

APLICABILIDADE DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBUNA, SP - BRASIL

CAIO VINICIUS FERREIRA MARMONTEL¹; TERESA CRISTINA TARLÉ
PISSARRA²; MAURÍCIO RANZINI³ E VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES⁴

¹Departamento de Ciência Florestal, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Avenida Universitária, n° 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu-SP, Brasil, caioomarmontel@gmail.com

²Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Jaboticabal-SP, Brasil, teresap1204@gmail.com

³Seção de Engenharia Florestal, Divisão de Dasonomia, Instituto Florestal do Estado de São Paulo, Rua do Horto, 931, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, São Paulo-SP, Brasil, ranzini@gmail.com

⁴Departamento de Ciência Florestal, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Avenida Universitária, n° 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu-SP, Brasil, valdemirrodriques@fca.unesp.br

1 RESUMO

A água disponível para o consumo humano vem se tornando cada vez mais escassa. Diante desse problema, uma possibilidade de melhorar a compreensão do comportamento hidrológico, é a utilização de tecnologias, em especial a integração do SIG com a modelagem hidrológica. O presente estudo teve como objetivo testar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT para estimação de vazões em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica, um dos formadores do rio Paraíba do Sul. Os dados climáticos e fluviométricos foram coletados com uma série histórica de 22 anos. Na calibração e validação verificou-se boa aderência entre os dados simulados e observados, ou seja, os valores simulados reconheceram os picos e recessões dos valores observados. Os índices estatísticos (NS, PBIAS, RSR e R²) calculados foram qualificados como “muito bom” para a estimação das vazões. Os resultados confirmaram a aplicabilidade do modelo, dessa forma, pode servir como ferramenta para planejamento e gestão de políticas públicas dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, na região da Mata Atlântica. O modelo hidrológico SWAT mostrou-se muito bom e apto para estimação de vazões e do balanço hídrico na área de estudo.

Palavras-chave: água, calibração, mata atlântica, validação, vazão

MARMONTEL, C. V. F.; PISSARRA, T. C. T.; RANZINI, M. E RODRIGUES, V. A.
APPLICABILITY OF THE SWAT HYDROLOGICAL MODEL IN PARAIBUNA
RIVER BASIN, SP – BRAZIL

2 ABSTRACT

The water available for human consumption is becoming increasingly scarce. Faced with this problem, one possibility to improve the understanding of water behavior, is the use of technologies, particularly the integration of GIS with hydrological modeling. The present

study is intended to test the applicability of SWAT hydrological model for flow estimation in the stretch of Paraibuna river basin - Paraiba Valley, in the Atlantic Forest region, in the state of São Paulo, one of the tributaries of Paraíba do Sul river. Climatic and fluviometric data were collected with a historical series of 22 years. In the calibration and validation, good adherence was observed across simulated and observed data, that is, the simulated values recognized the peaks and recessions of the observed values. The statistical indices (NS, PBIAS, RSR and R²) calculated were qualified as "very good" for the estimation of flows. The results confirmed the applicability of the model, so it can serve as a tool for planning and management of water resources public policies in watersheds, in the Atlantic Forest region. The SWAT hydrological model was very good and suitable for estimation of flow and water balance in the stretch of the Paraibuna river basin.

Keywords: water, calibration, forest hydrology, atlantic forest, validation, discharge

3 INTRODUÇÃO

A água é um elemento em abundância e reciclável, sendo fundamental para a existência de todos os seres do planeta Terra. No entanto, a água disponível para o consumo humano vem se tornando cada vez mais escassa, um exemplo, foi a crise hídrica iniciada em 2014 na Região Metropolitana de São Paulo. Esses problemas são ocasionados diante da poluição dos recursos hídricos, desmatamento e desperdícios, gerados principalmente pela urbanização e a industrialização, além da má distribuição da água, tanto espacial quanto temporal.

Diante desses problemas, uma possibilidade de melhorar a compreensão do comportamento hidrológico, é a utilização de tecnologias, ou seja, as bases computacionais, em especial a integração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) com a modelagem hidrológica, por possuir um grande potencial de estimar quantitativamente a vazão. Neste sentido a hipótese do trabalho é de que seria possível a partir do uso do modelo SWAT, simular a vazão.

Os estudos em modelagem hidrológica Soil and Water Assessment Tool (SWAT) são comuns em bacias hidrográficas com usos e coberturas de pastagem e agricultura, porém poucos

estudos avaliaram o potencial de produção de água em sistemas protegidos de ecossistemas florestais, como por exemplo, a Mata Altântica.

A bacia do rio Paraibuna apresenta um déficit, quando se refere a modelagem e necessita deste tipo de estudo para fornecer um suporte para o auxílio na tomada de decisão do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Com o estudo da aplicação do modelo hidrológico SWAT na bacia pode possibilitar nortear a aplicabilidade dessa ferramenta para a gestão e políticas públicas dos recursos hídricos.

O rio Paraibuna utiliza suas águas para gerar energia elétrica e é um dos formadores do rio Paraíba do Sul, importante corpo d'água da região sudeste do Brasil e o principal manancial de abastecimento do Vale do Paraíba, inclusive a cidade do Rio de Janeiro, além de recentemente ter sido interligado (após a crise hídrica de 2014) ao Sistema Cantareira, responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo.

O presente estudo teve como objetivo testar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT para estimação de vazões em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, no estado de São Paulo, Brasil.

