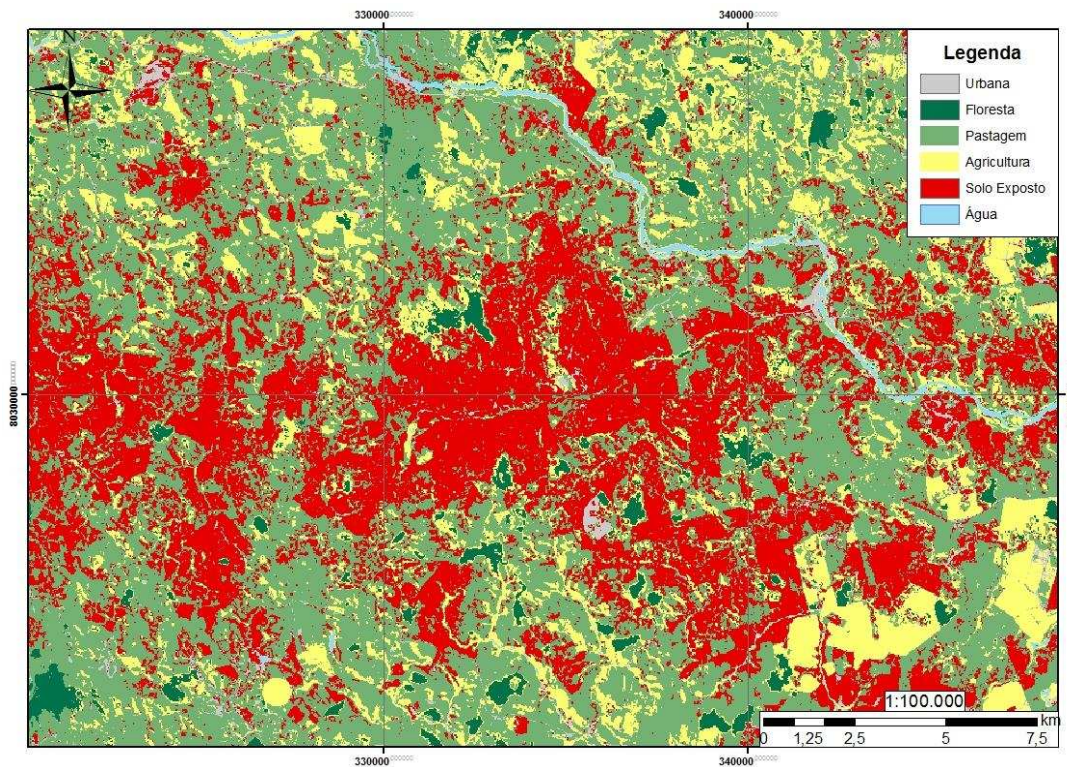
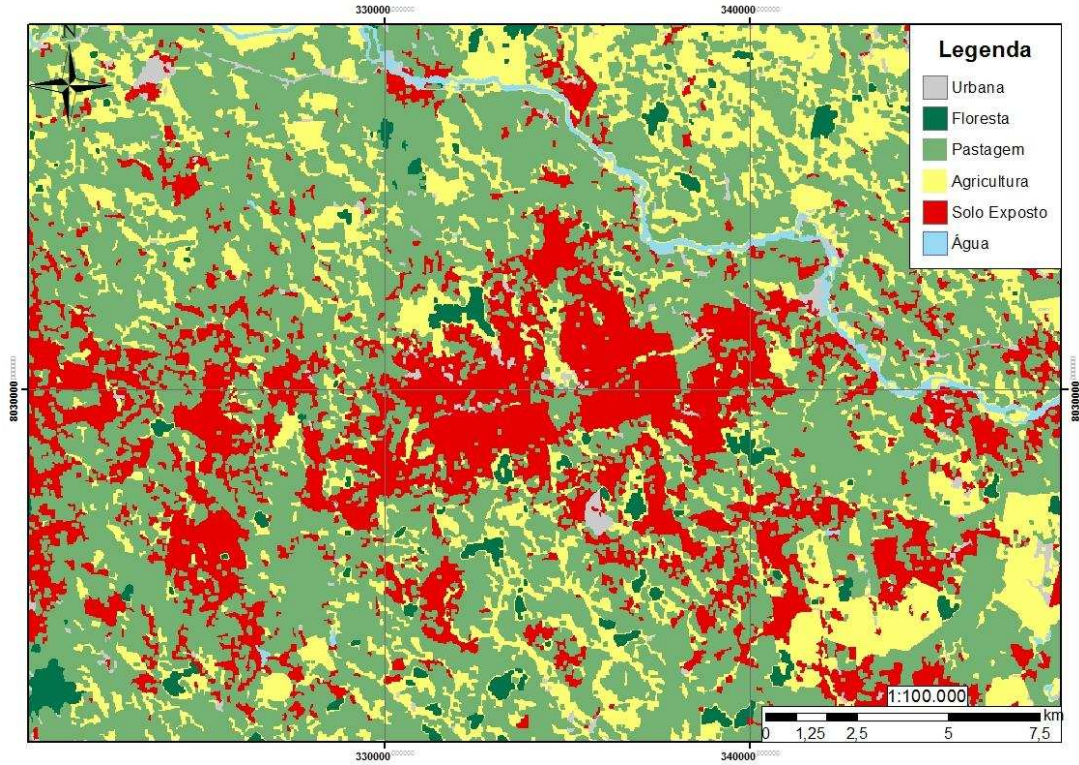


Figura 2.6. Detalhamento da influência da utilização do filtro, sendo: a) Utilização de 50 amostras de treinamento por classe de uso com o filtro (50c); e b) Utilização de 50 amostras de treinamento por classe de uso sem o filtro (50s).

A.



B.

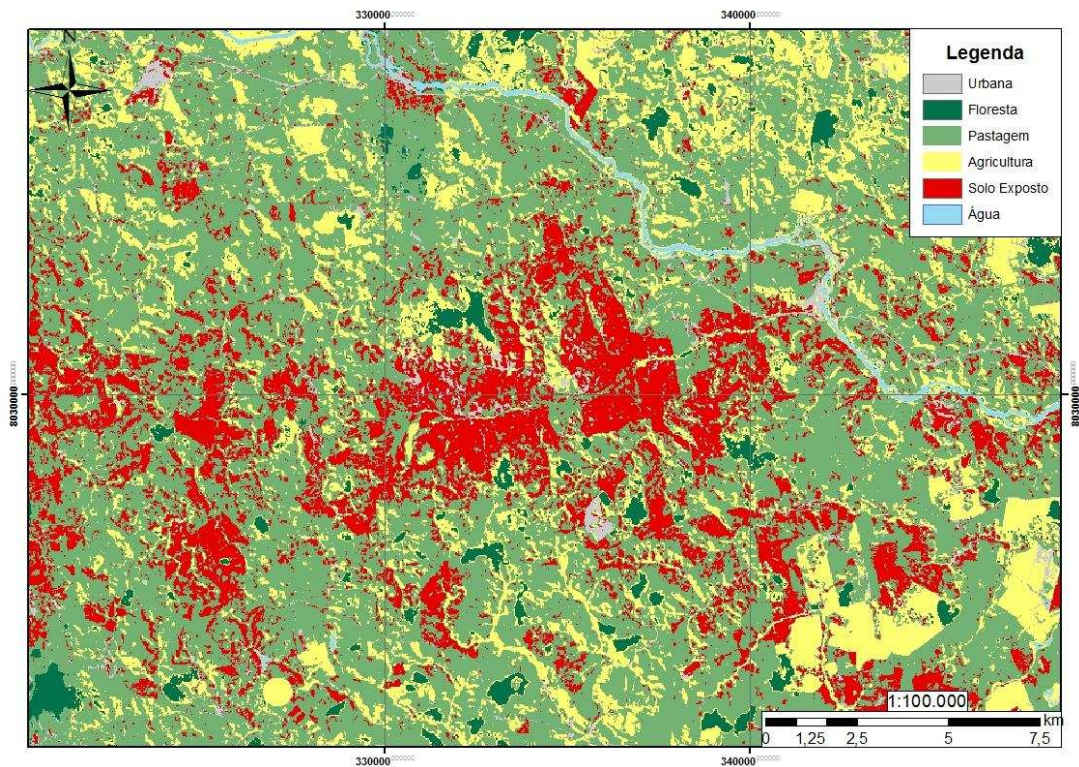


Figura 2.7. Detalhamento da influência da utilização do filtro, sendo: a) Classificação com a utilização de 150 amostras de treinamento por classe de uso com a utilização do filtro (150c); e b) Classificação com a utilização de 150 amostras de treinamento por classe de uso sem a utilização do filtro (150s).

Pode-se evidenciar, pelas comparações propostas nas Figuras 2.6 e 2.7, que a utilização dos processos de filtragem de áreas menores que a AMM propicia uma imagem mais limpa, ou seja, sem a presença de pixels isolados. Porém, do ponto de vista hidrológico, pode ser que exista alguma influência neste processo, visto que estes pixels isolados podem representar uma verdade de campo, portanto serem pontos agravantes de problemas, principalmente se combinados a outros fatores, tais como: grandes erosões, desmatamento, dentre outros (WEILL; SPAROVEK, 2008).

Outro fato que pode ser evidenciado das classificações por diferentes números de amostras de treinamento do classificador (Figuras 2.6 e 2.7) foi o aumento expressivo de algumas classes para o local detalhado e a diminuição em outras. A dinâmica da área ocupada por cada área é apresentada pela Figura 2.8.

A classificação com diferentes números de amostras de treinamento para cada classe de uso do solo sem a utilização do filtro apresentou em relação à área da bacia, em média, para as classes de usos urbano 6,50%, floresta 23,55%, 49,27% da área para pastagem, 13,86% para agricultura, 6,20% para solo exposto e, por fim, 0,63% representado a classe água. Com a utilização do filtro os números foram de 6,13% da área da bacia para a classe urbana, 23,78% da área para a classe floresta, 47,17% da área apresenta-se sobre a classe pastagem, 15,28% para a agricultura, 7,00% da área foi de solo exposto e 0,64% representando a classe água. Esses resultados corroboram com a maioria das pesquisas de mapeamento realizado no Estado de Minas Gerais, onde existe uma grande predominância do uso de pastagem sobre os demais usos (LIMA et al., 2013; SILVA; NOGUEIRA; UBERTI, 2010; LEITE et al., 2012).

A partir das análises realizadas pode-se inferir, para a bacia hidrográfica do rio Mucuri, que os diferentes tratamentos propostos não apresentaram grande interferência nas classes de uso do solo, porém, localmente podem.

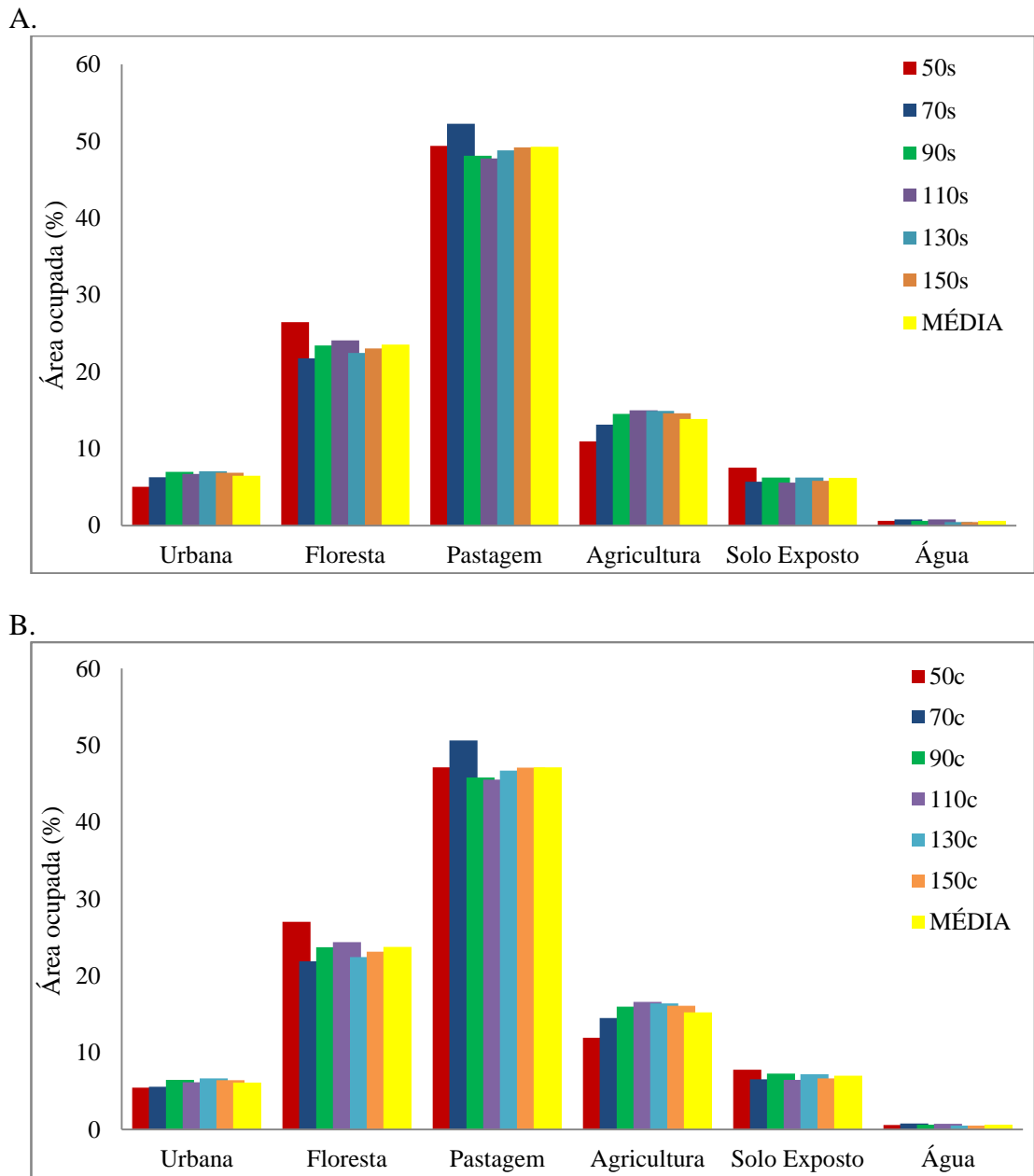


Figura 2.8. Dinâmica da área da bacia, em porcentagem, para cada diferente classe de uso e ocupação do solo sob a influência de diferentes números de amostras de treinamento para o classificador, sendo: a) classificação com a utilização de diferentes números de amostras de treinamento por classe de uso e sem a utilização do filtro; e b) classificação com a utilização de diferentes números de amostras de treinamento por classe de uso e com a utilização do filtro.

Nas Tabelas 2.4 e 2.5 estão apresentados os resultados obtidos pela comparação entre os classificadores por meio dos índices Kappa (K) e Exatidão Global (G).

Tabela 2.4. Índices obtidos, sob diferentes número de amostras de treinamento para as classificações com a utilização do filtro

| | 50c | 70c | 90c | 110c | 130c | 150c |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| G | 0,710 | 0,720 | 0,730 | 0,710 | 0,730 | 0,730 |
| K | 0,605 | 0,617 | 0,633 | 0,609 | 0,636 | 0,636 |
| Zc | 302,618 | 312,466 | 330,352 | 311,875 | 329,361 | 329,361 |

Tabela 2.5. Índices obtidos, sob diferentes número de amostras de treinamento para as classificações sem a utilização do filtro

| | 50s | 70s | 90s | 110s | 130s | 150s |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| G | 0,700 | 0,700 | 0,740 | 0,720 | 0,710 | 0,730 |
| K | 0,583 | 0,581 | 0,634 | 0,605 | 0,592 | 0,618 |
| Zc | 283,307 | 286,001 | 323,556 | 302,179 | 291,487 | 309,558 |

Os índices Kappa variaram de 0,581 a 0,636 em função dos diferentes tratamentos analisados, sendo a média de 0,612. Segundo a classificação do índice Kappa (Tabela 2.3) os tratamentos receberam a classificação Bom e Muito Bom. Este fato mostra que a classificação da imagem para obtenção do mapa de uso do solo é adequada, ou seja, a distribuição espacial das classes obtidas correspondem à verdade de campo.

A Exatidão Global variou de 0,700 a 0,740, de acordo com os diferentes tratamentos, sendo a média de 0,719. Cabe ressaltar que o cálculo da Exatidão Global leva em consideração apenas a diagonal principal da matriz de confusão obtida, ou seja, os acertos na classificação. No cálculo do índice Kappa faz-se uso de toda a matriz de confusão, o que tende a ser mais significativo nas comparações, pois leva em consideração, além dos acertos na classificação, os erros na classificação. Na Figura 2.9 apresenta-se os dois índices obtidas em função das variações da utilização ou não dos filtros de área menor que a AMM e a variação do número de amostras de treinamento.

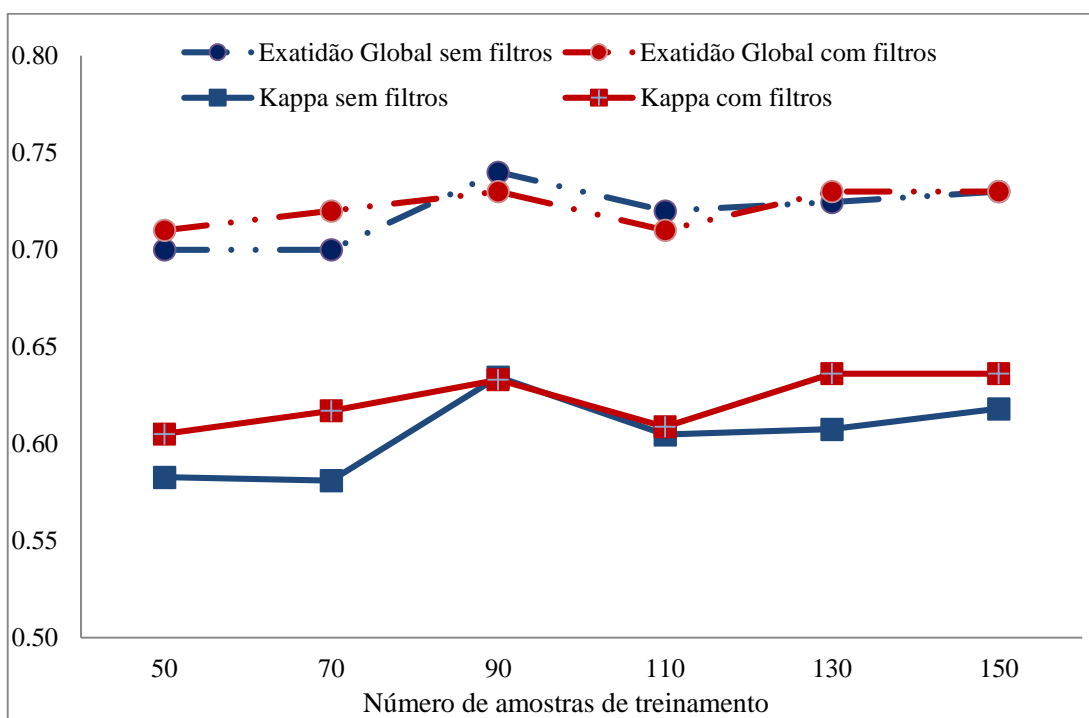


Figura 2.9. Variações dos índices de acordo com os diferentes tratamentos propostos.

Pela análise da Figura 2.9 nenhuma tendência pôde ser observada de evolução dos índices Kappa e Exatidão Global em função do aumento do número de amostras por classe de uso do solo. Em função desta observação, na Tabela 2.6, montou-se um ranqueamento dos melhores tratamentos em função da aplicação do teste estatístico.

Tabela 2.6. Índices obtidos, sob diferentes número de amostras de treinamento para as classificações sem a utilização do filtro.

| Tratamento | Kappa | Classificação |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| 150c, 130c, 90s e 90c | 0,636; 0,636; 0,634 e 0,633 | Muito bom |
| 150s e 70c | 0,618 e 0,617 | Muito bom |
| 110c, 110s e 50c | 0,609; 0,605 e 0,605 | Muito bom |
| 130s | 0,592 | Bom |
| 50s e 70s | 0,583 e 0,581 | Bom |

Obs. Os tratamentos em uma mesma linha não diferiram estatisticamente entre si pelo teste z, a 1% de significância.

Os melhores tratamento, de acordo com o índice Kappa, foram os tratamentos com 150, 130 e 90 amostras por classe de uso do solo com a utilização dos filtros e com 90 amostras por classe de uso do solo sem a utilização dos filtros, pois não diferiram estatisticamente entre si.

Posteriormente segue-se os tratamentos com 150 amostras por classe de uso do solo sem a utilização dos filtros e o de 70 amostras por classe de uso do solo com a utilização dos filtros, que não são diferentes entre si estatisticamente. Seguindo, os tratamentos com 110 e 50 amostras por classe de uso do solo com a utilização dos filtros

e o de 110 amostras por classe de uso sem a utilização dos filtros. Todos foram classificados como “Muito bons” de acordo com Landis e Kock (1977).

A utilização de 130 amostras por classe de uso do solo sem a utilização dos filtros ocupa a penúltima posição, e por fim a utilização de 50 e 70 amostras por classe de uso do solo sem a utilização do filtro, ocupando a última posição do ranking. Essas foram classificadas como “Bons” de acordo com Landis e Kock (1977).

É esperado que a utilização do filtro interfira na classificação, visto que alguns pixels existentes de forma isolada no ambiente mesmo que sejam uma verdade de campo, são substituídos pelos valores de seus vizinhos. Essa simplificação tende a diminuir o índice Kappa, no entanto, os resultados obtidos não evidenciaram essa afirmação.