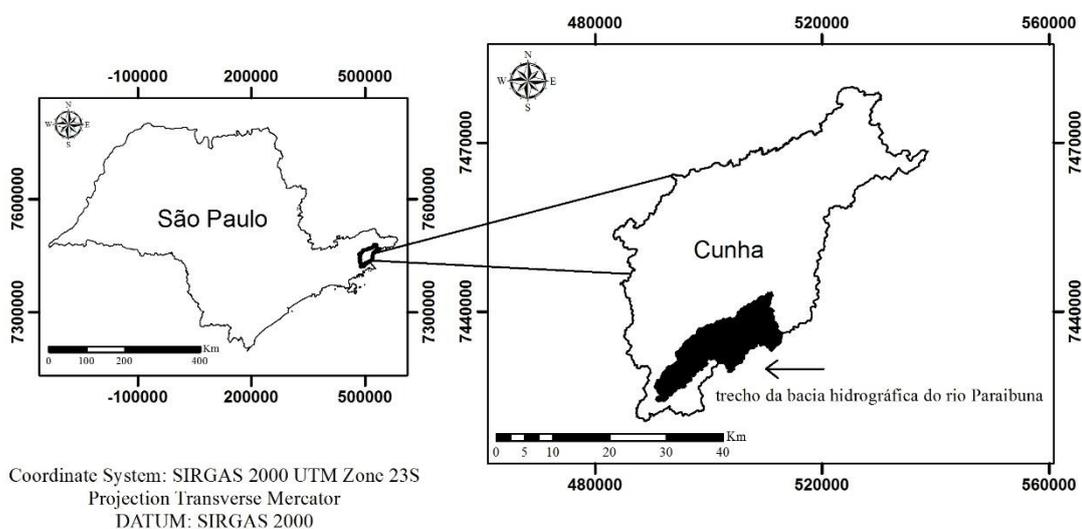
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área

O estudo da avaliação da aplicabilidade do modelo hidrológico foi realizado em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, com uma

área de 15.640 ha (156,4 km²). Está localizado no Vale do Paraíba, município de Cunha, leste do estado de São Paulo - Brasil, entre os paralelos 23°07'43" a 23°16'57" de latitude sul e os meridianos 44°53'20" a 45°04'41" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 1190 m (Figura 1).

Figura 1. Localização do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, estado de São Paulo – Brasil.



A nascente do rio Paraibuna localiza-se na cidade de Cunha, aproximadamente 1.600 m de altitude, que segue em direção ao sudoeste, sendo o ponto de exutório do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna quando deságua no rio bonito. O rio Paraibuna passa pelo município de São Luiz do Paraitinga, Natividade da Serra e no município de Paraibuna, que recebeu seu nome. No município de Paraibuna, as águas se unem ao rio Paraitinga para formar o rio Paraíba do Sul na Serra da Bocaina (VENEZZIANI et al., 2009). Em sua jusante, a bacia atravessa o Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha (PESM-NC), onde se localiza o Laboratório de Hidrologia Florestal Eng^o

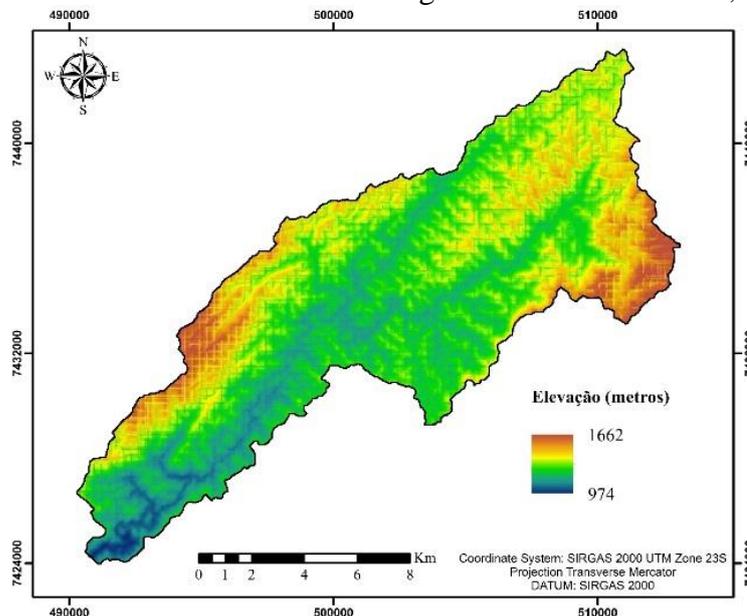
Agr^o Walter Emmerich (LHFWE), no município de Cunha, estado de São Paulo - Brasil.

4.2 Metodologia

4.2.1 Aquisição, parametrização, entrada de dados e execução

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido no projeto Topodata do INPE, oriundo da imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros após o processo de interpolação. As cenas utilizadas foram 23S465 e 23S45, com variação de 974 a 1662 metros de altitude (Figura 2).

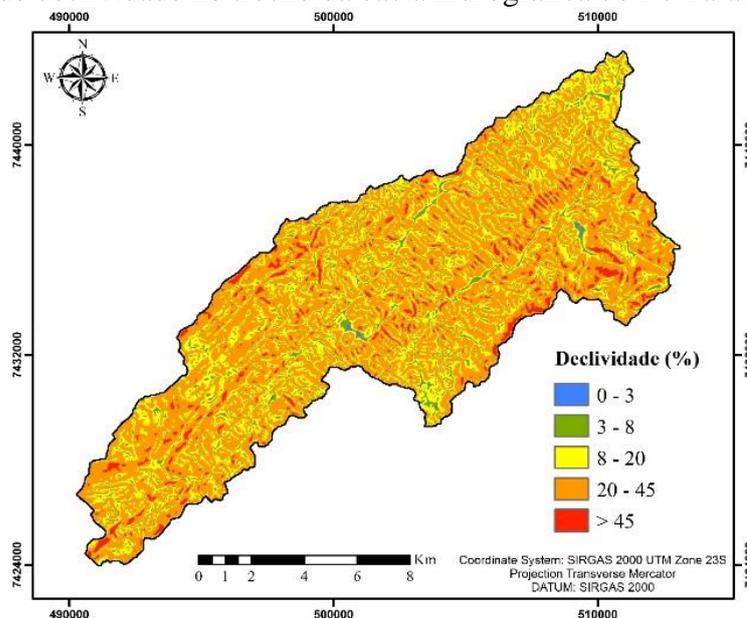
Figura 2. Mapa do MDE no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, SP – Brasil.