Outra observação importante diz respeito ao fato de que com o incremento do número de amostras de treinamento por classe de uso do solo, houve um aumento do índice kappa. Todavia, com a utilização do filtro a partir de 90 amostras por classe de uso do solo, com exceção de 110 amostras por classe de uso do solo, não houveram diferenças significativas entre os tratamentos.

2.6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir:

A classificação do uso do solo pelo método da Máxima Verossimilhança se mostrou adequada;

A obtenção de mapas de uso do solo com tamanhos de amostras de treinamento de 150, 130 e 90 apresentaram resultados satisfatórios mediante a utilização, de modo geral, de filtro de áreas menores que a AMM.

2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, M. V. F.; SOUZA, A. L. de; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. C.; MARTINS, S. V.; FILHO, E. I. F.; LANA, J. M. Avaliação e comparação de métodos de classificação de imagens de satélites para o mapeamento de estádios de sucessão florestal. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 151-161. 2013.

BARROS, K. De O.; MARCATTI, G. E.; COSTA, F. R.; OLIVEIRA, J. de C.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; SILVA, E. Análise temporal das classes de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais. **Revista Agrogeoambiental**, v. 5, n. 2, p. 43-54, 2013.

BAN, Y.; GONG, P.; GIRI, C. Global land cover mapping using earth observation satellite data: recent progresses and challenges. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 103, p. 1-6. 2015.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**. V. 37, p. 35-46. 1991.

CONGALTON, R. G. Thematic and positional accuracy assessment of digital remotely sensed data. **Proceedings of the Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium**, p. 149-154, Outubro, 2005; Portland, ME. General Technical Report wo-77, u. S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, DC.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton, FL: Lewis Publishers. 1999. 137 p.

FONSECA, D. de S. R.; CLEMENTE, C. M. S.; REIS, D. de C.; CARDOSO, T. de R.; MELO, W. J. de.; FRANÇA, M. A. Estatística experimental aplicada na avaliação da eficiência de métodos baseados em classificação supervisionada de imagens. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 537-544, 2014.

GONG, P. Remote sensing of environmental change over China: A review. **Chinese Science Bulletin**, v. 57, n. 22, p. 2793-2801. 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH**. IGAM, 2011. 139p.; il. – Resumo executivo volume 1. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planosderecursos_hidricos/resumo-executivo-vol-1.pdf>. Acesso em 02 de fev. de 2015.

LANDIS, J.; KOCK, G. G. The measurements of agreement for categorical data biometrics. **Washington**, v. 33, n. 3, p. 159-179. 1977.

LEITE, M. E.; ALMEIDA, M. I. S. de; VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. F. F. Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento da dinâmica do uso do solo na bacia do rio pacuí, no norte de minas gerais, nos anos de 1989, 1999 e 2009. **Revista do Departamento de Geografia – USP**. v. 23, pp 217-231. 2012.

LI, X.; GONG, P.; LIANG, L. A 30-year (1984-2013) record of annual urban dynamics of Beijing City derived from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 166, p. 78-90. 2015.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A. da; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. N.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normatizada (IVDN). **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 8, n.2, 2013.

MAHMON, N. A.; YA'ACOB, N.; YUSOF, A. L.; JAAFAR. Classification methods for remotely sensed data: Land use and land cover classification using various combinations of bands. **Journal Teknologi**, v. 74, n. 10, p. 89-96. 2015.

MCCOY, R. M. **Fields methods in remote sensing**. New York: The Guilford Press, 2005. 177p.

MENDES, D. F.; SILVA, S. F. da; FERRARI, J. L.; SANTOS, A. R. dos; GARCIA, R. F. Acurácia temática do classificador por Máxima Verossimilhança em imagem de alta resolução espacial do satélite GEOEYE-1. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 107-118. 2015.

OLIVEIRA, F. P.; FILHO, E. I. F.; SOARES, V. P.; SOUZA, A. L. de. Mapeamento de fragmentos florestais com monodominância de aroeira a partir da classificação supervisionada de imagens Rapideye. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 151-161. 2013.

SILVA, E. B. da; NOGUEIRA, R. E.; UBERTI, A. A. A. Avaliação da aptidão agrícola das terras como subsídio ao assentamento de famílias rurais, utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Vol. 34; pp.1977-1990, 2010.

TSO, B.; MATHER, P. **Classification methods for remotely sensed data**. New York: Taylor & Francis Group, 2009. 155p.

VIEIRA, C. A. O. **Accuracy of modeling sensing classification crops: a comparative study**. 2001. 353 p. Tese (Doutorado) – Universidade of Nottingham.

VUOLO, F.; MATTIUZI, M.; ATZBERGER, C. Comparison of the Landsat surface reflectance climate data record (CDR) and manually atmospherically corrected data in a semi-arid European study area. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 42, p. 1-10. 2015.

WEILL, M. de A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). II- Interpretação da tolerância de perda de solo utilizando o método do índice de tempo de vida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 815-824. 2008.

CAPÍTULO 3

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUCURI

3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUCURI

3.1. RESUMO

Os modelos hidrológicos estão cada vez mais difundidos na atualidade, visto que podem simular o impacto das mais diversas situações nos recursos hídricos. Nesse contexto, objetivou-se a calibração e validação do modelo SWAT para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri. Para tal, levantou-se toda a base de dados disponível e por meio do módulo SUFI2, do software SWAT-CUP, procedeu-se a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo. A calibração foi realizada em uma estação intermediária e a validação em outras três localizadas a montante e duas a jusante do ponto de calibração. A eficiência foi avaliada por meio dos coeficientes de determinação, eficiência de Nash-Sutcliffe e Percentual de tendência. Os resultados evidenciaram para a bacia que os parâmetros referentes aos processos de escoamento de base se mostraram mais sensíveis; a calibração do modelo foi classificada como boa, com tendência de superestimativa de 15%; na validação houveram diversos comportamentos distintos, sendo a maioria classificados como bons; nas estações de cabeceira, em função das diferenças expressivas de uso do solo e da topografia, foi verificado desempenho do modelo classificado como inadequado, explicado principalmente pelos processos hidrológicos de formação de vazão predominantes; o modelo SWAT calibrado e validado, por meio da utilização do SWAT-CUP, apresentou bom desempenho na simulação da vazão na bacia do rio Mucuri; e mostrou-se adequado para auxiliar no planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, SWAT-CUP; Vazão.

3.2. ABSTRACT

CALIBRATION AND VALIDATION OF SWAT HYDROLOGICAL MODEL FOR THE MUCURI CATCHMENT

Hydrological models are increasingly widespread today as they can simulate the impact of different situations on water resources. In this context, the aim of this study is the calibration and validation of the SWAT model for soil and climatic conditions of the catchment area of the Mucuri river. To this end, it rose all the available database and through SUFI2 module, SWAT-CUP software, proceeded to the sensitivity analysis, calibration and validation of the model. Calibration was performed at an intermediate station and validation in other three located upstream and two downstream of the calibration point. The effectiveness was assessed by determination coefficient, the coefficients Nash-Suttcliffe efficiency and percentage trend. The results for the basin related the parameters involving to the basic flow processes were more sensitive; the model calibration was classified as good, with 15% overestimation trend; validation there were several distinct behaviors, most classified as good; the bedside stations, due to the significant differences in land use and topography, it was verified model performance classified as inadequate, mainly due to the hydrological processes of formation of predominant flow; SWAT model, through the use of SWAT-Cup, performed well for the calibration and validation in the Mucuri river basin; and it was adequate to assist in planning and management of water resources in the basin.

Keywords: Hydrological Modeling; SWAT-CUP; Streamflow.

3.3. INTRODUÇÃO

Questões hídricas são amplamente difundidas e discutidas em todo o mundo, pois trata-se de um recurso natural imprescindível para a vida no planeta. Dessa forma, tornam-se importante os estudos avaliando a sua distribuição ao longo do espaço e do tempo. Em diversas regiões do mundo a disponibilidade de recursos hídricos é comprometida principalmente pela ação antrópica. Os modelos hidrológicos estão presentes principalmente nestas regiões, pois ajudam a simular os impactos das ações humanas nos recursos hídricos e auxiliam no planejamento e gestão de bacias hidrográficas (TUNDISI; TUNDISI, 2010).

O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido nos Estados Unidos, pelo Agricultural Research Service e pela Texas A & M University, durante os anos 90. Trata-se de um modelo de base matemática conceitual semi-físico, semi-distribuído, contínuo no tempo e que opera por meio de dados diários e ainda permite a interconexão de diferentes processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Atualmente conta com várias ferramentas mais elaboradas de integração com os SIG's facilitando, assim, a entrada, manipulação e edição de bancos de dados que alimentam o sistema e contribuem para uma melhor elaboração das saídas do modelo, tais como mapas e gráficos de simulações mais agradáveis ao usuário final (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013; MONTEIRO et al., 2015).

O modelo é estruturado em componentes básicos de atuação, como: hidrológico, clima, sedimentos, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, manejo agrícola e qualidade da água. Uma estrutura de comandos é utilizada para propagar o escoamento superficial, sedimentos e nutrientes através das sub-bacias. Embora o modelo opere em um passo de tempo diário, ele é eficiente para simular vários anos, sendo um modelo utilizado para prever o comportamento da bacia a longo-prazo, não sendo capaz de simular eventos isolados, como intensidade e duração da precipitação e propagação de um evento de cheia (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2005; WINCHELL et al., 2009).

Os dados de entrada do modelo tratam-se do principal empecilho para as condições brasileiras, visto que o sistema de aquisição de dados se encontra defasado, com falhas e em menor quantidade do que se deveria ter. Tais fatores contribuem para a

ineficiência da aplicação de diversos modelos mais complexos e precisos nas bacias hidrográficas brasileiras (BRESSIANI et al., 2015).

A entrada do modelo é constituída por dados espacializados, compostos pelos Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), mapa de solos e mapa de uso e ocupação do solo. Também são necessários dados advindos de estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas, as quais servem para a calibração e validação do modelo. Outras entradas são os dados tabulares referentes, principalmente, as características físico-hídricas dos solos, características climáticas da região e dados hidrológicos dos usos e ocupação que ocorrem (MONTEIRO et al., 2015; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011).

O SWAT estabelece uma sequência básica de dados para seu funcionamento que são as etapas de análise de sensibilidade, calibração dos parâmetros do modelo, validação dos parâmetros e simulação de cenários futuros (PINTO et al., 2013).

A fase de análise de sensibilidade do modelo hidrológico diz respeito a avaliação dos parâmetros que serão utilizados em função da qualidade de resposta do modelo. É uma fase de extrema importância, pois através dela, pode-se dar mais atenção aos parâmetros que exercem mais influência no modelo durante a fase de calibração (MULETA; NICKLOW, 2005).

O processo de calibração consiste no ajuste dos valores dos parâmetros do modelo para que os valores simulados se aproximem dos observados, representando, assim, melhor o processo simulado. Torna-se importante salientar que o modelo hidrológico desconhece as condições iniciais de simulação, condições essas que podem exercer grandes impactos no processo simulado, e portanto, necessita de um tempo para “aquecimento” ou warm-up (LI et al., 2015; ERCAN et al., 2014; AJAMI et al., 2004).

Segundo Arnold et al. (2012), uma avaliação da qualidade do modelo é extremamente importante, pois mais do que aplicar um modelo, existe o interesse de que com os parâmetros ajustados e o modelo funcionando perfeitamente, possam ser realizadas diversas simulações e seus respectivos impactos no ciclo hidrológico.

O processo de validação está fundamentado na utilização do modelo com os parâmetros calibrados durante a etapa de calibração em uma massa de dados independente para que se possa avaliar, por meio de diversos testes estatísticos, a aplicabilidade do modelo para o dado evento (PEREIRA et al., 2014).

Posterior às fases de validação, se o modelo obtiver um desempenho satisfatório, torna-se possível realizar simulações do processo modelado de acordo com as diversas variações (MAREK et al., 2016).

São várias as vantagens da modelagem hidrológica, sendo desde questões referentes ao planejamento e gestão dos recursos hídricos até segurança pública em eventos extremos, tais como enchentes ou secas (ABBASPOUR et al., 2015; MEAURIO et al., 2015; AWAN; ISMAEEL, 2014). Neste contexto, torna-se conveniente no desenvolvimento de modelos, estudos para que se tenha uma base de dados consistente para as mais diversas condições edafoclimáticas existentes no Brasil (PINTO et al., 2013; PEREIRA et al., 2014; MONTEIRO et al., 2015; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011).

Com base neste enfoque, objetivou-se com este trabalho a calibração e validação do modelo SWAT para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri, bem como testar o seu desempenho.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mucuri (Figura 3.1) está inserida na bacia do Atlântico Leste, estendendo-se por 17 municípios, sendo destes, 13 são mineiros (95% da área da bacia) e outros quatro capixabas e baianos. Compõe uma área de cerca de 15.400 km², com uma população de aproximadamente 450.000 habitantes. Faz divisa com as bacias dos rios Jequitinhonha, Peruíbe, São Mateus e Doce. Possui vasta atividade mineradora, principalmente na cidade de Teófilo Otoni, além das atividades de agricultura, pecuária e reflorestamento (IGAM, 2011).

O clima no vale do Mucuri é caracterizado como um clima tropical quente semiúmido do tipo Aw, segundo classificação Koppen (KOTTEK et al., 2006). Pela classificação proposta pelo Zoneamento Ecológico do Estado de Minas Gerais (ZEE-MG) o clima pode ser denominado como sub-úmido seco (C1), com intervalo do índice de umidade variando de -33,3 a 0, precipitação anual variando de 850 a 1.100 mm e temperaturas médias anuais entre 21 e 28°C (SCOLFORO et al., 2008).

O rio Mucuri estende-se por 346 km desde suas nascentes até o limite com o Estado da Bahia, daí até a sua foz, no Oceano Atlântico, possui aproximadamente 100 km, totalizando 446 km em toda sua extensão e largura média de 45 metros. Os principais afluentes do rio Mucuri são: os rios Todos os Santos, Pampã, Marambaia e Negro (IGAM, 2011).

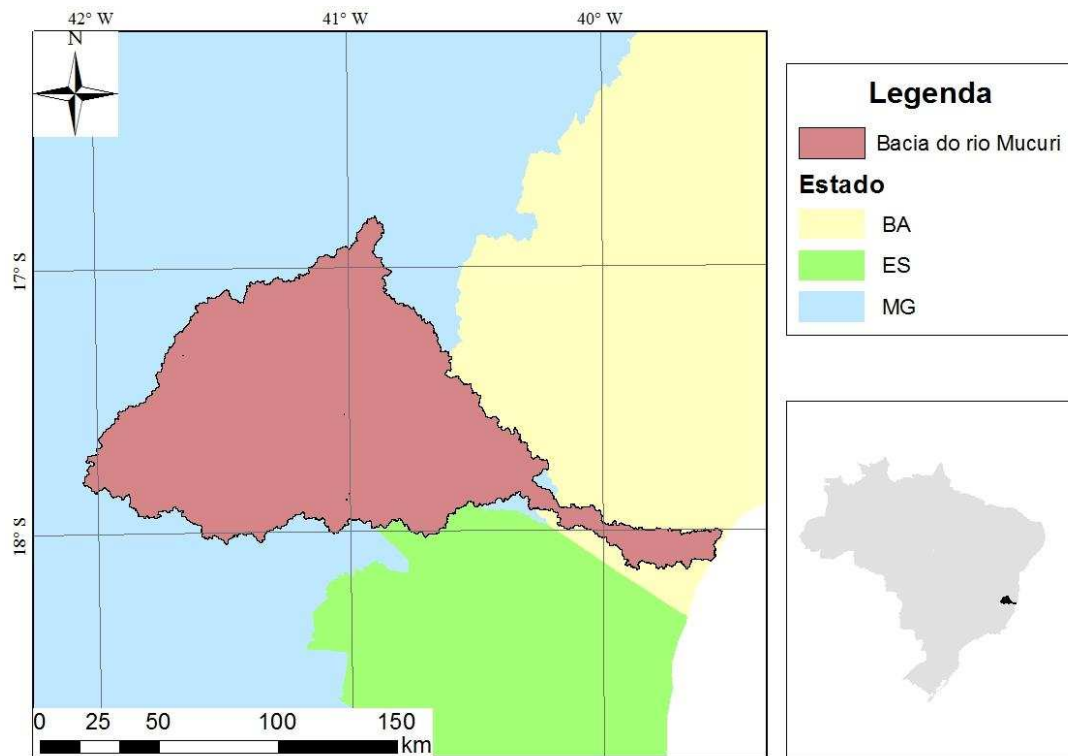


Figura 3.1. Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Mucuri.

3.4.2. SWAT

O SWAT considera quatro volumes de controle para a realização do balanço hídrico, sendo eles: os reservatórios superficial, sub-superficial, subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo (ARNOLD et al., 2008), representado pela Equação 3.1:

$$SW_t = SW_o + \sum(R_i - Q_{sup_i} - ET_i - P_i - QL_i) \quad (3.1)$$

Onde,

SW_t = conteúdo final de água no solo, mm;

SW_o = conteúdo de água disponível no solo inicial, mm;

t = tempo, dias;

R_i = precipitação, mm dia⁻¹;

Q_{sup_i} = escoamento superficial, mm dia⁻¹;

ET_i = evapotranspiração real, mm dia⁻¹;

P_i = percolação da água na camada simulada para a camada inferior, mm dia⁻¹; e

QL_i = escoamento lateral, mm dia⁻¹.

O modelo trabalha com a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias, sendo estas subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), as quais são unidades de combinação única entre os fatores topográfico, de uso e de tipo de solo. Cada HRU foi associada com a base climática, atributos físico-hídricos do solo, águas subterrâneas e vegetação.

A simulação computacional foi realizada com a versão 2012 do SWAT (ARNOLD et al., 2012), por meio da interface com o ARCGIS 10.x, denominada ARCSWAT.

3.4.3. Base de dados utilizada

Os dados de relevo foram obtidos do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), preparado com base nos dados altimétricos derivados do SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), segundo metodologia proposta por Elesbon et al. (2011). Sua distribuição espacial é representada na Figura 3.2.

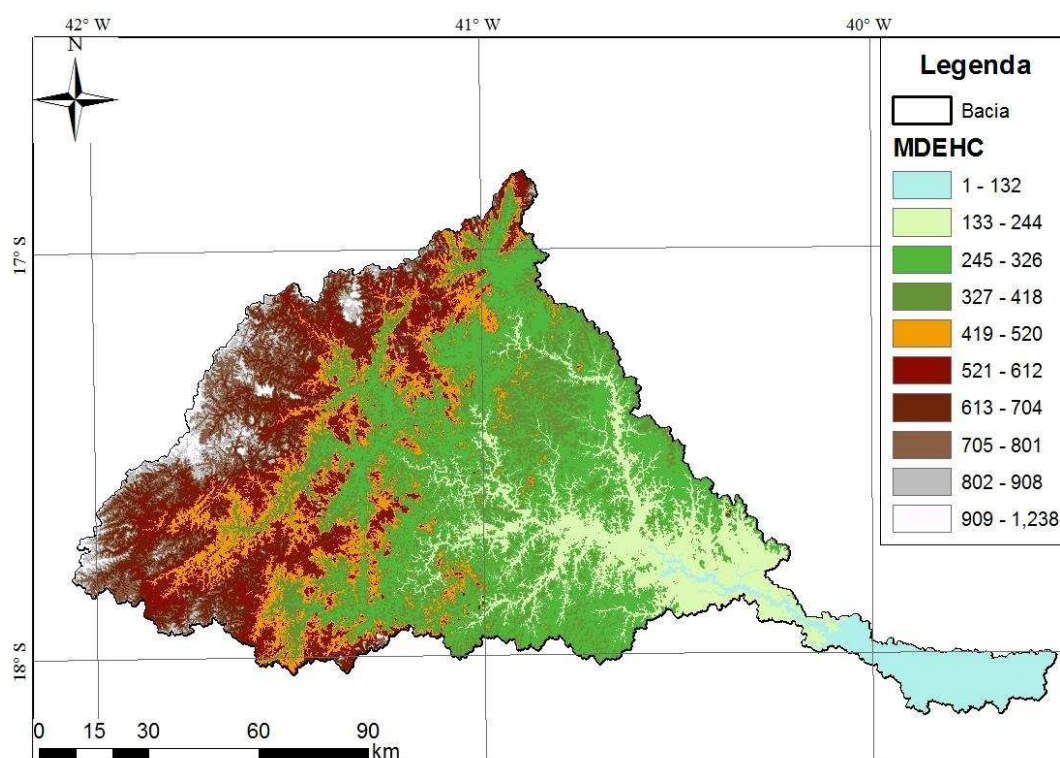


Figura 3.2. Modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado da bacia do rio Mucuri.

O MDEHC apresenta uma variação de 1 a 1.238 metros, sendo as altitudes mais elevadas encontradas nas regiões de cabeceira e as menores junto à foz, conforme

esperado. Para a definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU's), com base no MDEHC, fez-se uso das classes de declividade propostas pela EMBRAPA (1979).

O mapa de solos foi adaptado de estudo realizado pelo Professor Elpídio Inácio Fernandes Filho, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, o qual mapeou toda a bacia do rio Mucuri (Figura 3.3).