As informações da declividade foram determinadas a partir da classificação desenvolvida pela Embrapa

(2006), com mais da metade do relevo atribuído como forte ondulado (Figura 3).

Figura 3. Mapa de declividade no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, SP – Brasil.



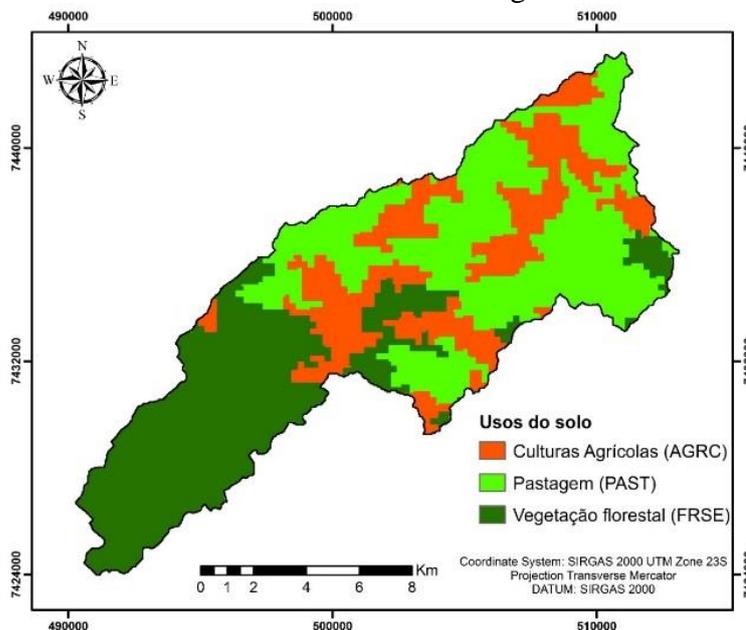
Para a classificação de uso do solo, foi utilizado o mapa de uso da terra do Brasil, com a base de dados de acordo com

IBGE (2014). O uso do solo em suas cabeceiras e terço médio caracteriza-se por ser agropastoril de pequeno porte, com

pequenos fragmentos de vegetação florestal. A jusante é protegida pelo PESH-NC, do qual possui cobertura de

vegetação florestal, ou seja, Mata Atlântica - Floresta Ombrófila Densa Alto Montana (Figura 4).

Figura 4. Mapas de uso do solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, SP - Brasil.



De acordo com Rossi (2017) a descrição dos cinco tipos de solos são:

1) CH3 - Associação de CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico + CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente e moderado, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado;

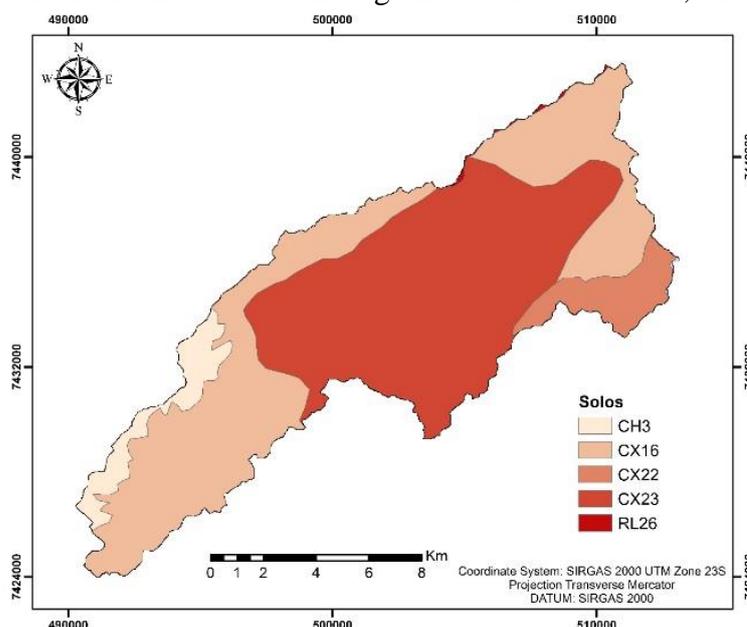
2) CX16 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média ou argilosa, fase relevo forte ondulado;

3) CX22 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente

e moderado, + CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado;

4) CX23 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média, fase relevo forte ondulado;

5) RL26 - Associação de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico A moderado, textura média ou argilosa, substrato granitóides + CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico A moderada textura média ou argilosa, ambos fase relevo forte ondulado (Figura 5).

Figura 5. Mapas solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, SP - Brasil.

Os dados climáticos foram obtidos junto à Estação Meteorológica do LHFWE no PESH/NC e os dados de precipitação e vazão, obtidos na Estação Fluviométrica na microbacia “A” (MA) instalada no LHFWE no PESH-NC. As precipitações foram obtidas a partir do intermédio de dois pluviógrafos do tipo caçamba, com precisão igual a 0,5 mm; um localizado na saída e outro localizado no interior da microbacia. As vazões foram obtidas a partir de dois tanques de sedimentação e um vertedor triangular de ferro de 5 m de largura por 1,5 m de altura e um ângulo de 120° de abertura, equipada com um linígrafo do tipo flutuador que registra as cotas da altura da lâmina de água no vertedor numa carta de duração mensal e transformada em vazão utilizando uma curva-chave, apurada empiricamente. A série histórica dos dados das estações meteorológica e fluviométrica foi de 01/01/1993 até 31/12/2014, período de 22 anos.

4.2.2. Análise de sensibilidade, calibração e validação no SWAT-CUP

A ferramenta SWAT é um modelo hidrológico de domínio público, que opera em escala de bacias hidrográficas, executando simulações de processos físicos de forma semi-distribuída tanto espacial quanto temporal (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). O SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS) do *United States Department of Agriculture* (USDA), na década de 90 pelo Dr. Jeff G. Arnold (NEITSCH et al., 2011).

O *Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP) é uma ferramenta desenvolvida de domínio público e que auxilia no processo da análise de sensibilidade, calibração e validação do SWAT (ABBASPOUR, 2012).

A análise de sensibilidade foi realizada pela metodologia *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) do tipo global, sendo que o primeiro passo foi aplicá-lo para definir a função objetivo, onde apresenta-se um resultado diferente para cada uma, ou seja, a definição dos

limites dos parâmetros finais é sempre dependente da função escolhida. A amostragem através do *Latin hypercube* (LH) é utilizada para traçar o parâmetro independente fixo (ABBASPOUR et al., 2015). A aplicação do sistema de regressão múltipla dos parâmetros gerados pela amostragem LH são relacionados com os valores das funções objetivas (ANDRADE et al., 2017).

A análise de sensibilidade incluiu o período de 01/01/1996 a 31/12/2005 (10 anos). A escolha dos parâmetros para a análise de sensibilidade a serem alterados no processo de calibração semi-automática no SWAT-CUP, baseou-se em Lelis et al. (2012), Andrade, Mello e Beskow (2013) e Pereira et al. (2016).

Após o término da análise de sensibilidade, iniciou-se a calibração do modelo, considerada a primeira parte da série temporal do modelo, e incluiu o mesmo período da análise de sensibilidade, ou seja, entre 01/01/1996 a 31/12/2005 (10 anos).

Os índices estatísticos utilizados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), percentual de tendência (PBIAS), razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR) e o coeficiente de determinação (R^2), propostos por Moriasi et al. (2007).

Concluída a calibração, utilizou-se a segunda parte (1996/1997/1998/1999/2000/2001/2002/2003) do qual consistiu em (NS, PBIAS, RSR e R^2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sem calibração

Os maiores eventos de precipitação foram refletidos no pico de vazão e também foram bem simulados quando o volume da chuva diminuiu.

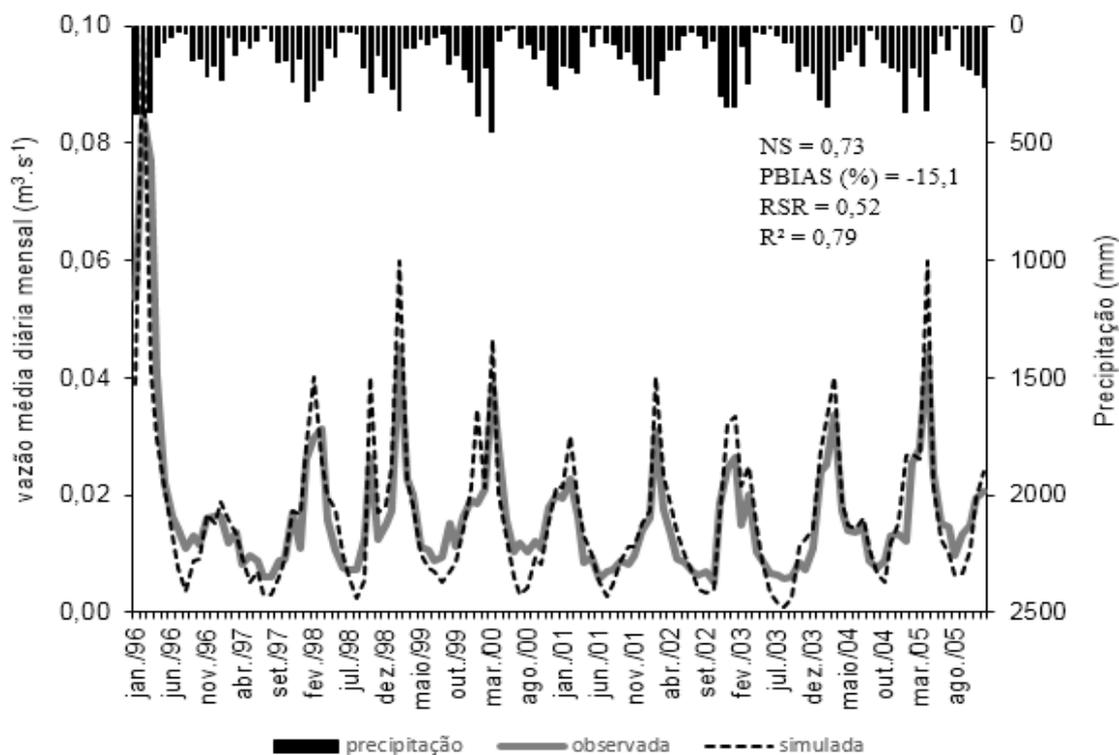
O valor médio sem a calibração dos dados observados e simulados foi semelhante ($0,017 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). O valor mínimo registrado para a vazão simulada foi de $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Já o valor máximo registrado da vazão simulada foi de $0,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,085 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Os valores simulados responderam de forma superestimada para os picos de vazões e subestimada para as recessões de vazões, porém verifica-se que ocorreu uma boa aderência entre os dados simulados e observados, ou seja, os valores simulados reconhecem os picos e recessões de vazões dos dados observados.