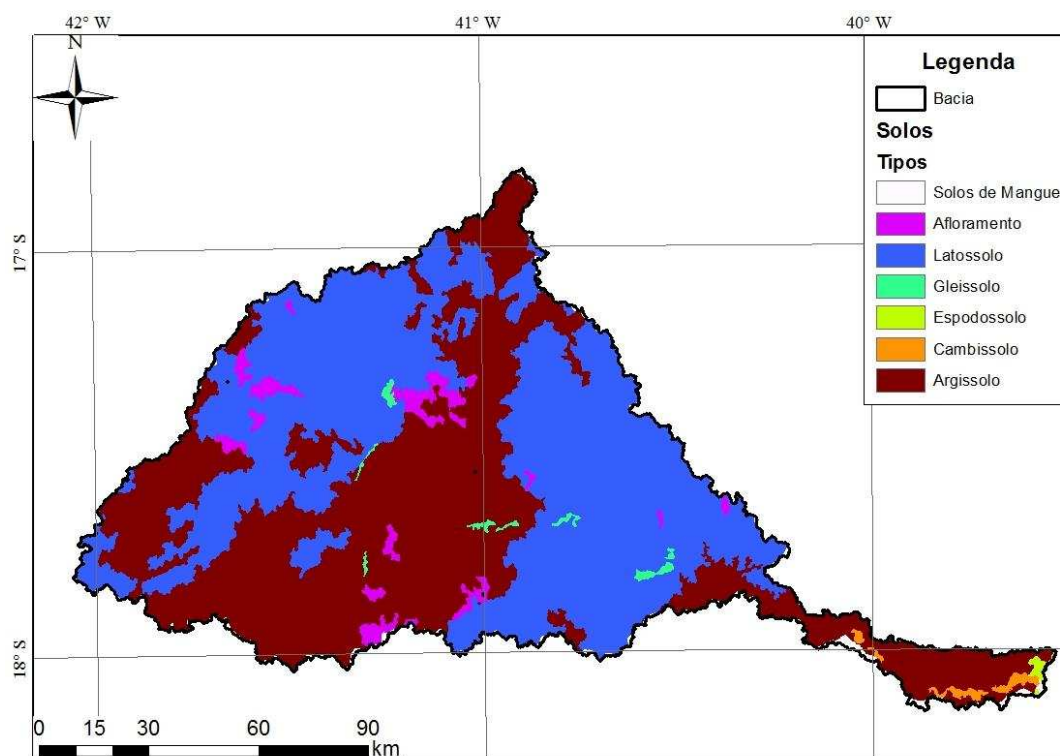


Figura 3.3. Principais tipos de solo da bacia do rio Mucuri.

A bacia apresenta sete classes de solos, sendo eles: Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Argissolos, Solos de mangue, Espodossolos e Afloramento rochosos. Sua distribuição em percentagem de área da bacia está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Distribuição em área dos solos na bacia do rio Mucuri

| Tipo de Solo | Percentagem da área da bacia | Área correspondente (km ²) |
|---------------------|------------------------------|--|
| Latossolo | 50,4 | 7762 |
| Argissolo | 45,6 | 7022 |
| Afloramento rochoso | 2,6 | 400 |
| Cambissolo | 0,5 | 77 |
| Gleissolo | 0,5 | 77 |
| Espodossolo | 0,3 | 46 |
| Solos de Manguê | 0,1 | 16 |

Os atributos físico-hídricos dos solos adviram de estudos prévios realizados em outras bacias hidrográficas (PINTO, 2011; LÉLIS, 2013; OLIVEIRA, 2014). Para o uso da classe Afloramento rochoso o SWAT conta com atributos específicos em sua base, portanto, fez-se uso da base própria para este. Tais parâmetros estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Principais atributos físico-hídricos de entrada no SWAT dos diferentes solos da bacia

| Parâmetros | Cambis ¹ | Gleis ² | Latos ³ | Argis ⁴ | Espodos ⁵ |
|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Camadas | 2 | 1 | 2 | 2 | 5 |
| Grupo Hidrológico | C | D | B | B | C |
| SOL_ZMX | 1500 | 900 | 800 | 800 | 780 |
| ANION_EXCL | 0,6000 | 0,4641 | 0,5500 | 0,5500 | 0,5000 |
| SOL_Z | 350 | 900 | 200 | 200 | 120 |
| SOL_BD | 1,40 | 1,32 | 1,50 | 1,50 | 1,47 |
| SOL_AWC | * | 0,2591 | 0,0170 | 0,0570 | 0,0667 |
| SOL_CBN | 3,37 | 8,00 | 3,45 | 3,07 | 1,89 |
| SOL_K | 2,00 | 2,00 | 12,50 | 12,50 | 32,35 |
| C ⁶ 1 CLAY | 39 | 29 | 33 | 32 | 16 |
| SILT | 6 | 12 | 20 | 30 | 8 |
| SAND | 55 | 59 | 47 | 38 | 76 |
| ROCK | - | - | - | - | 9 |
| SOIL_ALB | 0,2500 | 0,1500 | 0,1510 | 0,1760 | 0,1615 |
| USLE_K | 0,0820 | 0,1300 | 0,1150 | 0,1260 | 0,0961 |
| SOL_Z | 1500 | - | 800 | 800 | 250 |
| SOL_BD | 1,37 | - | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| SOL_AWC | 0,1230 | - | 0,1230 | 0,1510 | 0,1003 |
| SOL_CBN | 0,60 | - | 1,53 | 1,30 | 1,81 |
| SOL_K | 2,00 | - | 12,50 | 12,50 | 6,32 |
| C2 CLAY | 53 | - | 49 | 42 | 29 |
| SILT | 7 | - | 15 | 31 | 13 |
| SAND | 40 | - | 36 | 27 | 58 |
| ROCK | - | - | - | - | 2 |
| SOIL_ALB | 0,2500 | - | 0,3250 | 0,3570 | 0,1727 |
| USLE_K | 0,1030 | - | 0,1240 | 0,1520 | 0,1085 |
| SOL_Z | - | - | - | - | 400 |
| SOL_BD | - | - | - | - | 1,51 |
| SOL_AWC | - | - | - | - | 0,0577 |
| C3 SOL_CBN | - | - | - | - | 2,01 |
| SOL_K | - | - | - | - | 63,20 |
| CLAY | - | - | - | - | 10 |
| SILT | - | - | - | - | 7 |

Continua...

Tabela 3.2. Cont.

| | | | | | | |
|--------|----------|---|---|---|--------|--------|
| C3 | SAND | - | - | - | - | 83 |
| | ROCK | - | - | - | - | 2 |
| | SOIL_ALB | - | - | - | - | 0,1505 |
| | USLE_K | - | - | - | - | 0,0792 |
| C4 | SOL_Z | - | - | - | - | 590 |
| | SOL_BD | - | - | - | - | 1,55 |
| | SOL_AWC | - | - | - | - | 0,0420 |
| | SOL_CBN | - | - | - | - | 0,88 |
| | SOL_K | - | - | - | - | 96,52 |
| | CLAY | - | - | - | - | 6 |
| | SILT | - | - | - | - | 4 |
| | SAND | - | - | - | - | 90 |
| | ROCK | - | - | - | - | 3 |
| | SOIL_ALB | - | - | - | - | 0,3275 |
| USLE_K | - | - | - | - | 0,0717 | |
| C5 | SOL_Z | - | - | - | - | 780 |
| | SOL_BD | - | - | - | - | 1,64 |
| | SOL_AWC | - | - | - | - | 0,1146 |
| | SOL_CBN | - | - | - | - | 0,64 |
| | SOL_K | - | - | - | - | 0,28 |
| | CLAY | - | - | - | - | 47 |
| | SILT | - | - | - | - | 6 |
| | SAND | - | - | - | - | 47 |
| | ROCK | - | - | - | - | 1 |
| | SOIL_ALB | - | - | - | - | 0,3863 |
| USLE_K | - | - | - | - | 0,1016 | |

¹ Cambis: indica solo do tipo Cambissolo; ² Gleis: indica solo do tipo Gleissolo; ³ Latos: indica solo do tipo Latossolo; ⁴ Argis: indica solo do tipo Argissolo; ⁵ Espodos: indica solo do tipo Espodossolo e ⁶ indica camada do solo.

Ressalta-se que, embora presente na bacia, os solos de mangue não são utilizados na simulação em questão, pois se encontram a jusante da última estação fluviométrica. Conforme pode ser observado nas Figuras 3.2 e 3.5.

O mapa de uso do solo da bacia foi obtido por meio de uma classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, com a utilização de 1.800 pixels de amostra de treinamento por classe de uso do solo e filtragem de áreas menores que um hectare, com a utilização de um mosaico de imagens LANDSAT 8, com resolução espacial de 30 metros (Figura 3.4).

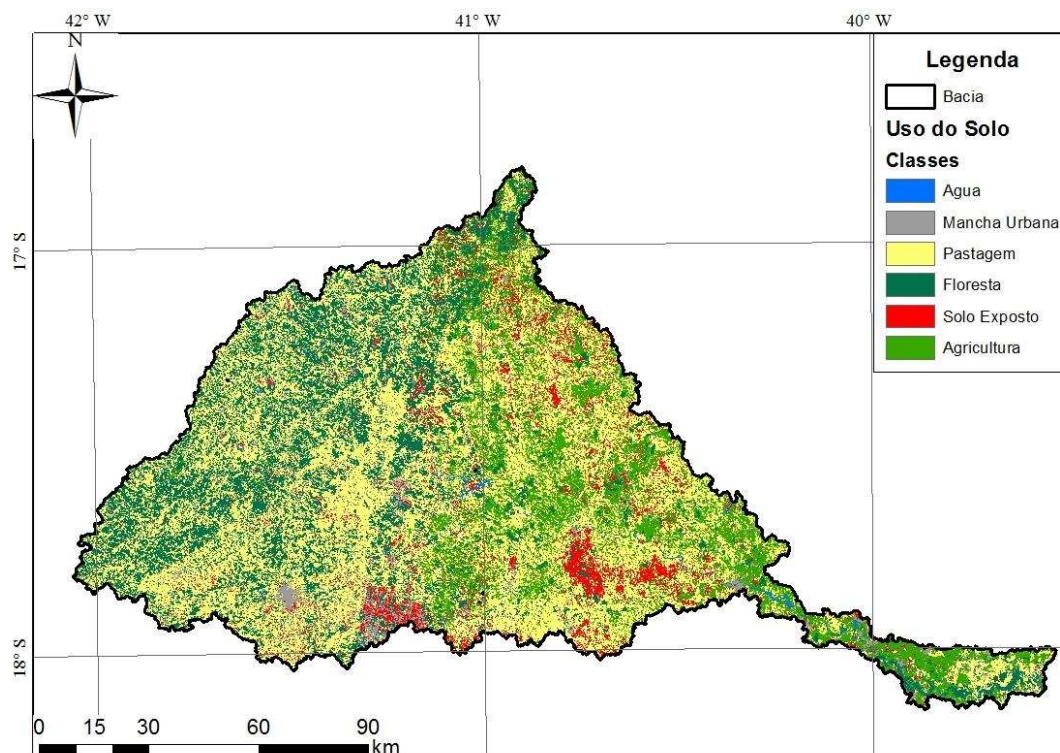


Figura 3.4. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Mucuri.

Na distribuição das classes de uso do solo foi constatado 47,1% da área da bacia para a classe pastagem, 23,2% apresenta-se sobre a classe floresta, 16,1% para a agricultura, 6,7% é de solo exposto, 6,4% para a classe urbana, e, por fim, 0,5% representa a classe água. Todas as classes constam na base de dados do SWAT, e foram atribuídas segundo a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Número da curva (CN) utilizados para diferentes tipos de uso

| Uso do Solo | Base de Dados SWAT | Número da Curva | | | |
|--------------|------------------------------|-----------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Pastagem | PASTURE | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Agricultura | AGRICULTURAL LAND GENERIC | 67 | 77 | 83 | 87 |
| Floresta | FOREST MIXED | 36 | 60 | 73 | 79 |
| Solo Exposto | BARREN | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Área Urbana | RESIDENTIAL | 31 | 59 | 72 | 79 |
| Água | WATER | - | - | - | - |

A entrada de dados meteorológicos para uso do modelo foi obtida consultando-se junto a base de dados do HIDROWEB/ANA e da rede de estações automáticas do INMET. Foram utilizadas oito estações pluviométricas, seis estações fluviométricas e duas meteorológicas, todas com o período que se estendia de 01/01/2007 até 31/12/2014. A distribuição espacial das estações está representada na Figura 3.5.

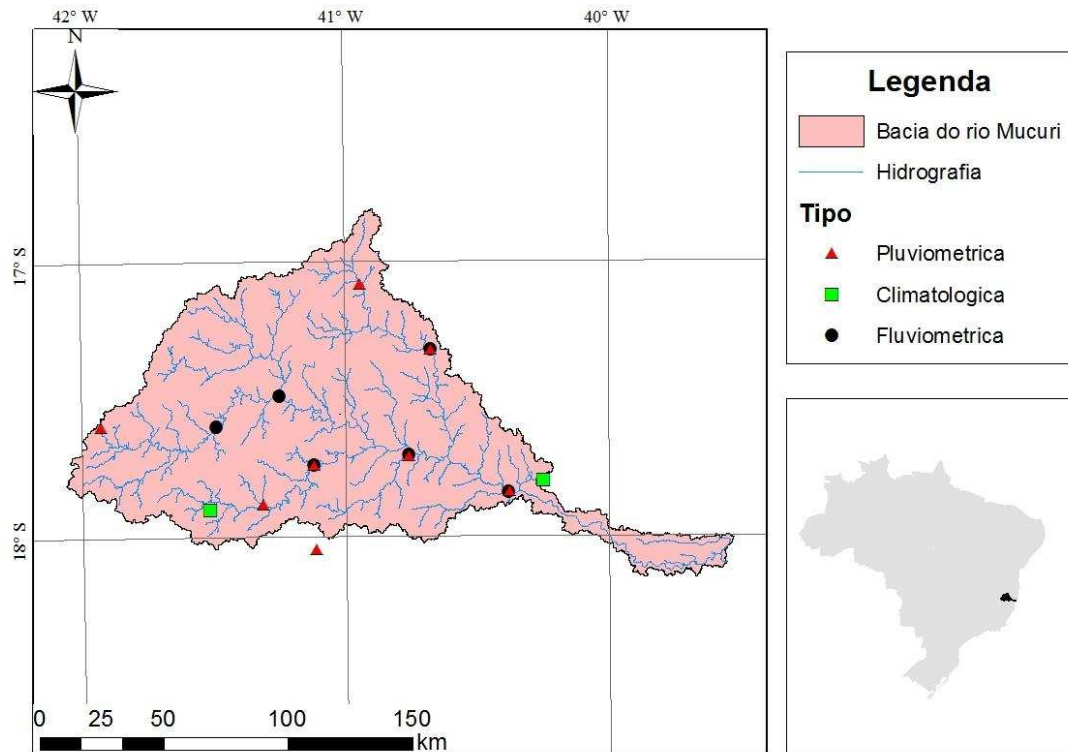


Figura 3.5. Distribuição das estações utilizadas.

Os dados necessários para as estações do tipo meteorológicas foram precipitação (mm), temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-2}$), velocidade do vento (m s^{-1}) e umidade relativa do ar (%). Para as estações pluviométricas faz-se necessária a precipitação (mm), e finalmente para a estação do tipo fluviométrica apenas a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Todas estas apresentam-se em uma base diária. Outras informações importantes para as estações utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Informações das estações utilizadas

| Código | Tipo | Nome | Município | Responsável | Operadora | Latitude | Longitude | Altitude |
|-----------|---------------------|-----------------------|----------------|-------------|-----------|------------|------------|------------------|
| 55630000 | Fluvio ¹ | CARLOS CHAGAS | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17°42'15" | -40°45'42" | 146 |
| 55560000 | Fluvio | FAZENDA DIACUI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17°29'11" | -41°14'55" | 258 ⁴ |
| 55610000 | Fluvio | FRANCISCO SÁ | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17°44'17" | -41°07'15" | 215 |
| 55660000 | Fluvio | SÃO PEDRO DO PAMPÃ | UMBURATIBA | ANA | CPRM | -17°19'14" | -40°40'35" | 200 |
| 55699998 | Fluvio | NANUQUE MONTANTE | NANUQUE | ANA | CPRM | -17°50'31" | -40°22'56" | 92 |
| 55520001 | Fluvio | MUCURI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17°35'46" | -41°29'29" | 336 |
| OMM 86763 | Meteo ² | SERRA DOS AIMORÉS | NANUQUE | INMET | INMET | -17°47'56" | -40°14'60" | 212 |
| OMM 86762 | Meteo | TEÓFILO OTONI | TEÓFILO OTONI | INMET | INMET | -17°53'33" | -40°30'56" | 467 |
| 1740000 | Pluvio ³ | CARLOS CHAGAS | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17°42'20" | -40°45'35" | 146 |
| 1740001 | Pluvio | NANUQUE - MONTANTE | NANUQUE | ANA | CPRM | -17°50'15" | -40°22'38" | 92 |
| 1740026 | Pluvio | SÃO PEDRO DO PAMPÃ | UMBURATIBA | ANA | CPRM | -17°19'14" | -40°40'34" | 182 ⁴ |
| 1740033 | Pluvio | ÁGUAS FORMOSAS | ÁGUAS FORMOSAS | ANA | CPRM | -17°04'57" | -40°56'27" | 252 ⁴ |
| 1741001 | Pluvio | MUCURI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17°35'42" | -41°29'34" | 703 ⁴ |
| 1741007 | Pluvio | PEDRO VERSIANI (EFBM) | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17°52'49" | -41°18'53" | 284 |
| 1741009 | Pluvio | FRANCISCO SÁ (EFBM) | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17°44'19" | -41°07'16" | 204 |
| 1841008 | Pluvio | ATALÉIA | ATALÉIA | ANA | CPRM | -18°02'49" | -41°06'52" | 235 ⁴ |

¹ Fluvio: indica estação do tipo fluviométrica; ² Meteo: Indica estação do tipo meteorológica; e ³ Pluvio: Indica estação do tipo Pluviométrica.

⁴ indica informação obtida pelo MDEHC.

3.4.4. Warm-up, análise de sensibilidade, calibração e validação

Inicialmente definiu-se o período de aquecimento do modelo, denominado “warm-up”, em dois anos (anos 2007 e 2008). Para as fases de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Mucuri fez-se uso do módulo SUFI2, presente no software SWAT-CUP, versão 5.1.6 (ABBASPOUR et al., 2007).

Optou-se por definir os 19 principais parâmetros para a calibração da vazão na bacia. Tais parâmetros foram definidos em função da ocorrência destes entre os principais parâmetros calibráveis para a variável vazão (BLAINSKI et al., 2011; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011; MULETA; NICKLOW, 2005; NETO, et al., 2014; ANDRADE; MELO; BESKOW, 2013; PINTO, 2013).

A partir dos trabalhos desenvolvidos por Pinto et al. (2013) e Pereira et al. (2016), os quais desenvolveram a aplicação do modelo SWAT para bacias que também estão inseridas no Estado de Minas Gerais, definiu-se os parâmetros que seriam utilizados na aplicação do SWAT na bacia do rio Mucuri. Na Tabela 3.5 estão apresentados os parâmetros definidos.

Cabe ressaltar que diversos trabalhos fazem uso destes parâmetros para a configuração inicial do modelo para a variável vazão (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013; NETO et al., 2014). Os parâmetros relacionados a fase sólida da água foram excluídos, pois a bacia em questão se encontra sob influência de domínio tropical e não conta com tais fenômenos.

Ainda, com base na última simulação, apresentou-se um ranking de sensibilidade dos parâmetros definidos por meio da análise dos valores dos índices “t-stat” e “p-value”, conforme metodologia descrita por Singh et al. (2013).

A partir da definição dos parâmetros do modelo, deu-se início a etapa de calibração, partindo de 250 iterações por simulação (ABBASPOUR et al., 2007), até que foi atingido a função objetivo. A função objetivo foi definida como sendo o “coeficiente estatístico de Nash-Suttcliffe”, desenvolvido por Nash e Suttcliffe (1970), optando-se por um valor mínimo de 0,6, no sentido de buscar um bom desempenho sem causar viés ao mesmo.

Tabela 3.5. Parâmetros definidos para a aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Mucuri

| Parâmetro | Significado |
|-----------|--|
| CN2 | Número da curva inicial para a condição de umidade AMCII (adimensional) |
| ALPHA_BF | Constante de recessão do escoamento de base (dias) |
| GW_DELAY | Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias) |
| GWQMN | Nível limite de água no aquífero raso para ocorrência de fluxo de base (mm) |
| CH_K2 | Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm.h^{-1}) |
| SURLAG | Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias) |
| SOL_K | Condutividade hidráulica do solo saturado (mm.h^{-1}) |
| CH_N2 | Coefficiente de Manning para o canal principal ($\text{s.m}^{-0.33}$) |
| ESCO | Fator de compensação de evaporação da água do solo (adimensional) |
| SLSOIL | Comprimento do declive para o fluxo subsuperficial lateral (m) |
| CANMX | Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm) |
| SOL_AWC | Armazenamento de água no solo (mm.mm^{-1}) |
| SOL_Z | Profundidade da camada do solo (mm) |
| GW_REVAP | Coefficiente de ascensão da água à zona de saturação (adimensional) |
| BIOMIX | Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional) |
| SOL_ALB | Albedo do solo (adimensional) |
| REVAPMN | Profundidade limite da água no aquífero para ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm) |
| EPCO | Fator de compensação do consumo de água pelas plantas (adimensional) |
| SLSUBBSN | Comprimento médio da encosta (m) |

A calibração do modelo foi feita para uma estação fluviométrica e a validação realizada nas demais estações da bacia. Tal técnica se justifica na premissa da modelagem, a qual o modelo deve ser capaz de responder a todo o processo hidrológico que ocorre na bacia para as condições de calibração. A estação fluviométrica escolhida para a etapa da calibração foi a Carlos Chagas (55630000), tal escolha se justificou por existir três estações a montante (Mucuri (55520001), Fazenda Diacuí (55560000) e Francisco Sá (55610000)) e uma a jusante (Nanuque Montante (55699998)), e outra totalmente independente (São Pedro do Pampã (55660000)) as quais, embora em uma mesma bacia, podem apresentar características bem diferentes. A Figura 3.6 representa a distribuição espacial das estações fluviométricas.

A estação Nanuque Montante (55699998) contém todas as outras em sua área de drenagem, portanto, escolhida para a validação a jusante. A estação São Pedro do Pampã (55660000) não possui nenhuma área de drenagem em comum com a estação de calibração. Tal fato se torna interessante para visualizar a aplicabilidade do modelo à toda a bacia.

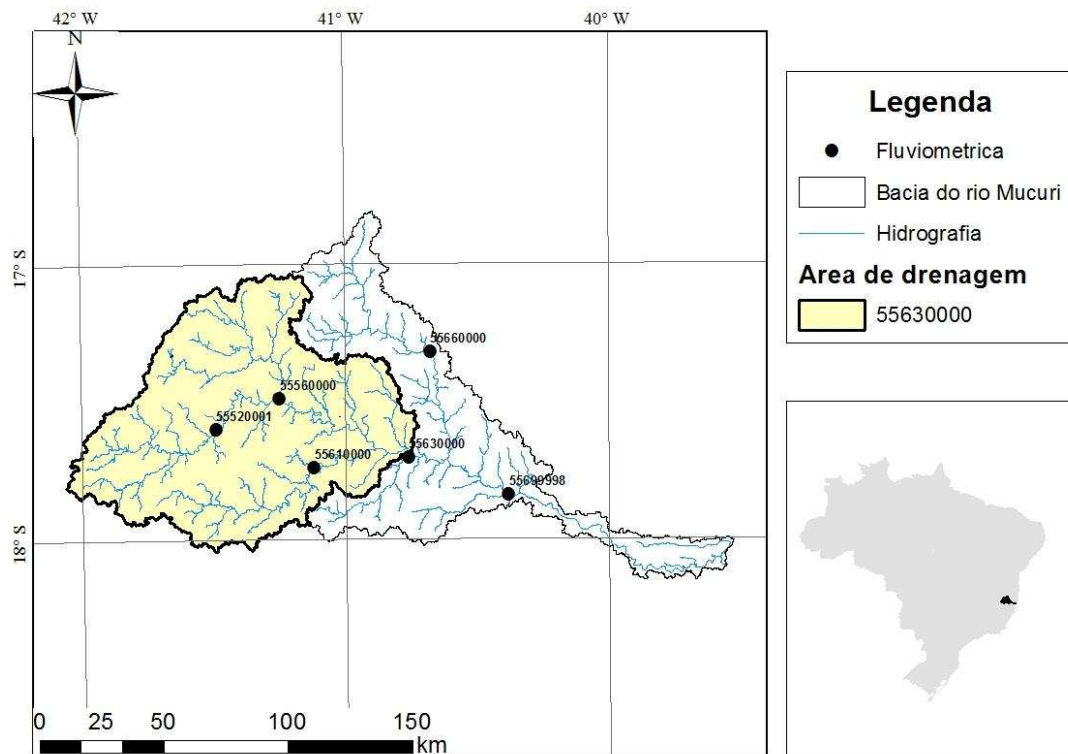


Figura 3.6. Distribuição das estações fluviométricas utilizadas e área de drenagem da estação de calibração.

3.4.5. Análises estatísticas

Para analisar o ajuste dos valores preditos pelo modelo aos dados observados, foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2) e de eficiência Nash-Suttcliffe (E_{NS}), e para avaliar a magnitude do erro foi utilizado o Percentual de Tendência (P_{BIAS}) (ABBASPOUR, 2007). A seguir, são apresentadas as equações para a determinação dos valores de E_{NS} (Equação 3.2), P_{BIAS} (Equação 3.3) e do R^2 (Equação 3.4).

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.2)$$

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} 100 \quad (3.3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2} \quad (3.4)$$

Onde,

O_i = Valores observados;

P_i = valores estimados;

n = número de observações;

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

\bar{P} = média aritmética dos valores estimados.

Moriasi et al. (2007) definiram valores de E_{NS} , P_{BIAS} e R^2 para a avaliação de modelos. Van Liew et al. (2003) e Fernandez et al. (2005) também propuseram alguns limites para a classificação destes índices estatísticos. Na Tabela 3.6 estão apresentados os limites dos índices estatísticos utilizados.

Tabela 3.6. Limites para os índices estatísticos utilizados

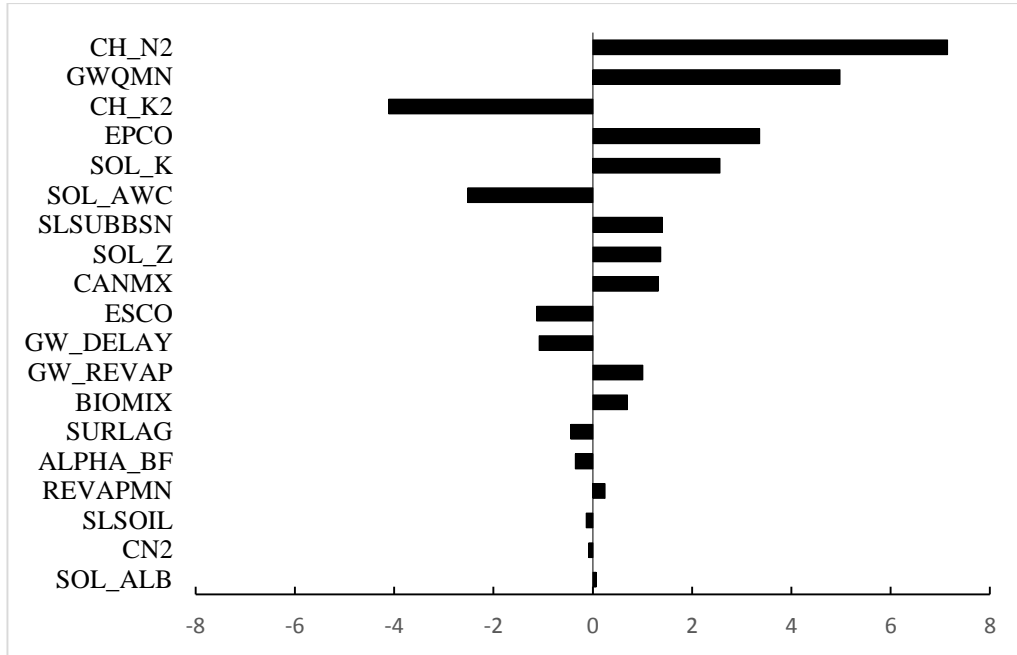
| E_{NS} | P_{BIAS} | R^2 | Classificação |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------|
| $0,75 < E_{NS} \leq 1,00$ | $P_{BIAS} \leq \pm 10$ | $0,75 < R^2 \leq 1,00$ | Muito Bom |
| $0,60 < E_{NS} \leq 0,75$ | $\pm 10 < P_{BIAS} \leq \pm 15$ | $0,60 < R^2 \leq 0,75$ | Bom |
| $0,36 < E_{NS} \leq 0,60$ | $\pm 15 < P_{BIAS} \leq \pm 25$ | $0,50 < R^2 \leq 0,60$ | Satisfatório |
| $0,00 < E_{NS} \leq 0,36$ | $\pm 25 < P_{BIAS} \leq \pm 50$ | $0,25 < R^2 \leq 0,50$ | Ruim |
| $E_{NS} \leq 0,00$ | $\pm 50 \leq P_{BIAS}$ | $R^2 \leq 0,25$ | Inadequado |

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007), Van Liew et al. (2003) e Fernandez et al. (2005).

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da definição dos parâmetros a serem calibrados e a posterior calibração, o SWAT-CUP define por meio da utilização dos métodos combinados Latin Hypercube (LH) e one-factor-a-time (OAT) os parâmetros mais sensíveis a calibração, fazendo uso desta informação para a próxima iteração, se houver. O ranqueamento dos parâmetros, em função dos índices “t-stat” e “p-value”, após cinco simulações com 250 iterações cada, é apresentado na Figura 3.7.

A.



B.

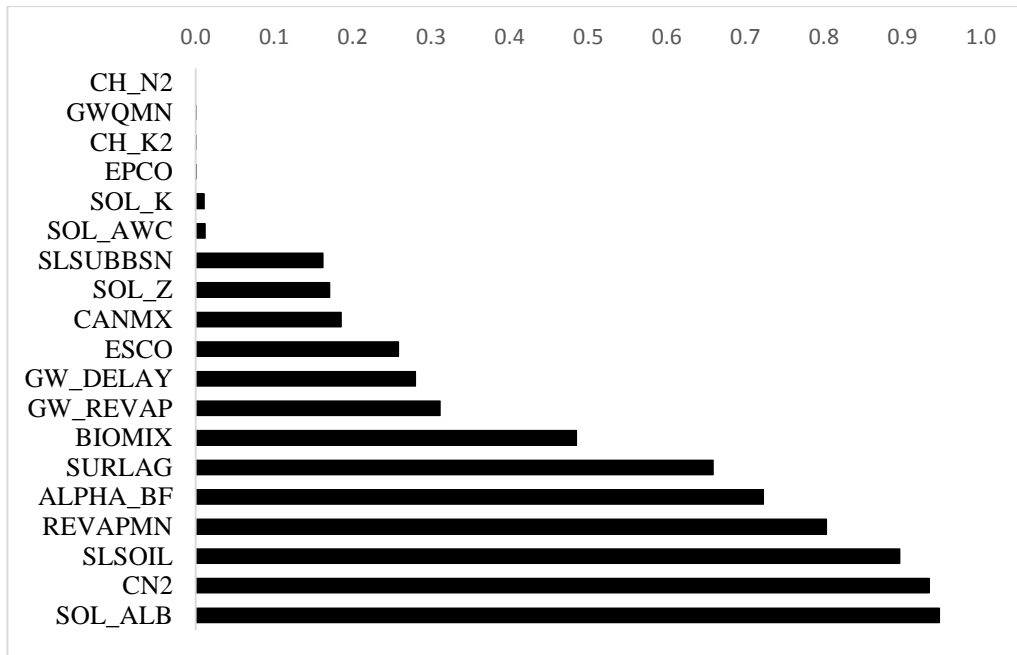


Figura 3.7. Valores dos índices e ranking de sensibilidade dos parâmetros calibrados para a variável vazão no modelo SWAT na bacia do rio Mucuri, sendo: a) “t-stat”; e b) “p-value”.

Observa-se que os parâmetros mais sensíveis na etapa de calibração estão apresentados na parte superior dos rankings, ou seja, pelo maior valor do módulo do índice “t-stat”, que representa a relação do coeficiente do parâmetro pelo erro padrão; e pelo menor valor do “p-value”, que está relacionado com a rejeição da hipótese de que uma adição no valor do parâmetro proporcione um acréscimo significativo na variável resposta (ABBASPOUR, 2007).

Os parâmetros mais sensíveis foram CH_N2, GWQMN, CH_K2, EPCO, SOL_K e SOL_AWC, ordenados em função do maior para o menor grau de sensibilidade, testados ao nível de significância de 5%. Tais parâmetros estão relacionados ao escoamento no canal (CH_N2 e CH_K2), água no solo (GWQMN, SOL_K e SOL_AWC) e ao fator de consumo de água da vegetação (EPCO). É interessante ressaltar que o parâmetro CN2 não apresentou a sensibilidade esperada, uma vez que está relacionado com o escoamento superficial direto, no entanto, se mostrou como um dos menos sensíveis. Tal fato pode estar relacionado com a característica do relevo, sendo este mais plano em grande extensão da bacia; como também pelo solo predominante (Latosolo) possuir grande permeabilidade, e dessa forma, favorecendo a componente relativa a infiltração de água no solo e conseqüentemente, a formação da vazão a partir dos fluxos de base.

Pinto (2011) descreve o fator CH_K2 como um dos mais sensíveis para as características da região de estudo, porém outros parâmetros apresentaram graus de sensibilidade bem discrepantes. Neto et al. (2014) encontraram resultados semelhantes aos de Pinto (2011), porém com o fator GWQMN como um dos mais sensíveis para a região em questão. Tal fato pode ser evidenciado por serem bacias que se encontram mais próximas entre si, ambas na região do Alto rio Grande. Devido à proximidade, encontram-se em regiões com características semelhantes de ocupação do solo, além das topográficas serem próximas (regiões com altas declividades), conseqüentemente, estão submetidas a processos hidrológicos fortemente influenciados pelo escoamento superficial direto.

Outros estudos evidenciaram diversos parâmetros como mais sensíveis para as mais diversas bacias hidrográficas no mundo, tais como: SOL_AWC (SCHMALZ; FOHRER, 2009; LELIS et al., 2012; SANTOSH; KOLLADI; SURIA, 2010), SOL_K (CIBIN; SUDHEER; CHAUBEY, 2010), EPCO (JHA, 2009; JEONG et al., 2010), SOL_K (CIBIN et al., 2010).

Na Tabela 3.7 estão apresentados o método utilizado para a calibração, os limites do intervalo de calibração dos parâmetros e o valor calibrado para cada um dos parâmetros.

Tabela 3.5. Métodos, intervalos de ajustes iniciais e valor calibrado para cada parâmetro

| Parâmetro | Método | Valor mín. inicial | Valor máx. inicial | Valor Calibrado |
|-----------|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| CH_N2 | Absoluto | 0,01 | 0,059 | 0,116929 |
| GWQMN | Absoluto | -500 | 1000 | 1365,775 |
| CH_K2 | Absoluto | 0 | 25 | 8,948516 |
| EPCO | Absoluto | 0 | 1 | -0,16168 |
| SOL_K | Relativo | -0,9 | 0,9 | -0,40892 |
| SOL_AWC | Relativo | -0,25 | 0,25 | -0,21873 |
| SLSUBBSN | Relativo | -0,25 | 0,25 | 0,059871 |
| SOL_Z | Relativo | -0,25 | 0,25 | 0,164637 |
| CANMX | Absoluto | 0 | 10 | 14,94177 |
| ESCO | Absoluto | 0 | 1 | 0,786809 |
| GW_DELAY | Absoluto | 10 | 120 | 82,0119 |
| GW_REVAP | Absoluto | 0,02 | 0,2 | 0,33627 |
| BIOMIX | Absoluto | 0 | 1 | 0,687435 |
| SURLAG | Absoluto | 0,5 | 10 | 1,664087 |
| ALPHA_BF | Relativo | 0 | 0,048 | 0,004285 |
| REVAPMN | Absoluto | -50 | 100 | 40,74179 |
| SLSOIL | Relativo | -0,5 | 0,5 | -0,59382 |
| CN2 | Relativo | -0,3 | 0,3 | -0,65569 |
| SOL_ALB | Relativo | -0,25 | 0,25 | -0,15716 |

O método Absoluto significa que o valor determinado é adicionado ao valor anterior do parâmetro e o Relativo denota que o valor do parâmetro atual é multiplicado pelo valor determinado mais uma unidade. A definição da escolha pelo método, valor mínimo inicial e valor máximo inicial, seguiu recomendações de Pinto (2011), Lélis (2011) e Oliveira (2014).

Após cada simulação o SWAT-CUP sugere novos valores de intervalos, visando sempre a otimização estatística de precisão. Em função dessa característica, o valor calibrado para cada parâmetro pode apresentar-se fora dos intervalos iniciais, pois foram efetuadas cinco simulações. Tais valores calibrados foram ajustados a partir da estação Carlos Chagas (55630000). Os hidrogramas simulados e observados, bem como a precipitação na estação estão apresentados na Figura 3.8.

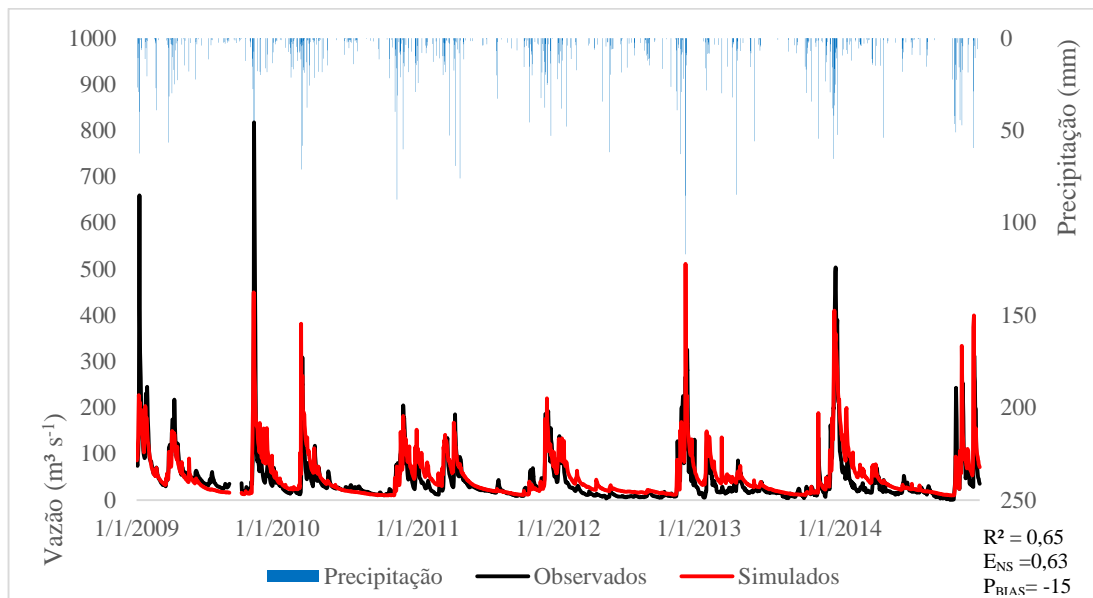


Figura 3.8. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação Carlos Chagas (55630000), utilizada para a calibração do modelo SWAT a montante da seção de calibração.

Pela análise da Figura 3.8, os valores observados e simulados foram próximos, com discrepâncias nas regiões de pico de vazão, as quais o modelo SWAT calibrado para a bacia apresentou grande dificuldade em simular. Ainda há a tendência de superestimativa do modelo na fase de recessão imediatamente após os picos mais altos de vazão, especialmente nos períodos de início de cada ano.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) apresentou o valor de 0,63, sendo considerado Bom, assim como o coeficiente de correlação (R^2), que apresentou o valor de 0,65. Por fim, o percentual de tendência (P_{BIAS}) foi de -15, ou seja, tendência geral de superestimativa da ordem de 15%, valor este que fica próximo ao limite entre a classificação Bom e Satisfatório (Tabela 3.5).

Para a validação do modelo SWAT na bacia do rio Mucuri fez-se uso de outras estações fluviométricas disponíveis. A disposição diária das vazões simuladas e observadas, bem como a precipitação são apresentadas nas sequências.

Para a estação Fazenda Diacui (55560000), Figura 3.9, verificou-se a presença de duas grandes falhas no período de dados, sendo parte do meio do ano de 2009 e final de 2010 até meio de 2011. É uma estação que apresenta valores com vazão média menor que $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, porém existe um pico de $516 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em dezembro de 2013. De maneira geral percebe-se a presença de subestimativa do modelo, principalmente nos grandes picos de vazão, os quais são influenciados hidrológicamente por fenômenos relacionados ao escoamento superficial direto.

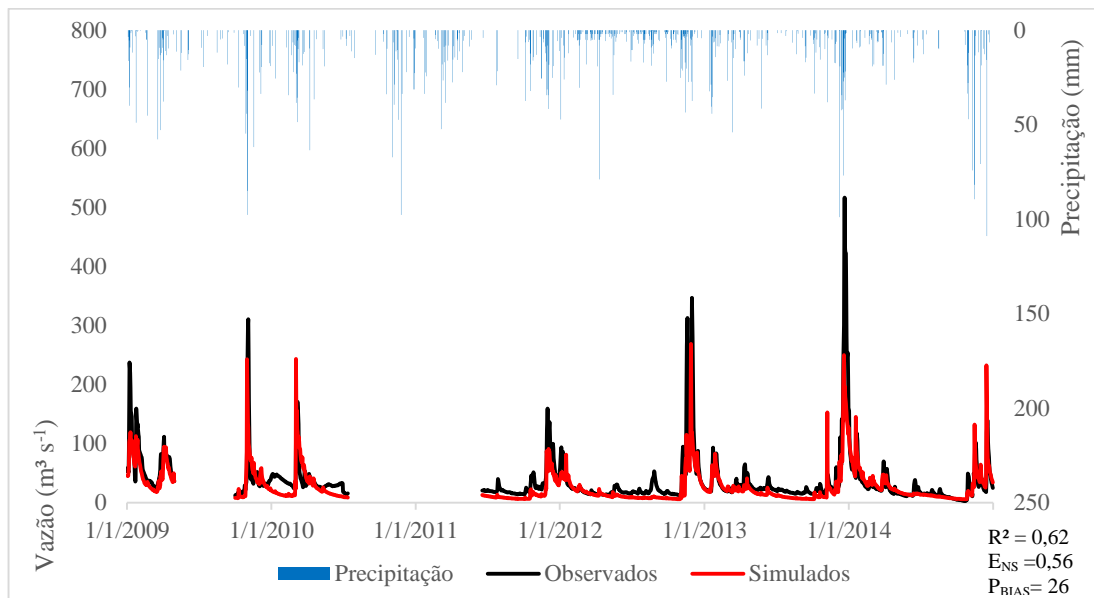


Figura 3.9. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação Fazenda Diacui (55560000) utilizada para a validação do modelo SWAT a montante da seção de validação.