Ocorreu superestimação dos valores simulados em fevereiro de 1996/1998/1999/2001/2002/2003, outubro de 1998, janeiro e março de 2000, dezembro de 2002, março de 2004 e abril de 2005. A subestimação ocorreu nos valores simulados em agosto de 1996/1997/1998/1999/2000/2001, setembro de 2002 e setembro de 2005.

Os valores dos índices estatísticos da qualidade dos resultados gerados antes da calibração tiveram um desempenho classificado como “muito bom” para o parâmetro R^2 (0,79), “bom” para NS (0,73) e satisfatório para RSR (0,52) e PBIAS (-15,1%), que indica que a simulação está superestimada em 15,1% em relação aos dados observados (Figura 6).

Figura 6. Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas e simuladas sem calibração pelo modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005.



Diante da superestimação e subestimação dos dados simulados e do valor do índice estatístico de PBIAS, verificou-se a necessidade de submeter esta modelagem aos procedimentos de análise de sensibilidade, calibração e validação para poder representar os dados observados de maneira mais satisfatória, buscando alcançar os valores simulados mais similares aos observados.

5.2 Análise de sensibilidade e calibração

Foram considerados quinze parâmetros de maior sensibilidade no SWAT e após ser realizado a análise de sensibilidade e calibração, atribui-se novos valores para a simulação (Tabela 1).

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados na calibração semi-automática pelo SWAT-CUP, com seus respectivos valores iniciais, limites (inferiores e superiores) e os valores calibrados.

Parâmetros	Unidades de medida	Limites	Valor inicial	Valor calibrado
GW_DELAY	dias	-30 a 60	31	52,35
RCHRG_DP	fração	0 a 0,5	0,05	0,26
CN2	adimensional	± 20%	55 a 73	-15%
GW_REVAP	adimensional	0,02 a 0,2	0,02	0,1
ESCO	adimensional	0,5 a 0,95	0,95	0,89
GWQMN	mm	-1000 a 1000	1000	-882
CANMX	mm	0 a 30	0	11,31
SOL_K	mm.h ⁻¹	± 5%	12,5 a 40	-5%
EPCO	adimensional	0,01 a 1	1	0,95
CH_K2	mm.h ⁻¹	0 a 10	0	6,21
REVAPMN	mm	-1000 a 1000	750	-978
SOL_AWC	mm H ₂ O mm.solo ⁻¹	± 5%	0,15 a 0,3	-1%
ALPHA_BF	dias	0 a 1	0,048	0,05
SURLAG	adimensional	1 a 24	4	13,52
CH_N2	adimensional	-0,01 a 0,2	0,014	0,18

Legenda: GW_DELAY, tempo de retardo do fluxo subterrâneo; RCHRG_DP, fração de água percolada para o aquífero profundo; CN2, Número da curva na condição II de umidade; GW_REVAP, coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular; ESCO, fator de compensação de evaporação do solo; GWQMN, limite entre a profundidade de água no aquífero raso para o escoamento de base; CANMX, armazenamento máximo do dossel; SOL_K, condutividade hidráulica no solo saturado; EPCO, fator de compensação de evaporação da planta; CH_K2, condutividade hidráulica efetiva no canal principal; REVAPMN, profundidade limite de água no aquífero raso para o ocorrer o "revap"; SOL_AWC, capacidade de água disponível no solo; ALPHA_BF, constante de recessão do escoamento de base; SURLAG, coeficiente de retardo do escoamento superficial; CH_N2, coeficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal.

A redução da CN2 em 10% mostrou que o uso do solo foi bem representativo. Essa redução durante a calibração também foi observada por Paim e Menezes (2009), Strauch et al. (2012), Andrade et al. (2013) e Fukunaga et al. (2015) em outras bacias brasileiras. Também é possível que as propriedades físicas do solo não foram refletidas nos valores iniciais do CN2 (FUKUNAGA et al., 2015). Santos, Cecílio e Zanetti (2013) mostraram que o CN2 superestima potencialmente o escoamento superficial e consequentemente as vazões em bacias hidrográficas, ou seja, com a redução dos valores de CN2, ocorre maior proximidade dos valores observados.

Os parâmetros GW_DELAY, RCHRG_DP, GW_REVAP, GWQMN apresentaram alta sensibilidade e são

processos que fazem parte do fluxo de base. O parâmetro ESCO é utilizado na calibração pelo fato de não ser medido diretamente e está ligado a evapotranspiração.