A estação Francisco Sá (Figura 3.10) praticamente não apresentou falhas, com exceção de mês em 2009. O comportamento geral da série simulada foi visualmente superior à da série observada, exceto no evento de pico no final do ano de 2010 e início de 2014. Nota-se que os valores observados na estação foram muito abaixo de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, exceto nos períodos chuvosos.

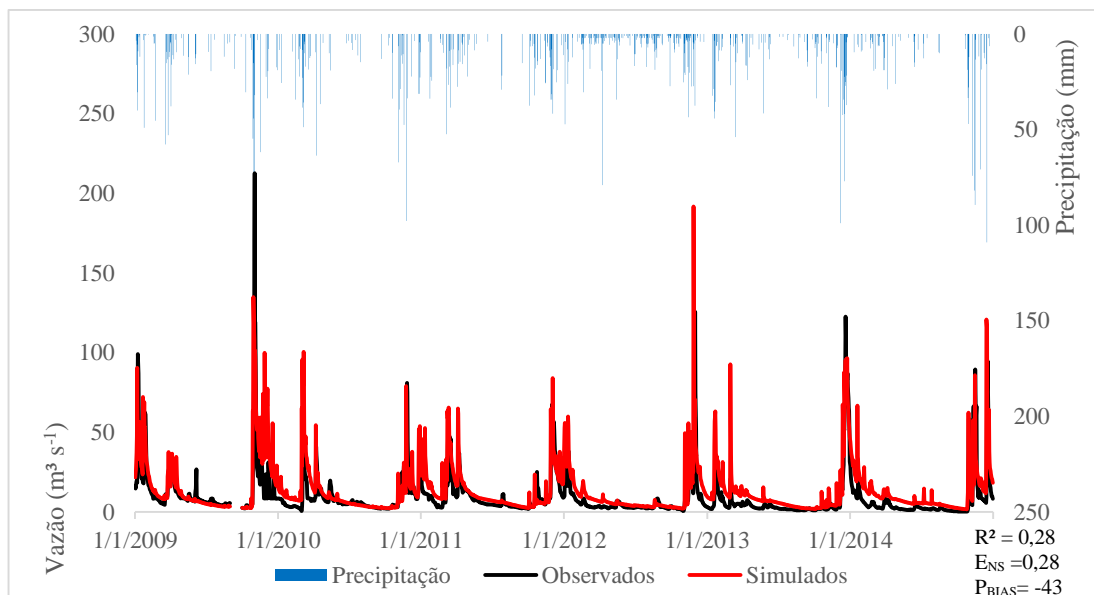


Figura 3.10. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação Francisco Sá (55610000) utilizada para a validação do modelo a montante da seção de validação.

Para a estação de São Pedro do Pampã (55660000), verificou-se que a série simulada se mostrou muito pouco sensível aos picos de vazão (Figura 3.11). O comportamento apresentado se aproxima do comportamento esperado do escoamento de base. Os valores observados na estação foram abaixo de $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na maior parte do tempo, sendo que ultrapassam este limite durante alguns eventos extremos, geralmente associado a chuvas diárias maiores que 50 mm .

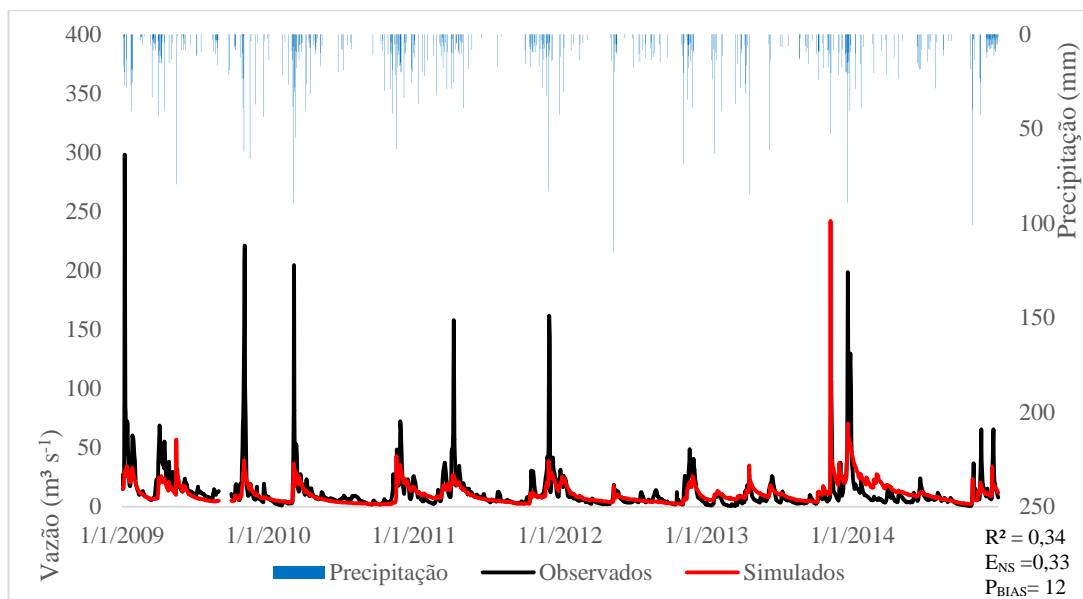


Figura 3.11. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação São Pedro do Pampã (55660000) utilizada para a validação do modelo SWAT a montante da seção de validação.

A estação Nanuque Montante (Figura 3.12) apresentou uma falha no período de novembro de 2009 a março de 2010. O comportamento geral da série simulada foi visualmente acima da série observada, exceto nos eventos de pico. Constata-se que os valores observados na estação foram próximos a média de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com valor máximo observado de $1.226 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A vazão dessa estação foi superior às demais devido ser a estação mais próxima à foz da bacia.

O Hidrograma simulado da estação Mucuri (55520001) apresentou comportamento visivelmente superior ao observado (Figura 3.13). A estação apresenta valores observados menores que $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na maior parte do tempo. Existem na série diversas falhas, sendo uma grande falha em meados do ano de 2009.

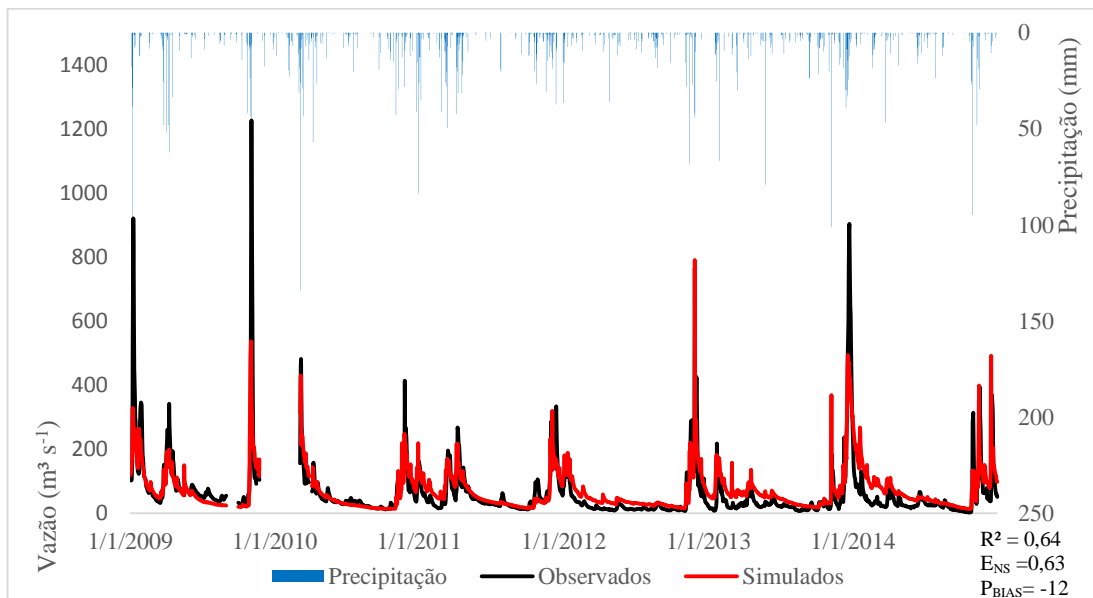


Figura 3.12. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação Nanuque Montante (55699998) utilizada para a validação do modelo SWAT.

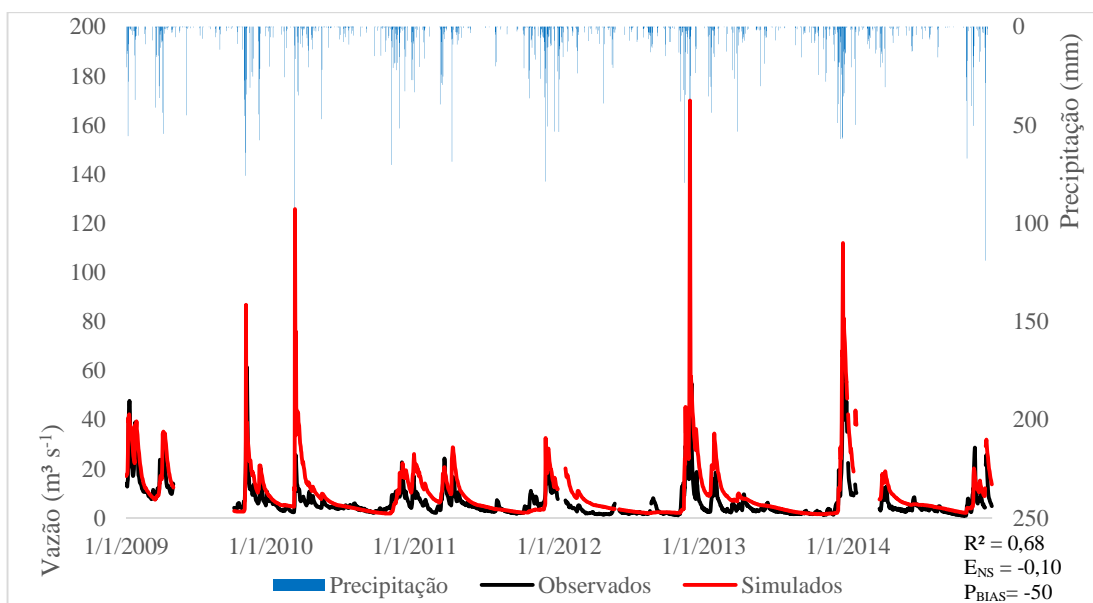


Figura 3.13. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação Mucuri (55520001) utilizada para a validação do modelo SWAT.

Os resultados dos índices estatísticos de precisão (E_{NS} , P_{BIAS} e R^2) para as estações fluviométricas da bacia do rio Mucuri estão apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.6. Índices estatísticos de precisão do ajuste do SWAT para as diversas estações fluviométricas na bacia do rio Mucuri

| Estação | Nome | Fase | E_{NS} | Clas. ¹ | P_{BIAS} | Clas. | R^2 | Clas. |
|----------|--------------------|------------|----------|--------------------|------------|-------|-------|-------|
| 55630000 | Carlos Chagas | Calibração | 0,63 | B ² | -15 | B | 0,65 | B |
| 55560000 | Fazenda Diacui | Validação | 0,56 | S ³ | 26 | R | 0,62 | B |
| 55610000 | Francisco Sá | Validação | 0,28 | R ⁴ | -43 | R | 0,28 | R |
| 55660000 | São Pedro do Pampã | Validação | 0,33 | R | 12 | B | 0,34 | R |
| 55699998 | Nanuque Montante | Validação | 0,63 | B | -12 | B | 0,64 | B |
| 55520001 | Mucuri | Validação | -0,10 | I ⁵ | -50 | I | 0,68 | B |

¹ Classificação; ² Bom; ³ Satisfatório; ⁴ Ruim; ⁵ Inadequado.

Os índices estatísticos de precisão E_{NS} , P_{BIAS} e R^2 para a estação Carlos Chagas (etapa de calibração) classificaram o ajuste como bom.

Na etapa de validação pode-se observar diferentes comportamentos, sendo que de acordo com o índice E_{NS} foi classificado como bom a utilização do modelo na estação Nanuque Montante, satisfatório na estação Fazenda Diacui, ruim nas estações Francisco Sá e São Pedro do Pampã, e inadequado na estação Mucuri. Pelo índice P_{BIAS} a tendência não foi a mesma, visto que nas estações de São Pedro do Pampã e Nanuque Montante a classificação do modelo de acordo com o índice foi bom, nas estações Fazenda Diacui e Francisco Sá foi classificado como ruim e para a estação Mucuri inadequado. Pela análise do R^2 nas estações Fazenda Diacui, Nanuque Montante e Mucuri o modelo foi tido como bom, e as demais como ruim.

Quanto aos resultados dos índices estatísticos, torna-se possível inferir que nas estações Francisco Sá, São Pedro do Pampã e Mucuri o modelo apresentou desempenho inferior basicamente em função de serem estações posicionadas em regiões com o uso e ocupação do solo diferenciados da média da estação de calibração. Na área de drenagem da estação Francisco Sá observa-se uma grande presença de regiões com manchas urbanas e solo exposto, e nas áreas de drenagem das estações de São Pedro do Pampã e Mucuri são regiões com percentagem maiores de usos florestais e de agricultura, respectivamente.

Outro fator que pode estar correlacionado é o relevo, uma vez que as estações Francisco Sá, São Pedro do Pampã e Mucuri estão localizadas em regiões de cabeceira da bacia do Mucuri, conseqüentemente, com altas declividades. Devido a calibração ter ocorrido em uma estação com uma média de relevo menos acidentado os processos hidrológicos predominantes são distintos. As regiões de cabeceira geralmente possuem a formação de vazão predominantemente associada aos componentes do escoamento superficial direto e nas regiões mais a jusante possuem seu processo de formação de vazão predominantemente associado aos componentes do escoamento de base. Esta análise é

confirmada pela baixa sensibilidade dos parâmetros associados ao escoamento superficial direto na fase de análise de sensibilidade do modelo.

3.6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se:

O modelo SWAT apresentou um desempenho classificado como bom na etapa de calibração e na etapa de validação foi adequado na maioria das estações para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri,

O módulo SWAT-CUP foi uma importante ferramenta de análise de sensibilidade, calibração e validação do SWAT.

3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A user manual**. Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology, Zurich, Switzerland, 84p. 2007.

ABBASPOUR, K. C. ROUHOLAHNEJAD, E. VAGHEFI, S. SRINIVASAN, R. YANG, H. KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, **Journal of Hydrology**, v. 524, pp. 733-752. 2015.

AJAMI, N. K.; GUPTA, H.; WAGENER, T.; SOROOSHIAN, S. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of hydrology**, v. 298, p. 112-135, 2004.

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, 2013.

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

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, p.73-89, 1998.

AWAN, U. K.; ISMAEEL, A. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. **Journal of Hydrology**, v. 519, pp. 1368-1382, 2014.

BLAINSKI, E.; SILVIERA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.

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

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.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

ELESBON, A. A. A.; GUEDES, H. A. S.; DA SILVA, D. D.; OLIVEIRA, I. C. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus - Brasil. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 281-288, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10 Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

ERCAN, M. B.; GOODALL, J. L.; CASTRONOVA, A. M.; HUMPHREY, M. BEEKWILDER, N. Calibration of SWAT models using the cloud. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 188-196, 2014.

FERNANDEZ, G. P.; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. Development and testing of watershed-scale models for poorly drained soils. **Transactions of the ASAE**. v.48, n.2, p.639-652, 2005.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH**. IGAM, 2011. 139p.; il. – Resumo executivo volume 1. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planosderecursoshidricos/resumo-executivo-vol-1.pdf>>. Acesso em 02 de fev. de 2015.

JHA, M. Hydrologic Simulations of the Maquoketa River **Watershed Using SWAT**. **Center for Agricultural and Rural Development (CARD)**. Ames, Iowa State University, 2009.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L.; SRINIVASAN, R. Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. **Water Resources Management**, v. 24, n.15, p. 4505-4527, 2010.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

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

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

LI, Q.; CHEN, X.; LUO, Y.; LU, Z.; WANG, Y. A new parallel framework of distributed SWAT calibration. **Journal of Arid Land**, v. 7, n. 1, p. 122-131, 2015.

MAREK, G. W.; GOWDA, P. H.; EVETT, S. R.; BAUMHARDT, L.; BRAUER, D. K.; HOWELL, T. A.; MAREK, T. H.; SRINIVASAN, R. Calibration and validation of SWAT model for predicting daily ET over irrigated crops in Texas high plains using lysimetric data. **Transactions of the ASABE**, v. 59, n. 2, p. 611-622, 2016.

MEAURIO, M.; ZABALETA, A.; URIARTE, J.; SRINIVASAN, R.; ANTIGÜEDAD, I. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 326-334, 2015.

MONTEIRO, J. A. F.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological processes**. V.30, n.1, p. 1419-1430, 2015.

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

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**. v. 306, p. 127-145, 2005.

NASH, J. E.; SUTTCCLIFE, J. E. River flow forecasting through conceptual model: Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. V. 10, n. 3, pp. 282-290. 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SPRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. 2005. **Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2005**. Disponível em: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf>> . Acesso em: 11 de abril de 2015. 530p.

NETO, J. O. M.; SILVA, A. A. da; MELLO, C. R. de; JÚNIOR, A. V. M. Simulação Hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, pp. 177-188, 2014.

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

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

PEREIRA, D. dos R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology**. v. 7, p. 14-37, 2016.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M. da; BESKOW, S.; MELLO, C. R. de; COELHO, G.

Application of the soil and water assessment tool (SWAT) for sediment transport simulation at a headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. **Transactions of the ASABE**, v.56, n.2, p. 697-709, 2013.

SANTOSH, T.; KOLLADI, R.; SURYA, T. Influence of Scale on SWAT Model Calibration for Streamflow in a River Basin in the Humid Tropics. **Water Resources Management**, v. 24, p. 4567-4578, 2010.

SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais: zoneamento e cenários exploratórios**. Lavras: UFLA, 2008.

SINGH, V.; BANKAR, N.; SALUNKHE, S. S.; BERA, A. K.; SHARMA, J. R. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. **Current Science**, v.40, n.9, p.1187-1199, 2013.

SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. **Advanced Geoscience**, n. 21, p.91-98, 2009.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**. v. 10, n. 4, p. 67-76, 2010.

VAN LIEW; M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. **Transactions of the ASAE**. v.46, n.6, p.1539-1551, 2003.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. **ArcSWAT 2.3.4 interface for SWAT2005 - user's guide**, 2009. Disponível em: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf>> . Acesso em: 08 de set. de 2013. 460p.

CAPÍTULO 4

APLICABILIDADE DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUCURI

APLICABILIDADE DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUCURI

4.1.RESUMO

As alterações no uso do solo promovem expressivas mudanças no regime de vazões de um curso d'água, e por meio de modelos hidrológicos torna-se possível o estudo dos impactos causados. Com base neste enfoque, este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT para diferentes cenários de uso do solo e seus respectivos impactos no regime de vazões do rio Mucuri. Posteriormente a calibração e validação do modelo SWAT na bacia, gerou-se o balanço hídrico médio mensal e diário. Foram analisados em relação ao uso atual três cenários de uso do solo, sendo: substituição da área de agricultura pela cultura do eucalipto; substituição da área de floresta nativa pela cultura da cana-de-açúcar; e substituição da pastagem por solo exposto. Com base nos resultados obtidos, conclui-se: o modelo SWAT se mostra adequado para simular a alteração do uso do solo e seu impacto no regime de vazões do rio Mucuri; A substituição de agricultura por eucalipto na bacia propiciou uma diminuição na vazão média e mínimas de referência; As substituições de cobertura florestal por cana-de-açúcar e de pastagem por solo exposto propiciaram um aumento na vazão média e mínimas de referência

Palavras-chave: Cenários de uso do solo, Modelagem hidrológica, Vazões.

4.2. ABSTRACT

SWAT HYDROLOGICAL MODEL APPLICABILITY FOR BASIN RIVER MUCURI

Changes in land use promote significant changes in the flow regime of a stream, and using hydrologic models it is possible the study of the impacts. Based on this approach, this study aimed to evaluate the applicability of SWAT model for different scenarios of land use and their impact on the Mucuri river flow regime. Later calibration and validation of the SWAT model in the basin was generated water balance monthly average and daily. Were analyzed in relation to the current use three scenarios of land use, namely: agriculture area replacing the eucalyptus culture; Replacement of native forest area by the culture of sugarcane; and substitution of pasture with exposed soil. Based on the results obtained concludes: SWAT model is effective displays to simulate the change of land use and its impact on the Mucuri river flow regime; The replacement of agriculture by eucalyptus in the basin led to a decrease in the average and minimum reference flow; Substitutions of forest cover by sugarcane, and pasture for soil exposed provided an increase in the average and minimum reference flow.

Keywords: Scenarios of land use; hydrologic modeling; streamflow.

4.3.INTRODUÇÃO

A intensa e desordenada substituição de paisagens naturais em usos mais intensivos do solo, de modo geral, tem contribuído de maneira expressiva para a deterioração da qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Visando amenizar esse importante impacto ambiental, faz-se necessário o conhecimento dos efeitos da variação da utilização do solo sobre a dinâmica quali-quantitativa dos recursos hídricos. Por meio destes estudos pode-se elaborar políticas públicas que assessorem a tomada de decisão, visando a gestão dos recursos hídricos, bem como incentivos a práticas de conservação do solo e água.

O uso do solo impacta basicamente nos efeitos de partição das componentes do ciclo hidrológico em escoamento superficial e infiltração de água no solo, além da magnitude da evapotranspiração (TUCCI, 2005; MELLO; SILVA, 2013).

O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo semi-distribuído criado para estudar o efeito da gestão do uso do solo em diversos componentes, tais como vazão, sedimentos, pesticidas, nutrientes, dentre outros. Conta com importante interface com os SIG's facilitando a entrada, manipulação e edição de bancos de dados que alimentam o sistema (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013; MONTEIRO et al., 2015).

O SWAT pode operar em escala de tempo diária, mensal e anual além de ser eficiente para simular décadas, sendo um modelo utilizado para predizer o comportamento da bacia hidrográfica a longo prazo, não sendo capaz de simular eventos isolados, como intensidade e duração da precipitação e propagação de um evento de cheia (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2005; WINCHELL et al., 2009).

Os dados de entrada do modelo tratam-se do principal empecilho para as condições brasileiras, visto que o sistema de aquisição de dados se encontra defasado, com falhas e em menor quantidade do que se deveria ter para uma modelagem mais confiável. Tais fatores contribuem para a ineficiência da aplicação de diversos modelos mais complexos e precisos nas bacias hidrográficas brasileiras.

O SWAT estabelece uma sequência básica de dados para seu funcionamento que são as etapas de análise de sensibilidade, calibração dos parâmetros do modelo, validação dos parâmetros e posteriormente, se o modelo obtiver um desempenho satisfatório, torna-

se possível realizar simulações do processo hidrológico de acordo com variações diversas (NEITSCH et al., 2005).

As vantagens da modelagem hidrológica são várias, desde questões referentes ao planejamento e gestão dos recursos hídricos até segurança pública em eventos extremos, tais como enchentes ou seca. Nesse contexto, estudos relacionados com a modelagem hidrológica tornam-se convenientes para as diversas condições edafoclimáticas brasileiras, no entanto, é necessário uma base de dados consistente (ABBASPOUR et al., 2015; MEAURIO et al., 2015; AWAN; ISMAEEL, 2014).

A simulação de diferentes usos do solo tem sido estudada intensamente, visando a análise do impacto da variação destes no regime de vazões nos cursos d'água, bem como o impacto em todo o sistema que rege o ciclo hidrológico (BLAINSKI et al., 2011; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011; BESKOW et al., 2011). Pereira et al. (2014), aplicando o modelo SWAT em escala diária numa bacia hidrográfica do estado do Espírito Santo, constataram que o modelo atendeu satisfatoriamente a modelagem das vazões mínimas diárias anuais e nas vazões mínimas de referência Q_{90} e Q_{95} , porém não se mostrou adequado para as vazões máximas diárias anuais.

O SWAT tem se mostrado eficiente para avaliar os impactos da mudança da cobertura do solo e variação do clima em diversas bacias ao longo do planeta, bem como fornecido informações de suporte a análises para a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos (DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011; PINTO, 2011).

Com base neste enfoque, este estudo teve por objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT para diversas condições de uso do solo e seus respectivos impactos no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Mucuri.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mucuri (Figura 4.1) está inserida na bacia do Atlântico Leste, estendendo-se por 17 municípios, sendo que destes, 13 são mineiros (95% da área da bacia) e outros quatro capixabas e baianos. Compõe uma área de cerca de 15.400 km², com uma população de aproximadamente 450.000 habitantes. Faz divisa com as bacias dos rios Jequitinhonha, Peruíbe, São Mateus e Doce. Possui vasta atividade mineradora, principalmente na cidade de Teófilo Otoni, além das atividades de agricultura, pecuária e reflorestamento (IGAM, 2011).

O clima no vale do Mucuri é caracterizado como um clima tropical quente semiúmido do tipo Aw, segundo classificação Koppen (KOTTEK et al., 2006). Pela classificação proposta pelo Zoneamento Ecológico do Estado de Minas Gerais (ZEE-MG) o clima pode ser denominado como sub-úmido seco (C1), com intervalo do índice de umidade variando de -33,3 a 0, precipitação anual variando de 850 a 1.100 mm e temperaturas médias anuais entre 21 e 28°C (SCOLFORO et al., 2008).

O rio Mucuri estende-se por 346 km desde suas nascentes até o limite com o Estado da Bahia, daí até a sua foz, no Oceano Atlântico, possui aproximadamente 100 km, totalizando 446 km em toda sua extensão e largura média de 45 metros. Os principais afluentes do rio Mucuri são: os rios Todos os Santos, Pampã, Marambaia e Negro (IGAM, 2011).

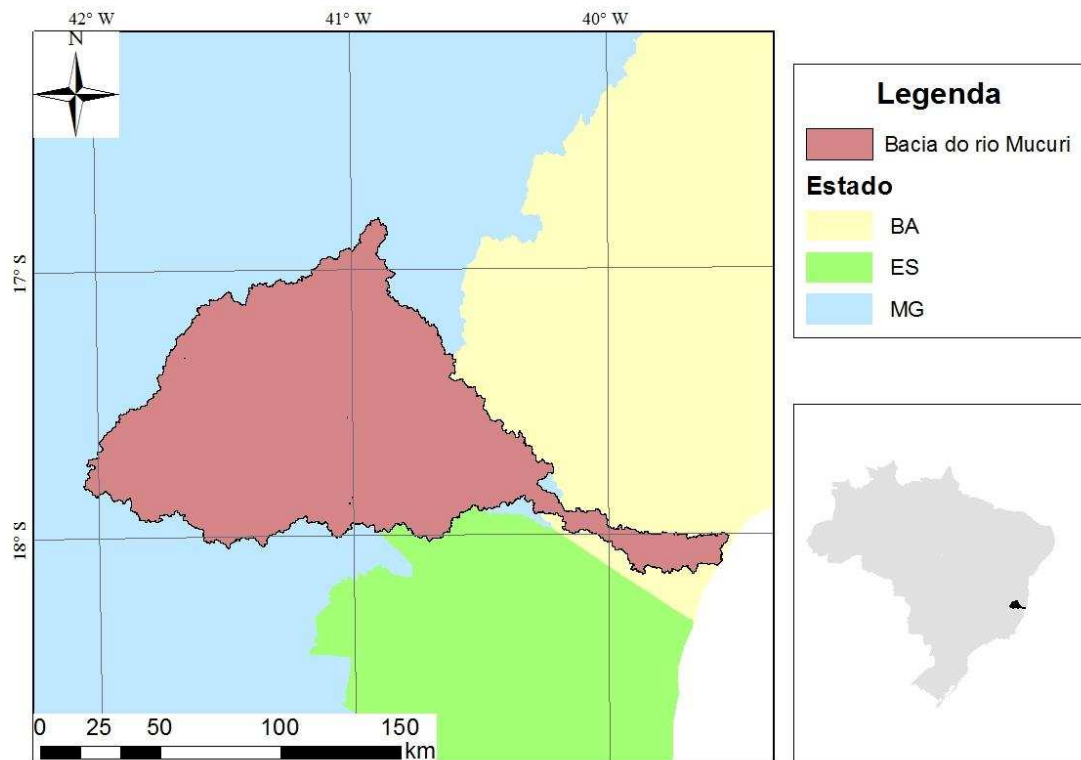


Figura 4.1. Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Mucuri.

4.4.2. SWAT

O SWAT considera quatro volumes de controle para a realização do balanço hídrico: superficial, sub-superficial, subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo. A Equação 4.1 representa o balanço hídrico.

$$SW_t = SW_o + \sum(R_i - Q_{sup_i} - ET_i - P_i - QL_i) \quad (4.1)$$

Onde,

SW_t = conteúdo final de água no solo, mm;

SW_o = conteúdo disponível de água no solo inicial, mm;

t = tempo, dias;

R_i = precipitação, mm dia⁻¹;

Q_{sup_i} = escoamento superficial, mm dia⁻¹;

ET_i = evapotranspiração real, mm dia⁻¹;

P_i = percolação da água na camada simulada para a camada inferior, mm dia⁻¹; e

QL_i = escoamento lateral, mm dia⁻¹.

O modelo SWAT ainda trabalha com a subdivisão da bacia em sub-bacias, sendo essas subdivididas em Unidades Hidrológicas de Resposta (HRU's), as quais são unidades de combinação única entre os fatores topográfico, de uso e de tipo de solo. Cada HRU foi associada com a base climática, atributos físico-hídricos do solo, águas subterrâneas e vegetação.

A simulação computacional foi realizada com a versão 2012 do SWAT (ARNOLD et al., 2012), por meio da interface com o ARCGIS 10.x, denominada ARCSWAT.

4.4.3. Base de dados utilizada na simulação

Os dados de relevo foram obtidos pelo Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) preparado com base nos dados altimétricos derivados do SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), segundo metodologia proposta por Elesbon et al. (2011). Sua distribuição espacial é representada na Figura 4.2, com elevações variando de 1 m (região da foz) a 1.238 m (região de cabeceira).

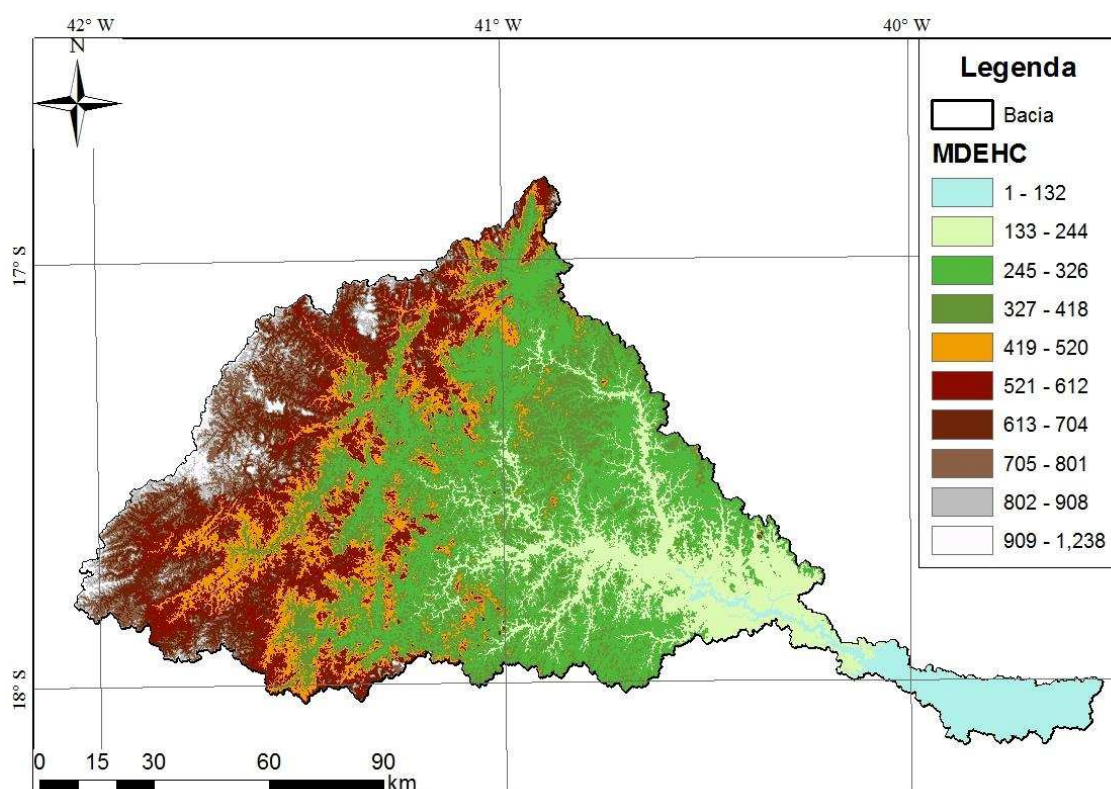


Figura 4.2. Modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC) da bacia do rio Mucuri.

Para a delimitação das Unidades de respostas hidrológicas (HRU's), obtida com base no MDEHC, fez-se uso das classes de declividade proposta pela EMBRAPA (1979).

O mapa de solos foi adaptado do estudo realizado pelo Professor Elpídio Inácio Fernandes Filho, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, o qual mapeou toda a bacia do rio Mucuri (Figura 4.3), apresentando sete tipos principais de solos, sendo: Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Argissolos, Solos de mangue, Espodossolos e Afloramento rochosos. Sua distribuição percentual está apresentada na Tabela 4.1.

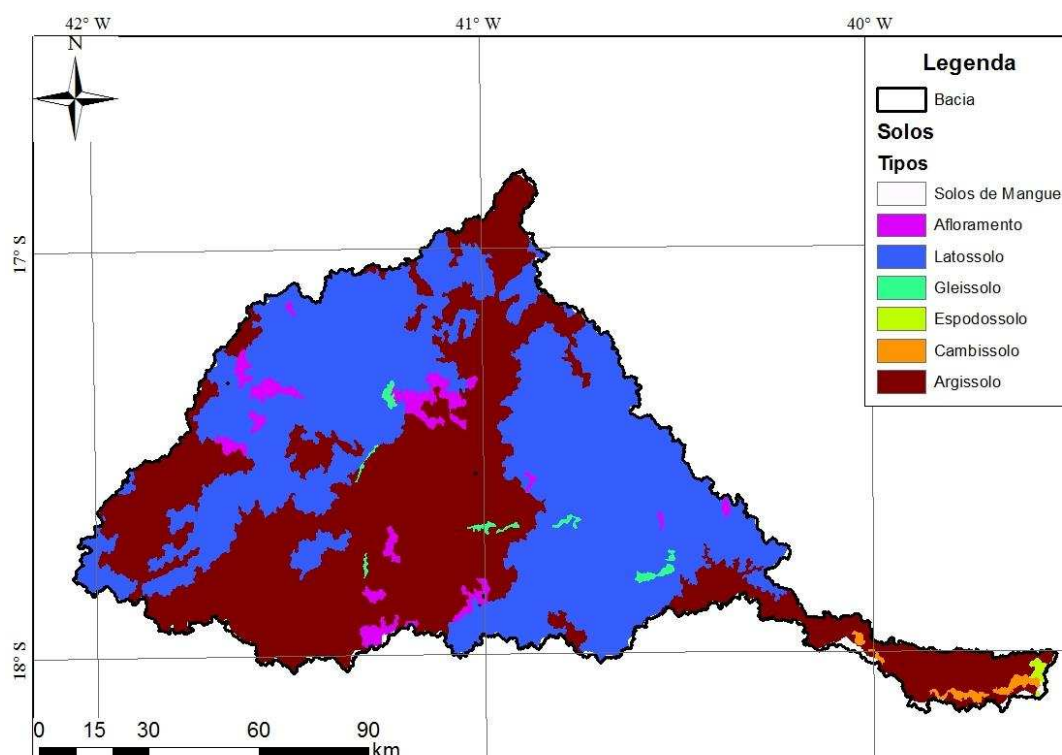


Figura 4.3. Principais tipos de solo da bacia do rio Mucuri.

Tabela 4.1. Relação percentual do tipo de solo com a área da bacia do rio Mucuri

| Tipo de Solo | Relação com a área da bacia (%) |
|---------------------|---------------------------------|
| Latossolo | 50,4 |
| Argissolo | 45,6 |
| Afloramento rochoso | 2,6 |
| Cambissolo | 0,5 |
| Gleissolo | 0,5 |
| Espodossolo | 0,3 |
| Solos de Mangue | 0,1 |

Os atributos físico-hídricos necessários ao modelo adviram de estudos prévios, em outras bacias hidrográficas (PINTO, 2011; LÉLIS, 2011; OLIVEIRA, 2014).

O mapa de uso do solo da bacia do rio Mucuri foi obtido por meio de classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, a partir da utilização de um mosaico de imagens LANDSAT 8, com resolução espacial de 30 m (Figura 4.4). Na Tabela 4.2 tem-se a distribuição percentual do uso do solo.

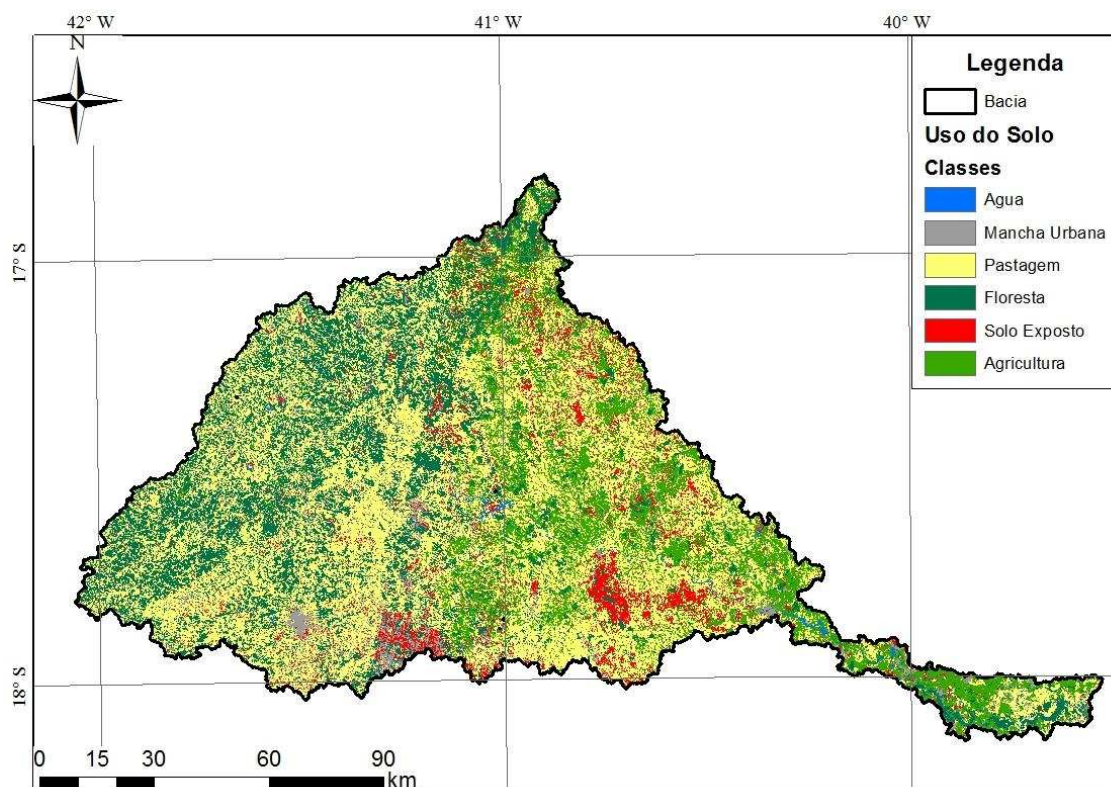


Figura 4.4. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Mucuri.

Tabela 4.2. Relação percentual do uso do solo com a área da bacia do rio Mucuri

| Uso do Solo | Relação com a área da bacia (%) |
|---------------|---------------------------------|
| Pastagem | 47,1 |
| Floresta | 23,2 |
| Agricultura | 16,1 |
| Solo exposto | 6,7 |
| Mancha urbana | 6,4 |
| Água | 0,5 |

A entrada de dados climáticos para o modelo foi obtida por meio da consulta junto a base de dados HIDROWEB/ANA e da rede de estações automáticas do INMET. Foram utilizadas oito estações pluviométricas, seis estações fluviométricas e duas meteorológicas, todas com o período base de 01/01/2007 a 31/12/2014. A distribuição espacial das estações está representada na Figura 4.5.

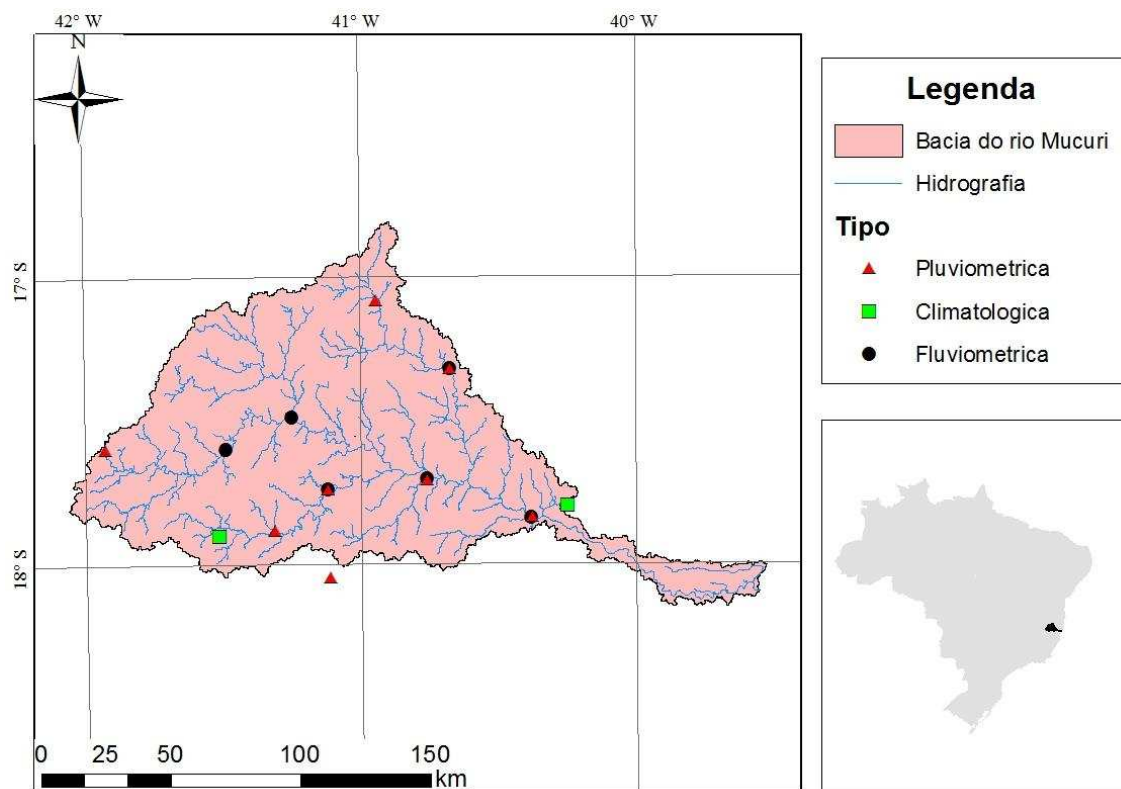


Figura 4.5. Distribuição espacial das estações utilizadas na bacia hidrográfica do rio Mucuri.