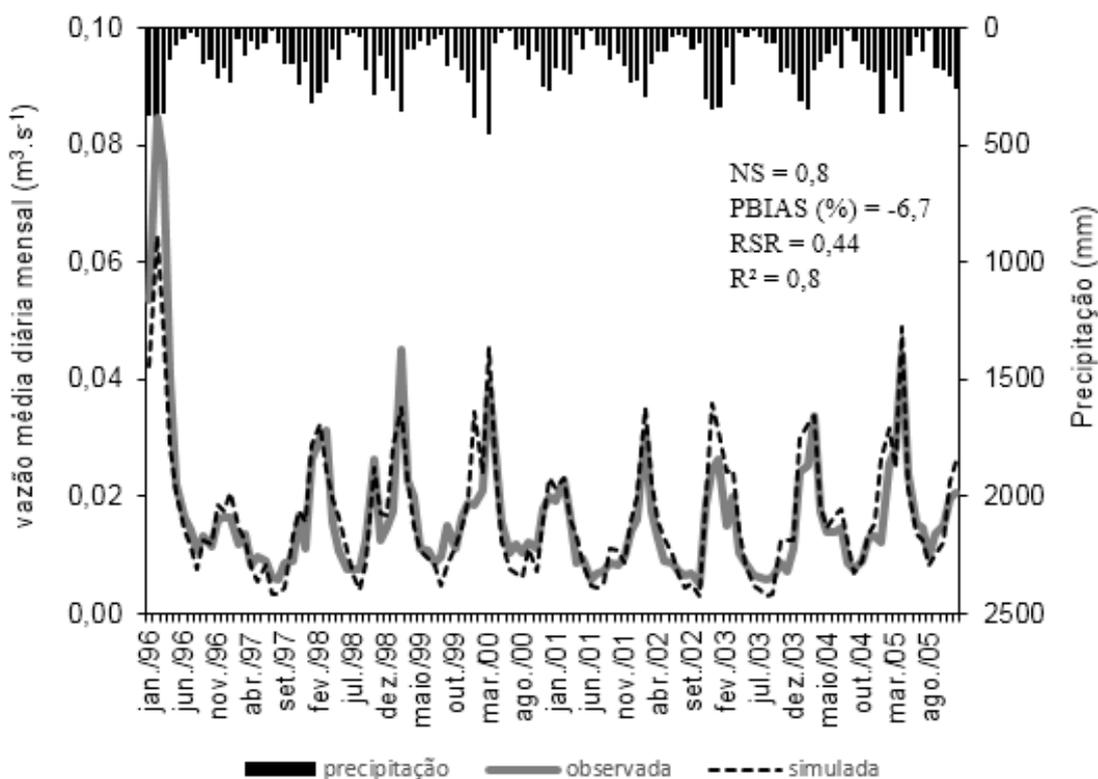
O valor médio após a calibração dos dados observados e simulados foi semelhante (0,017 m³.s⁻¹), o valor mínimo registrado para a vazão simulada foi de 0,002 m³.s⁻¹ e para a vazão observada foi de 0,005 m³.s⁻¹, enquanto para o valor máximo registrado da vazão simulada foi de 0,068 m³.s⁻¹ e para a vazão observada foi de 0,085 m³.s⁻¹

Ocorreu superestimação nos picos simulados em março de 1996, 2000 e 2003, janeiro de 1997, dezembro de 2002 e abril de 2005. A subestimação nas recessões dos valores simulados ocorreu em agosto de 1997/1998/1999/2000/2003 e julho de

2001. Os valores dos índices estatísticos da qualidade dos resultados gerados na calibração tiveram um desempenho classificado como “muito bom”, para os

quatro parâmetros: NS (0,8), PBIAS (-6,7%), RSR (0,44), R^2 (0,8), demonstrando o progresso da simulação em relação aos valores não calibrados (Figura 7).

Figura 7. Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas e simuladas após a calibração pelo modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005.



A superestimação da vazão pode estar vinculada à utilização de parâmetros padrões do modelo SWAT, principalmente os parâmetros que conduzem a movimentação da água nos aquíferos e aqueles que definem as rotinas entre as células de drenagem (GASSMAN et al., 2007). A variação de picos de vazão observados e simulados podem estar relacionada com a representatividade espacial e temporal dos padrões de chuva (PEREIRA et al., 2016). Um dos parâmetros que pode estar relacionado com a superestimação é o CN2, no qual esse valor depende das características do solo e condições de umidade antecedentes, tendo a necessidade de um maior controle do

parâmetro na calibração (DIAS et al., 2018).

O modelo de Viana et al. (2018) subestimou a maior parte dos dados, porém resultou em dados simulados próximos aos dados observados. A subestimação pode ter relação com o armazenamento de água disponível no solo, ou seja, as águas que irão abastecer o aquífero profundo são consideradas perdidas e não tem mais participação para o sistema. Durães, Mello e Naghettini (2011) descobriram um viés de subestimação do fluxo base sob condições de clima úmido.

Após calibrado o modelo, é notável um melhor ajuste dos dados simulados, principalmente os valores de picos, que

tiveram uma redução considerável dos eventos extremos simulados quando comparados a simulação sem calibração. Nos períodos de recessão, observou-se grande proximidade entre os valores observados e simulados, porém o ajuste não conseguiu representar todos os dados com a mesma eficiência, ou seja, alguns minimizaram a superestimação e outros passaram a ser subestimados. De acordo com Fukunaga et al. (2015) a alteração pode ser explicada principalmente pela alteração dos valores de CN2, SOL_AWC e SOL_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo.

É possível notar que no início do período da simulação para calibração (janeiro-março de 1996) não houve boa correspondência entre os dados observados e simulados e a partir da época chuvosa subsequente, percebe-se uma melhora na resposta hidrológica do SWAT. Fukunaga et al. (2015) informa que as simulações teriam maior capacidade de resposta hidrológica se iniciassem no período seco.

O modelo SWAT tem dificuldades em conciliar as estações de seca e chuva, ou seja, quando os dados de inverno e

verão são usados separadamente para calibrar o modelo, o desempenho do modelo ainda é melhor para a temporada de inverno, onde predomina as vazões mais baixas, do que para o verão com maiores vazões (FUKUNAGA et al., 2015).