Os dados foram utilizados em uma base diária, sendo necessários para as estações meteorológicas os dados de: precipitação (mm), temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-2}$), velocidade do vento (m s^{-1}) e umidade relativa do ar (%), além dos dados de precipitação (mm) e vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) das estações pluviométricas e fluviométricas, respectivamente. Outras informações importantes para as estações utilizadas estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Informações das estações utilizadas

| Código | Tipo | Nome | Município | Responsável | Operadora | Latitude | Longitude | Altitude |
|-----------|---------------------|-----------------------|----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 55630000 | Fluvio ¹ | CARLOS CHAGAS | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17:42:15 | -40:45:42 | 146 |
| 55560000 | Fluvio | FAZENDA DIACUI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17:29:11 | -41:14:55 | 258 ⁴ |
| 55610000 | Fluvio | FRANCISCO SÁ | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17:44:17 | -41:7:15 | 215 |
| 55660000 | Fluvio | SÃO PEDRO DO PAMPÃ | UMBURATIBA | ANA | CPRM | -17:19:14 | -40:40:35 | 200 |
| 55699998 | Fluvio | NANUQUE MONTANTE | NANUQUE | ANA | CPRM | -17:50:31 | -40:22:56 | 92 |
| 55520001 | Fluvio | MUCURI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17:35:46 | -41:29:29 | 336 |
| OMM 86763 | Meteo ² | SERRA DOS AIMORÉS | NANUQUE | INMET | INMET | -17:47:56 | -40:14:60 | 212 |
| OMM 86762 | Meteo | TEÓFILO OTONI | TEÓFILO OTONI | INMET | INMET | -17:53:33 | -40:30:56 | 467 |
| 1740000 | Pluvio ³ | CARLOS CHAGAS | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17:42:20 | -40:45:35 | 146 |
| 1740001 | Pluvio | NANUQUE - MONTANTE | NANUQUE | ANA | CPRM | -17:50:15 | -40:22:38 | 92 |
| 1740026 | Pluvio | SÃO PEDRO DO PAMPÃ | UMBURATIBA | ANA | CPRM | -17:19:14 | -40:40:34 | 182 ⁴ |
| 1740033 | Pluvio | ÁGUAS FORMOSAS | ÁGUAS FORMOSAS | ANA | CPRM | -17:04:57 | -40:56:27 | 252 ⁴ |
| 1741001 | Pluvio | MUCURI | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17:35:42 | -41:29:34 | 703 ⁴ |
| 1741007 | Pluvio | PEDRO VERSIANI (EFBM) | TEÓFILO OTONI | ANA | CPRM | -17:52:49 | -41:18:53 | 284 |
| 1741009 | Pluvio | FRANCISCO SÁ (EFBM) | CARLOS CHAGAS | ANA | CPRM | -17:44:19 | -41:07:16 | 204 |
| 1841008 | Pluvio | ATALÉIA | ATALÉIA | ANA | CPRM | -18:02:49 | -41:06:52 | 235 ⁴ |

¹ Fluvio: indica estação do tipo pluviométrica; ² Meteo: Indica estação do tipo meteorológica; e ³ Pluvio: Indica estação do tipo Pluviométrica.

⁴ indica informação obtida pelo MDEHC.

4.4.4. Análise de sensibilidade, calibração e validação

Nas etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Mucuri fez-se uso do módulo SUFI2, presente no software SWAT-CUP, versão 5.1.6 (ABBASPOUR et al., 2007).

Optou-se por definir 19 principais parâmetros para a calibração da vazão na bacia, definidos em função da ocorrência dos parâmetros calibráveis para a variável vazão (BLAINSKI et al., 2011; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011; MULETA; NICKLOW, 2005; NETO et al., 2014; ANDRADE; MELO; BESKOW, 2013; PINTO et al., 2013).

A partir da definição dos parâmetros deu-se início a etapa de calibração, partindo de 250 iterações por simulação, até que atingisse a função objetivo (ABBASPOUR, 2007). A função objetivo foi definida como sendo o coeficiente estatístico de Nash-Suttcliffe (NASH; SUTTCLIFE, 1970), optando pelo valor 0,6 como sendo adequado segundo Moriasi et al. (2007).

Para a calibração torna-se importante o ranqueamento dos parâmetros da análise de sensibilidade, a definição pelo método de iteração e dos intervalos de calibração, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Ranking da análise de sensibilidade, métodos, intervalos de ajustes iniciais e valor calibrado para o parâmetro

| Parâmetro | Ranking | Método | Valor mín. inicial | Valor máx. inicial | Valor calibrado |
|-----------|---------|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| CH_N2 | 1 | Absoluto | 0,01 | 0,059 | 0,116929 |
| GWQMN | 2 | Absoluto | -500 | 1000 | 1365,775 |
| CH_K2 | 3 | Absoluto | 0 | 25 | 8,948516 |
| EPCO | 4 | Absoluto | 0 | 1 | -0,16168 |
| SOL_K | 5 | Relativo | -0,9 | 0,9 | -0,40892 |
| SOL_AWC | 6 | Relativo | -0,25 | 0,25 | -0,21873 |
| SLSUBBSN | 7 | Relativo | -0,25 | 0,25 | 0,059871 |
| SOL_Z | 8 | Relativo | -0,25 | 0,25 | 0,164637 |
| CANMX | 9 | Absoluto | 0 | 10 | 14,94177 |
| ESCO | 10 | Absoluto | 0 | 1 | 0,786809 |
| GW_DELAY | 11 | Absoluto | 10 | 120 | 82,0119 |
| GW_REVAP | 12 | Absoluto | 0,02 | 0,2 | 0,33627 |
| BIOMIX | 13 | Absoluto | 0 | 1 | 0,687435 |
| SURLAG | 14 | Absoluto | 0,5 | 10 | 1,664087 |
| ALPHA_BF | 15 | Relativo | 0 | 0,048 | 0,004285 |
| REVAPMN | 16 | Absoluto | -50 | 100 | 40,74179 |
| SLSOIL | 17 | Relativo | -0,5 | 0,5 | -0,59382 |
| CN2 | 18 | Relativo | -0,3 | 0,3 | -0,65569 |
| SOL_ALB | 19 | Relativo | -0,25 | 0,25 | -0,15716 |

A definição da escolha pelo método, do valor inicial mínimo e do valor inicial máximo adveio de outros trabalhos (PINTO, 2011; LÉLIS, 2011; OLIVEIRA, 2014). Cabe frisar que após cada iteração, o SWAT-CUP sugere novos valores de intervalos, visando sempre a otimização da função objetivo. Em função dessa característica o valor calibrado do parâmetro pode apresentar-se fora do intervalo inicial mínimo e máximo.

Neste trabalho optou-se por calibrar em uma estação fluviométrica e realizar a validação nas demais estações da bacia. Tal técnica se justifica na premissa da modelagem, devido o fato que o modelo deve ser capaz de responder a todo o processo hidrológico que ocorre na bacia para as condições de calibração.

A Figura 4.6 representa a distribuição espacial das estações fluviométricas e a área de drenagem da estação de calibração. O índice de eficiência de Nash-Suttcliffe da estação Carlos Chagas (55630000), com área de drenagem de 9.160 km², foi de 0,63, classificado como bom, segundo Moriasi et al. (2007), Van Liew et al. (2003) e Fernandez et al. (2005).

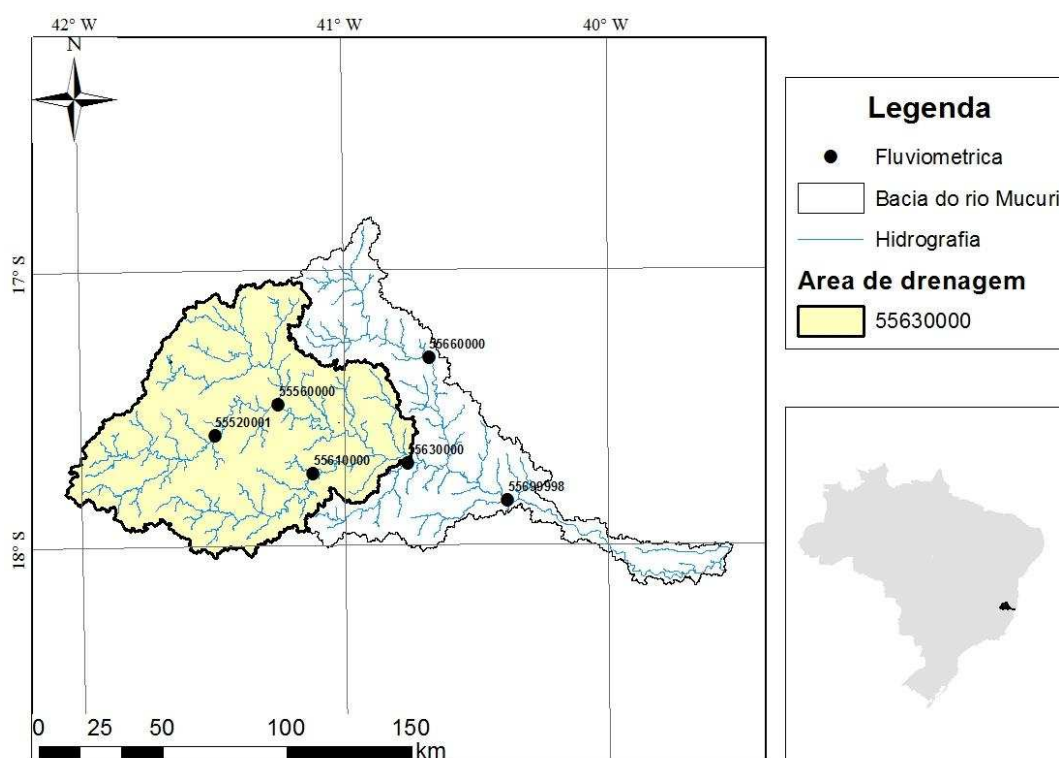


Figura 4.6. Distribuição das estações fluviométricas utilizadas e área de drenagem da estação utilizada para a calibração.

4.4.5. Aplicabilidade do modelo na bacia

Para avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Mucuri foi gerado o balanço hídrico médio mensal e diário no período analisado. Na

elaboração do balanço hídrico levou-se em consideração a precipitação, a evapotranspiração real e potencial, o escoamento superficial, o escoamento de base e a produção de água na bacia. Ainda, visando a aplicabilidade do modelo na bacia, buscou-se a proposição de cenários alternativos do uso do solo e a obtenção de seus impactos no regime de vazões da bacia. Os cenários propostos buscaram simular os extremos possíveis de tendências de modificação do uso do solo, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Cenários proposto de mudança do uso do solo

| Alteração no uso do solo | |
|--------------------------|---|
| Cenário 1 | substituição da área de agricultura geral pela cultura do eucalipto |
| Cenário 2 | substituição da área florestal pela cultura da cana-de-açúcar |
| Cenário 3 | substituição da área de pastagem por área de solo exposto |

Estes cenários são justificados pelas tendências regionais, visto que existem indústrias de processamento de celulose na bacia (Cenário 1) e também a presença de uma usina sucroenergética (Cenário 2). O Cenário 3 se justifica, devido a pastagem ser a maior área de uso do solo da região, sendo estas áreas não reconhecidas como uma cultura e sim como extrativismo, pouco manejadas, conseqüentemente, levando à degradação ao longo do tempo.

Visando analisar os impactos propostos pelos cenários de alteração no uso do solo nos recursos hídricos, determinou-se a vazão diária, vazão média, vazões médias mensais, curva de permanência, vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$ e Q_{90}), relativos ao período de estudo.

4.5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da calibração do modelo SWAT para a estação de Carlos Chagas (55630000) plotou-se, na Figura 4.7, as hidrógrafas simulada e observada, e a precipitação. Os resultados foram considerados bons, visto que o modelo simulou satisfatoriamente o comportamento da vazão para a estação, tanto nos períodos de cheia quanto nos períodos de estiagem. No entanto, verificou-se problemas de subestimativa dos valores simulados, de modo geral, nos picos de vazão. Diversos estudos relatam os resultados semelhantes encontrados neste trabalho (ARAGÃO et al., 2013; BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016).

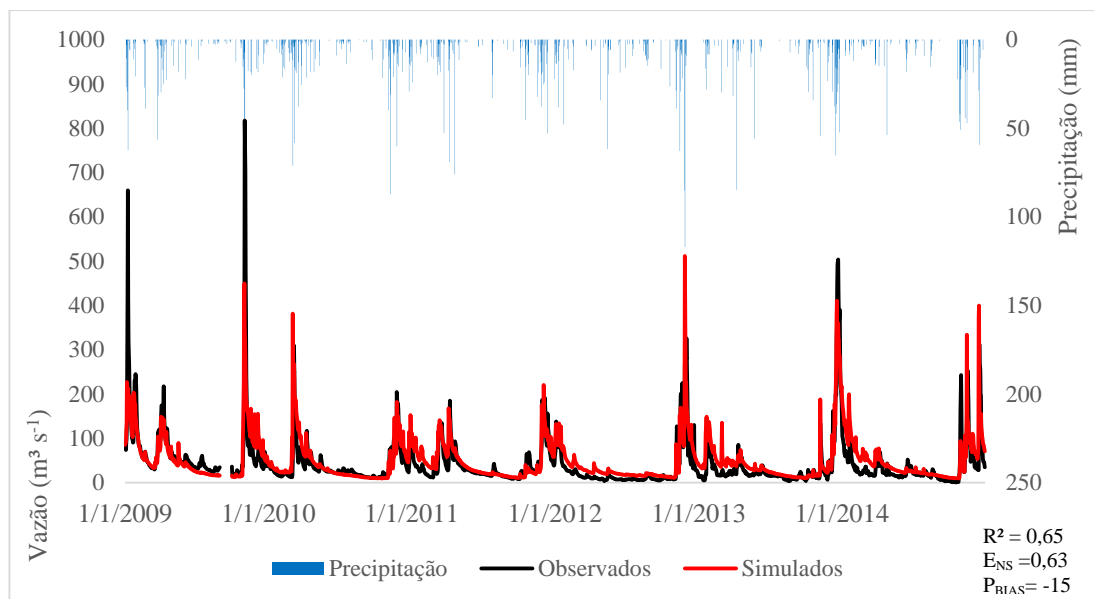


Figura 4.7. Hidrograma observado, simulado e precipitação para a estação 55630000 (Carlos Chagas) utilizada para a calibração do modelo SWAT a montante da seção.

Na Figura 4.8 apresenta-se o balanço hídrico médio mensal obtido para a região a montante da estação calibrada para o período de 2009 a 2014.

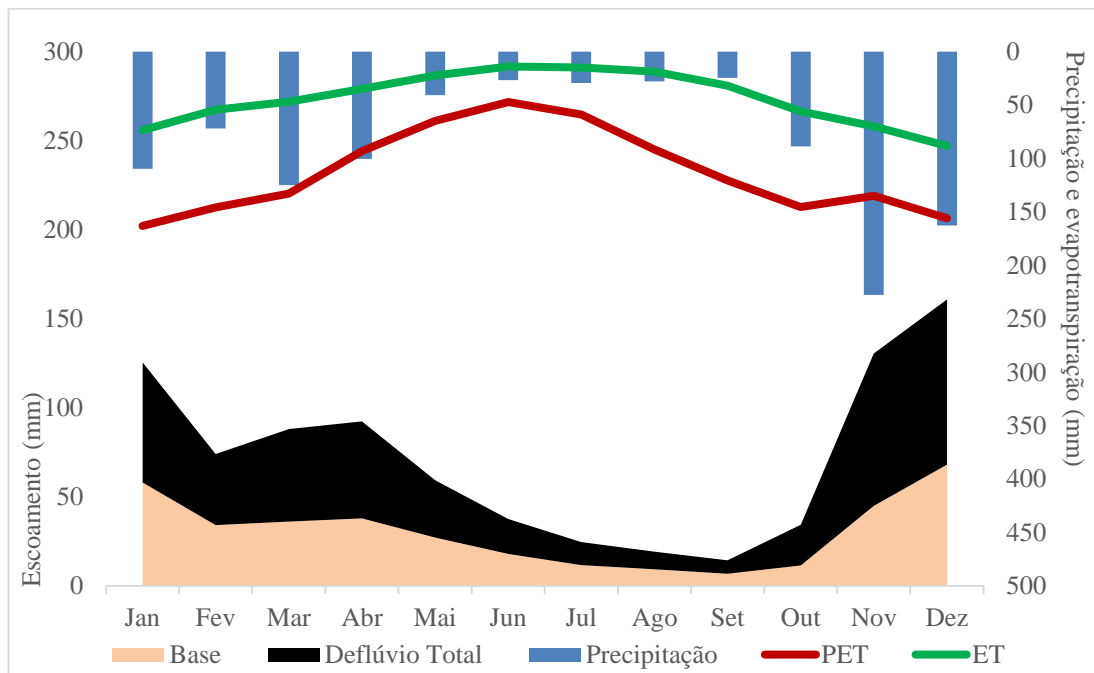


Figura 4.8. Balanço hídrico médio mensal simulado para a estação Carlos Chagas (55630000).

Observa-se, pela análise da Figura 4.8, que a região conta com dois períodos distintos de regime pluvial, sendo parte do ano úmida (entre os meses de outubro a abril) e outra seca (entre os meses de abril a outubro). Tal comportamento é esperado para as regiões sudeste e nordeste do Brasil (ALMEIDA et al., 2015).

Quanto aos valores de evapotranspiração, observa-se que a evapotranspiração real (ET) foi expressivamente menor que a evapotranspiração potencial (PET), situação que pode ser explicada em função da região estar inserida em uma zona de transição do clima semiúmido para o semiárido. Ainda assim, no mês de setembro, o balanço hídrico opera em déficit hídrico (evapotranspiração real maior que a precipitação), comportamento que implica principalmente na tendência de diminuição dos recursos hídricos subterrâneos, visto que a quantidade de precipitação foi baixa no período. Outro fato que explica este comportamento são os parâmetros relacionados com a água subterrânea, visto que foram os mais sensíveis na calibração do modelo para a bacia (CH_N2, GWQMN, CH_K2, EPCO, SOL_K e SOL_AWC).

Ressalta-se ainda, pela análise da Figura 4.8, que o deflúvio total refere-se a soma das componentes do escoamento superficial e subterrâneo (superficial + base). Observa-se o impacto direto do período seco na vazão, onde cessa o escoamento direto (superficial) e a produção de água fica mantida basicamente pelo escoamento subterrâneo (base). Dessa forma, é possível visualizar que a recarga dos mananciais subterrâneos ocorre durante os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro.

Durante os meses novembro e dezembro observa-se as maiores incidências de escoamento superficial direto, visto que também coincide com o meio do período chuvoso. Este comportamento pode ser explicado, principalmente, por ser uma época onde o solo já se encontra com elevada umidade, favorecendo assim a formação do escoamento superficial direto.

A Figura 4.9 representa o balanço hídrico diário para o período analisado. Observa-se picos de vazão, os quais ocorrem predominantemente no período chuvoso, principalmente nos meses de dezembro e janeiro. Tais picos são caracterizados por altos índices pluviométricos associados a períodos de alta umidade no solo no período que antecede o evento de chuva, favorecendo a formação de escoamento superficial direto.

Em janeiro e fevereiro de 2010 foi evidenciado um período incomum de estiagem (veranico), com valores precipitados de 21 e 55 mm, respectivamente. No entanto a média de precipitação é de 110 mm em janeiro e 72 mm em fevereiro (Figura 4.8). Este tipo de evento impacta diretamente na recarga dos mananciais subterrâneos, diminuindo rapidamente a vazão no período onde deveria estar ocorrendo a recarga.

Na Figura 4.10 são apresentadas as hidrógrafas geradas pelas mudanças de uso do solo no período analisado, conforme os cenários propostos: cenário 1 – mudança da área de agricultura para o cultivo de eucalipto, cenário 2 – mudança da cobertura florestal para cultivo de cana-de-açúcar, e cenário 3 – mudança de pastagem para solo exposto. Cabe ressaltar que os cenários 1 e 2 apresentaram pequenas alterações em relação ao cenário atual na maior parte do tempo, no entanto, o cenário 3 foi o que apresentou as diferenças mais expressivas.

O comportamento semelhante dos cenários 1 e 2 está associado principalmente a faixa de valores do número da curva (CN) serem próximos nas propostas de mudança dos usos do solo. Outro fato que explica esta semelhança é que, segundo a análise de sensibilidade, o parâmetro CN2 mostrou-se pouco sensível a calibração na bacia.

O cenário 3 apresentou os maiores picos de vazão e uma vazão maior nas fases de recessão do escoamento superficial direto. Tal comportamento é esperado, visto que a mudança da cobertura pastagem para solo exposto produz um incremento na componente do escoamento, que está associado a uma resposta rápida da vazão em relação a precipitação.

Pereira (2013) obteve resultados semelhantes ao simular a variação do uso do solo em uma bacia hidrográfica, e não obteve grandes mudanças nas hidrógrafas.