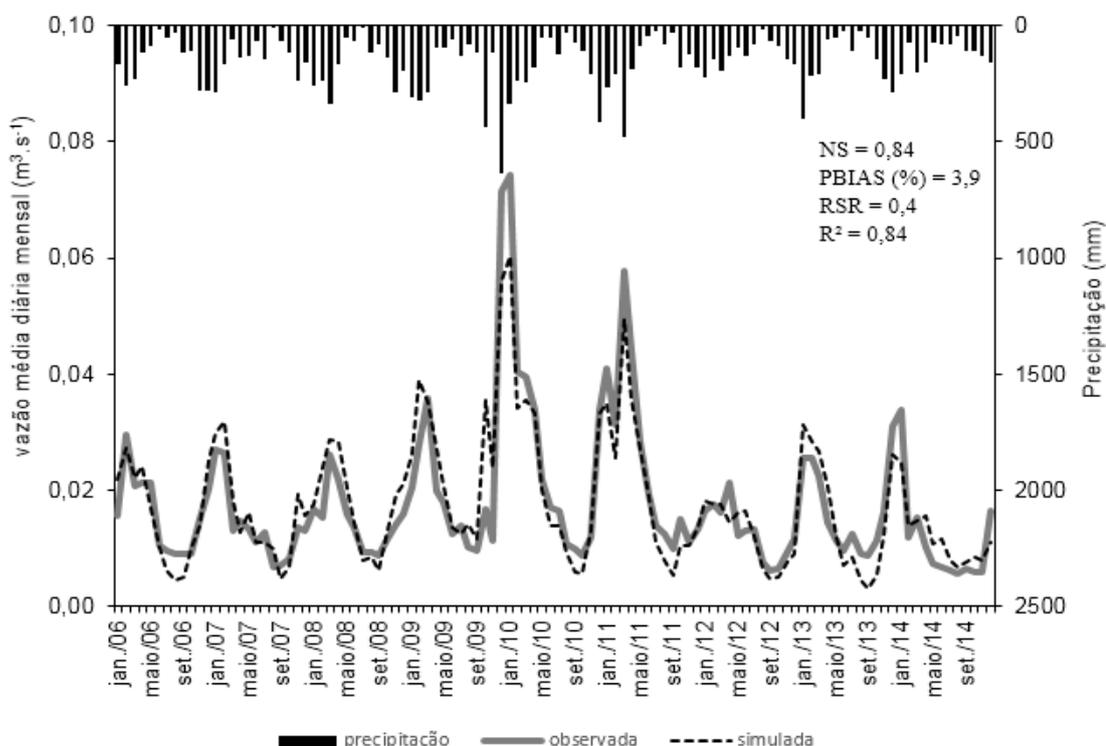
5.3 Validação

O valor médio após a validação dos dados observados e simulados foi semelhante ($0,018 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), com valor mínimo de $0,004 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ da vazão simulada e para a vazão observada foi de $0,006 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto para o valor máximo registrado da vazão simulada foi de $0,065 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,074 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Ocorreu superestimação nos picos simulados em fevereiro de 2007/2009, outubro de 2009 e janeiro de 2013 e a subestimação nas recessões simuladas em agosto de 2006, outubro de 2010, setembro de 2011 e 2013 (Figura 8).

Os valores dos índices estatísticos da qualidade dos resultados gerados na validação tiveram um desempenho classificado como “muito bom”, para os quatro parâmetros, NS (0,84), PBIAS (3,9%), RSR (0,4) e R^2 (0,84).

Figura 8. Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas e simuladas após a validação pelo modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 2006 até 2014.



Na validação os valores simulados acompanharam o padrão geral dos dados observados, identificando de forma adequada os picos e recessões da vazão, no entanto, observou-se que em alguns períodos a vazão observada esteve acima do simulados, ocorrendo dessa forma, uma subestimação, podendo ser explicado pela alteração dos valores de CN2, SOL_AWC e SOL_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo (FUKUNAGA et al., 2015).

Após a análise da estatística do período de validação, pôde-se confirmar a eficiência dos ajustes, tanto a vazão observada nos períodos de calibração e validação. Uma característica notável no período após a validação mostrou que os índices estatísticos foram superiores quando comparados ao período sem calibração e após a calibração.

Andrade et al. (2013) também encontraram períodos de validação com

eficiência superior ao período de calibração, enquanto Fukunaga et al. (2015), Pereira et al. (2016) e Dias et al. (2018) tiveram resultados diferentes deste estudo, no qual a melhor eficiência estatística foi no período calibrado ao invés da validação da vazão média mensal.

Paz et al. (2018) verificaram a calibração e validação mais eficientes em anos úmidos que em anos secos, em contraponto, Govender e Everson (2005) verificaram que o modelo foi superior em anos secos que anos úmidos.

De acordo com Pereira et al. (2016) muitos estudos com os valores NS relacionados ao SWAT variaram de 0,3 a 0,9, dependendo da área de drenagem da bacia, do intervalo de tempo da simulação e da base de dados disponível. Machado, Vettorazzi e Cruciani (2003) teve bons resultados sem calibrar, mas com a calibração do SWAT para a simulação do fluxo médio mensal da bacia tiveram os