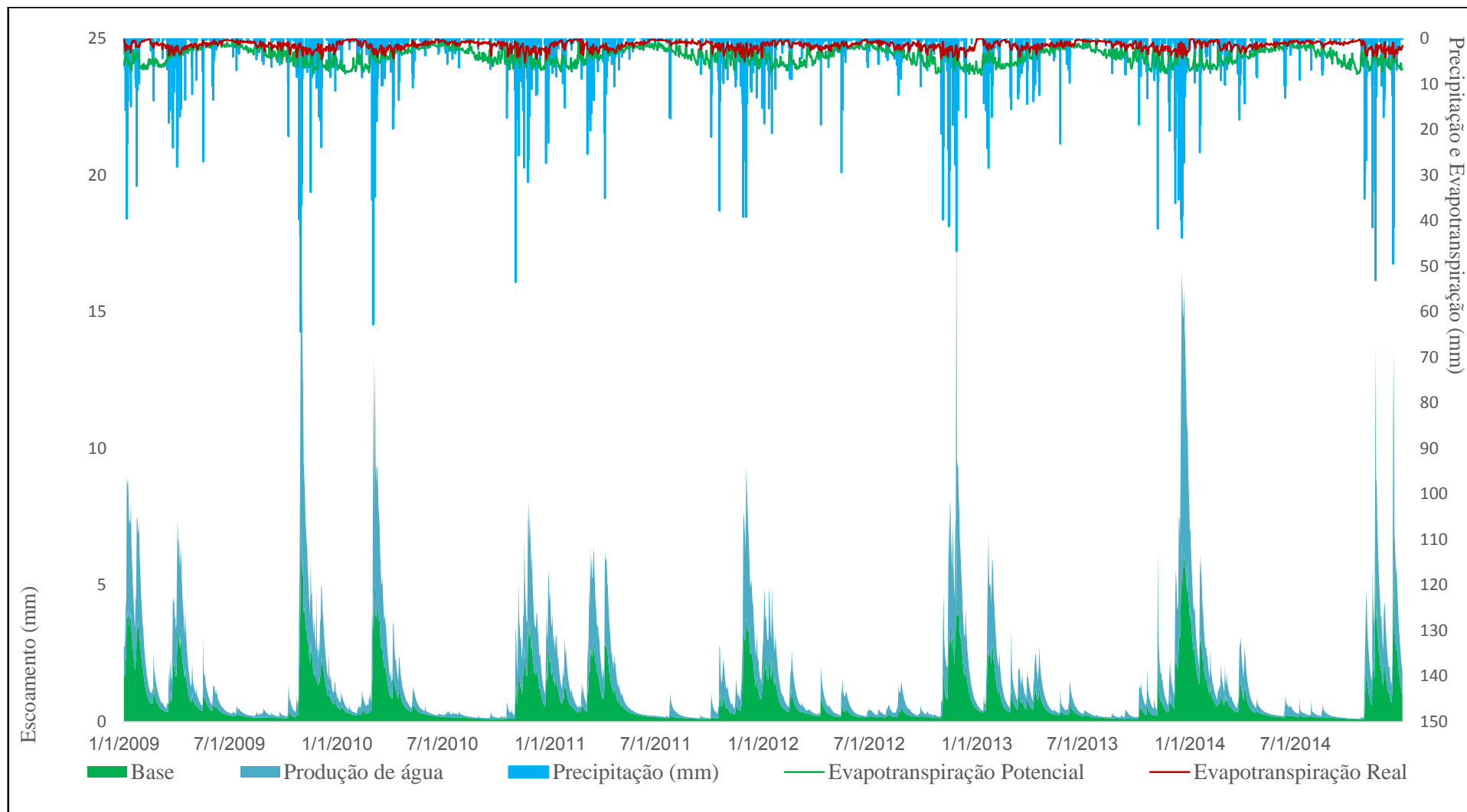


Figura 4.9. Balanço hídrico diário.

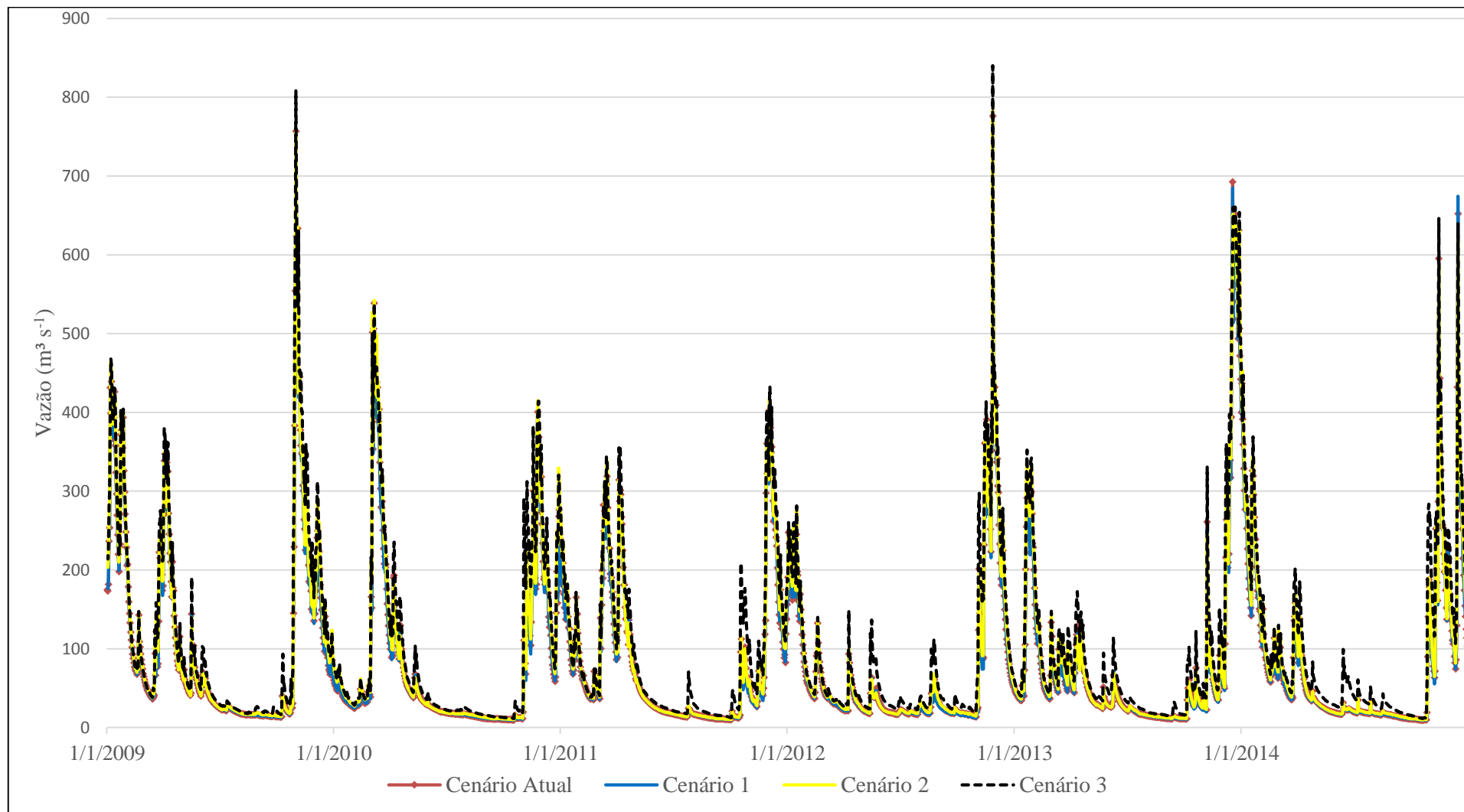


Figura 4.10. Hidrógrafas geradas com a simulação de cenários de mudança no uso do solo para a bacia do rio Mucuri.

Na Tabela 4.6 apresenta-se os valores da vazão média e a variação na vazão média em relação ao uso do solo atual para o período analisado. Observa-se que a vazão média para o cenário 1 foi de 83,158 m³ s⁻¹, representando uma redução de 1,79% em relação ao cenário atual e um incremento da ordem de 5% para a simulação no cenário 2. Quanto cenário 3 o aumento foi de 22,60% em relação ao cenário atual de uso do solo.

Tabela 4.6. Vazão média e percentual de incremento simulados para os diversos cenários de usos do solo

| Uso do solo | Vazão média (m ³ s ⁻¹) | Varição (% em relação ao uso atual) |
|-------------|---|--|
| Atual | 84,675 | |
| Cenário 1 | 83,158 | -1,79 |
| Cenário 2 | 89,030 | 5,14 |
| Cenário 3 | 103,809 | 22,60 |

A diminuição da vazão média para o cenário 1 pode ser explicada devido ao fato de que a substituição da área de agricultura por eucalipto tende a aumentar a componente de evapotranspiração, consequentemente diminuindo a vazão. Tal fato propicia o aumento do consumo de água por evapotranspiração, visto que na bacia as principais contribuições para a vazão são advindas das águas subterrâneas.

O aumento da vazão média no cenário 2 também pode ser explicado pelo mesmo fato, visto que ao diminuir a massa vegetal, substituindo a área de floresta por cana-de-açúcar, diminui-se também a componente da evapotranspiração, consequentemente ocorre o aumento da vazão média. Estes resultados corroboram com a afirmação apresentada por Bosch e Hewlett (1982) que relatam o aumento da vazão média com a extinção da cobertura florestal.

No cenário 3 o aumento da vazão média é explicado pelo incremento da componente de escoamento superficial direto e diminuição da evapotranspiração, devido ao aumento do número da curva (CN) e redução da cobertura vegetal. Blainski et al. (2011) obtiveram também um aumento da vazão média ao substituir área vegetada por solo exposto. Este fato corroborou para a sustentação dos resultados obtidos.

Perazolli, Pinheiro e Kaufmann (2013) propuseram três diferentes cenários de alteração de uso do solo para a bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia, no estado de Santa Catarina, na região sul do Brasil, com uso do solo predominante por cobertura florestal (~67%), seguidos por área de pastagem (~20%) e agricultura (~17%). Verificaram que a substituição de toda a área da bacia por agricultura não alterou a vazão média, que a substituição de toda a área da bacia por floresta diminuiu a vazão média,

que a substituição de toda a área da bacia por pastagem aumentou a vazão média.

Na Figura 4.11 está apresentada a vazão média mensal para os diversos cenários de uso do solo. Observa-se que o cenário 1 se aproximou muito do comportamento do cenário atual. É visível também um ligeiro acréscimo na vazão média mensal para o cenário 2 em relação ao cenário atual, e ainda um acréscimo maior no cenário 3 em todos os meses.

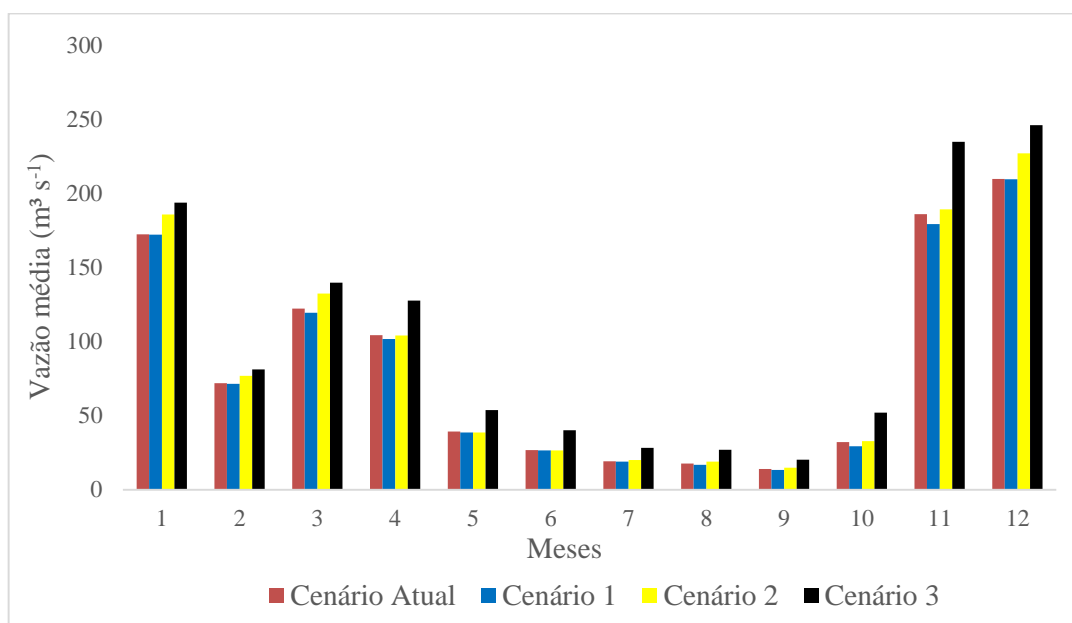


Figura 4.11. Vazão média mensal simulada para os diversos usos do solo.

Na Figura 4.12 está apresentada a curva de permanência das vazões simuladas para os diferentes cenários de uso do solo. Nota-se uma semelhança para os diferentes cenários, sendo que para o cenário 3 as vazões foram maiores em relação ao uso atual e cenários 1 e 2. É importante ressaltar que em algumas regiões do país as vazões mínimas de referências são obtidas em função da curva de permanência.

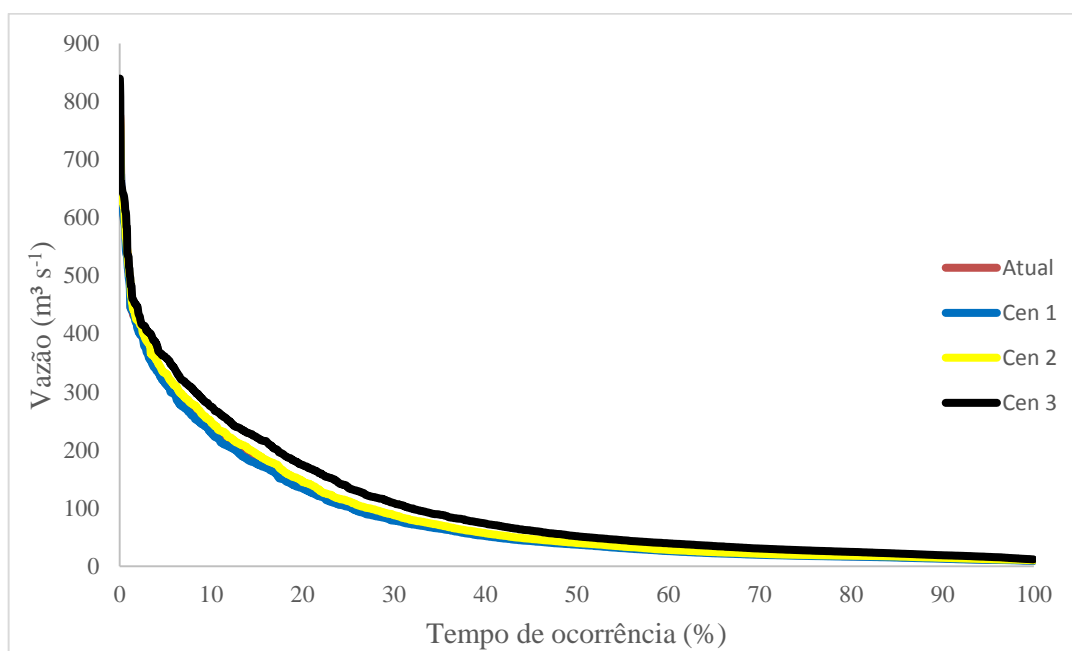


Figura 4.12. Curva de permanência de vazões simuladas para os diversos usos do solo.

Na Tabela 4.7 apresentam-se os valores das vazões de mínimas de referências ($Q_{7,10}$ e Q_{90}), simuladas para os diferentes cenários propostos neste estudo. Nota-se que a alteração no uso do solo apresenta um impacto maior nas vazões mínimas de referência, principalmente no cenário 3, onde o aumento foi de 12,02% na $Q_{7,10}$ e de 39,63% na Q_{90} . No cenário 1 verifica-se uma diminuição da $Q_{7,10}$ e da Q_{90} de 0,73% e 3,20%, enquanto que na proposição do cenário 2 ocorre o aumento das vazões em 3,07% e 4,88%, respectivamente.

Tabela 4.7. Valores das vazões mínimas de referência e sua variação para diferentes cenários de uso do solo

| Uso do solo | $Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$) | Variação (%) | Q_{90} ($m^3 s^{-1}$) | Variação (%) |
|---------------|-----------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| Cenário atual | 1,239 | - | 11,280 | - |
| Cenário 1 | 1,230 | -0,73 | 10,910 | -3,20 |
| Cenário 2 | 1,277 | 3,07 | 11,830 | 4,88 |
| Cenário 3 | 1,489 | 12,02 | 15,750 | 39,63 |

Cabe ressaltar que apesar dos aumentos nas vazões médias e mínimas de referência verificadas para o cenário 3, que prevê a alteração da pastagem por solo exposto, não é possível concluir que tal alteração seria conveniente do ponto de vista ambiental para a bacia, visto que, existem outros fatores passíveis de análise tais como: produção de sedimentos, carreamento de nutrientes, qualidade das águas, microrganismos aquáticos, influência no microclima, influência na fauna e flora local, dentre outros. Também, o período verificado compreende apenas 6 anos, e que em um longo prazo pode apresentar constatações diferentes das observadas.

4.6. CONCLUSÕES

O modelo SWAT mostrou-se eficiente para simular o impacto da alteração do uso do solo no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Mucuri;

A substituição de agricultura por eucalipto na bacia propiciou uma diminuição na vazão média e mínimas de referência;

As substituições de cobertura florestal por cana-de-açúcar e de pastagem por solo exposto propiciaram um aumento na vazão média e mínimas de referência;

Torna-se importante avaliar outros aspectos ambientais para uma inferência da qualidade efetiva dos recursos naturais na bacia hidrográfica do rio Mucuri mediante cenários de alterações do uso do solo.

4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A user manual**. Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology, Zurich, Switzerland, 84p, 2007.

ABBASPOUR, K. C. ROUHOLAHNEJAD, E. VAGHEFI, S. SRINIVASAN, R. YANG, H. KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, **Journal of Hydrology**, v. 524, pp. 733-752. 2015.

ALMEIDA, R. A.; PEREIRA, S. B.; COELHO, C. D.; SOUZA, D. A. N. de. Precipitação Pluvial Média Mensal e Anual nas Regiões Político-Administrativas do Brasil. **Engenharia na Agricultura (Impresso)**, v. 23, p. 169-175, 2015.

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, 2013.

ARAGAO, R. DE; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A. DE; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E. DE; SRINIVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, 2013.

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

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, p.73-89, 1998.

AWAN, U. K.; ISMAEEL, A. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. **Journal of Hydrology**, v. 519, pp. 1368-1382, 2014.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v.86, n.3, p.160-171, 2011.

BLAINSKI, E.; SILVIERA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.

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

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. D.; CHAFFE, L. B. Hierarchical Calibration of SWAT model for a watershed in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v.21, n.1, 2016.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

ELESBON, A. A. A.; GUEDES, H. A. S.; DA SILVA, D. D.; OLIVEIRA, I. C. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus - Brasil. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 281-288, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10 Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FERNANDEZ, G. P.; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. Development and testing of watershed-scale models for poorly drained soils. **Transactions of the ASAE**. v.48, n.2, p.639-652, 2005.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH**. IGAM, 2011. 139p.; il. – Resumo executivo volume 1. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planosderecursoshidricos/resumo-executivo-vol-1.pdf>>. Acesso em 02 de fev. de 2015.

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

MEAURIO, M.; ZABALETA, A.; URIARTE, J.; SRINIVASAN, R.; ANTIGÜEDAD, I. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 326-334, 2015.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras, Editora UFLA, 2013. 455 p.

MONTEIRO, J. A. F.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological processes**. V.30, n.1, p. 1419-1430, 2015.

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

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**. v. 306, p. 127-145, 2005.

NASH, J. E.; SUTTCALIFE, J. E. River flow forecasting through conceptual model: Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. V. 10, n. 3, pp. 282-290. 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SPRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. 2005. **Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2005**. Disponível em: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf>> . Acesso em: 11 de abril de 2015. 530p.

NETO, J. O. M.; SILVA, A. A. da; MELLO, C. R. de; JÚNIOR, A. V. M. Simulação Hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, pp. 177-188, 2014.

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

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

PEREIRA, D. dos R. **Simulação Hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

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

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

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

VAN LIEW; M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. **Transactions of the ASAE**. v.46, n.6, p.1539-1551, 2003.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. **ArcSWAT 2.3.4 interface for SWAT2005 - user's guide**, 2009. Disponível em: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf>> . Acesso em: 08 de set. de 2013. 460p.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO GERAL

5. CONCLUSÃO GERAL

Com base nos resultados dos capítulos foi possível concluir:

- A classificação do uso do solo pelo método da Máxima Verossimilhança se mostrou adequada;
- A obtenção de mapas de uso do solo com tamanhos de amostras de treinamento de 150, 130 e 90 apresentaram resultados satisfatórios mediante a utilização, de modo geral, de filtro de áreas menores que a AMM.
- O modelo SWAT foi calibrado e validado para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri.
- O modelo SWAT apresentou um desempenho classificado como bom na etapa de calibração e na etapa de validação foi adequado na maioria das estações para as condições edafoclimáticas da bacia hidrográfica do rio Mucuri,
- O módulo SWAT-CUP foi uma importante ferramenta de análise de sensibilidade, calibração e validação do SWAT.
- O modelo SWAT mostrou-se eficiente para simular o impacto da alteração do uso do solo no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Mucuri;
- A substituição de agricultura por eucalipto na bacia propiciou uma diminuição na vazão média e mínimas de referência;
- As substituições de cobertura florestal por cana-de-açúcar e de pastagem por solo exposto propiciaram um aumento na vazão média e mínimas de referência
- O modelo hidrológico SWAT mostrou-se eficiente como ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Mucuri.
- Torna-se importante avaliar outros aspectos ambientais para uma inferência da qualidade efetiva dos recursos naturais na bacia hidrográfica do rio Mucuri mediante cenários de alterações do uso do solo.