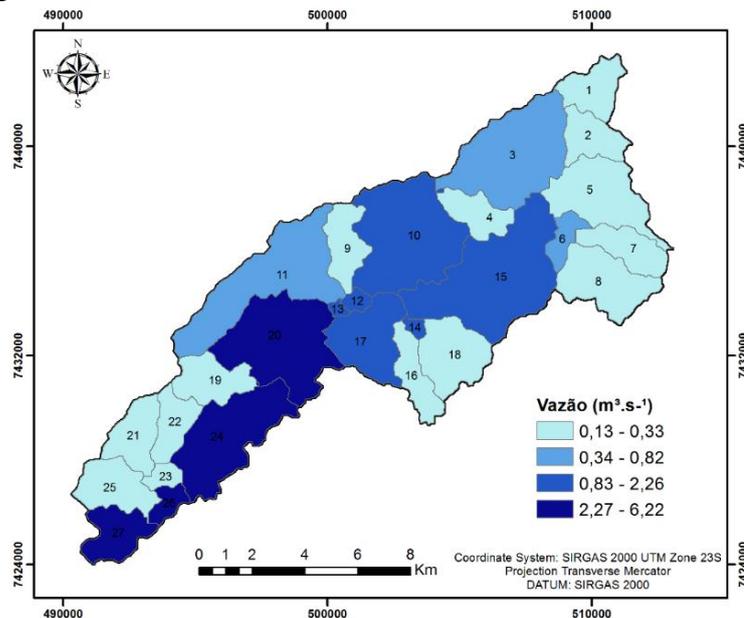
resultados estatísticos alterados para “muito bom”.

A qualidade dos dados do estudo é extremamente confiável e é um fator muito importante para obter o sucesso da modelagem. Fukunaga et al. (2015) trabalhou com uma série de dados com 45% de falhas e não encontrou boa correlação entre os dados observados no monitoramento e os dados estimados pelo modelo SWAT.

Os resultados obtidos na distribuição espacial da vazão estão próximos ao encontrado por Vilanova (2014), do qual seu trabalho foi realizado no mesmo trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, durante os anos de 1967 até 2011, com valores médios do exutório de $8 \pm 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Após a calibração e validação do modelo, foi realizado a simulação da distribuição espacial da vazão média diária mensal, referente aos 19 anos (1996 a 2014) e observou-se que em termo quantitativo do recurso hídrico, a contribuição do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna foi de $6,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. As partes mais elevadas contribuíram com os menores valores de vazão ($0,13$ até $0,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), enquanto as partes mais baixas contribuíram com os maiores valores de vazão ($2,27$ até $6,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ocasionando o acúmulo de água, ou seja, toda a água escoada das áreas mais elevadas é concentrada na área mais baixa da bacia. (Figura 9).

Figura 9. Distribuição espacial da média diária mensal de vazão no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, SP - Brasil.



6 CONCLUSÕES

O modelo SWAT foi calibrado e validado de forma adequada para uma CN média de 58,45.

Os resultados confirmaram a aplicabilidade do modelo, dessa forma,

pode servir como ferramenta para planejamento e gestão de políticas públicas dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, na região da Mata Atlântica.

O modelo hidrológico SWAT mostrou-se muito bom e apto para estimação de vazões e do balanço hídrico

no trecho estudado da bacia hidrográfica do rio Paraibuna.

autorização e apoio do estudo no Parque Estadual Serra do Mar – Núcleo Cunha.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo no doutorado (DS-1513206).

7 AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Florestal (Processo SMA Nº: 260108 - 008.317/2015) pela

8 REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs: a user manual**. Dubendorf: SFIASST, 2012.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 524, n. 1, p. 733-775, May 2015.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G.; LIMA, J. R. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SRINIVASAN, R. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 2, p. 440-453, 2017.

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

DIAS, V. S.; LUZ, M. P.; MEDERO, G. M.; NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, W. N.; MERELLES, L. R. O. Historical streamflow series Analysis applied to Furnas HPP reservoir Watershed using the SWAT model. **Water**, Basel, v. 10, n. 4, p. 1-13, Apr. 2018.

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

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 125, n. 2, p. 206-213, Feb. 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assesment Tool: historical development, applications, and future research directions.

American Society of Agricultural and Biological Engineers, Saint Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, July/Aug. 2007.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 3, p. 683-692, Feb. 2005.

IBGE. **Mapa de cobertura e uso da terra do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2014.

Disponível em:

ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/cobertura_e_uso_da_terra/mudancas/vetores.

Acesso em: 29 set. 2017.

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

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 147-155, jan./mar. 2003.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, May/June 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation**. Version 2009. College Station: Texas Water Resources Institute, 2011.

PAIM, J. B.; MENEZES, J. T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 3, n. 2, p. 5-14, 2009.

PAZ, Y. M.; GALVÃO, J. D.; HOLANDA, R. M.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Análise de sensibilidade e calibração espacial do modelo SWAT aplicado em uma bacia do litoral pernambucano através de dados climáticos observados e de reanálise. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 1, p. 371-388, 2018.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil Using the SWAT model part I: calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdam, v. 7, n. 3, p. 14-37, Sept. 2016.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

SANTOS, L. N. S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Aplicação do modelo Hidrobacia na microbacia do córrego Jaqueira, Espírito Santo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2103-2116, set./out. 2013.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, Hoboken, v. 30, n. 3, p. 453-462, June 1994.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 414/415, n. 1, p. 413-424, Jan. 2012.

VENEZIANI, Y.; CICCIO, V.; CÂMARA, C. D.; RANZINI, M.; ARCOVA, F. C. S. Análise das precipitações e das vazões de um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna-SP. **Instituto Florestal Série Registros**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 197-202, jul. 2009.

VIANA, J. F. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; SILVA, R. M.; SOUZA, W. S. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 3, n. 1, p. 155-172, jan. 2018.

VILANOVA, M. R. M. Tendências hidrológicas anuais e sazonais na bacia do rio Paraibuna, Parque Estadual da Serra do Mar (SP). **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 301-316, maio/ago. 2014.