

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CALIBRAÇÃO DIÁRIA DO MODELO SWAT PARA A BACIA REPRESENTATIVA DO RIO PIABANHA

Mariana Dias Villas-Boas^{1} & Filipe Jesus dos Santos² & Janaina G.Pires da Silva³ & Marcelo Parente Henriques⁴ & Marcio Junger Ribeiro⁵ & Rubens Esteves Kenup⁶ & Adriana Dantas Medeiros⁷ & José Paulo Soares de Azevedo⁸ & Francisco Olivera⁹*

RESUMO – Os modelos hidrológicos podem ser definidos como simplificações da realidade traduzidas através de parâmetros e equações. Eles são ferramentas efetivas para a representação do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Por outro lado, o projeto Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – EIBEX, de responsabilidade da CPRM, tem como objetivo a avaliação do comportamento hidrológico da bacia representativa do rio Piabanha. Assim, o modelo hidrológico SWAT foi calibrado, na escala diária, para essa bacia com o intuito de auxiliar na compreensão dos seus processos hidrológicos. O desempenho do modelo foi satisfatório com base nas métricas estatísticas (NSE=0,6; $R^2 = 0,7$; RSR = 0,6 e PBIAS=1). O modelo representou bem os picos e o escoamento de base.

ABSTRACT– Hydrological models are simplifications of reality translated through parameters and equations. They are effective tools for representing hydrological behavior of river basins. On the other hand, the project Integrated Studies in Experimental and Representative Basins - EIBEX aims to evaluate the hydrological behavior of the basin representative of the Piabanha river. Thus, the SWAT hydrological model was calibrated, on a daily basis, for this basin in order to assist in the understanding of hydrological processes and the interference of land use and occupation. The performance of the model was satisfactory based on statistical metrics (NSE = 0.6, $R^2 = 0.7$, RSR = 0.6 and PBIAS = 1). The model represented well the peaks and the base flow.

Palavras-Chave – modelagem hidrológica; SWAT; Bacias experimentais

¹ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - mariana.villasboas@cprm.gov.br

² CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – filipe.santos@cprm.gov.br

³ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – janaina.silva@cprm.gov.br

⁴ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – marcelo.henriques@cprm.gov.br

⁵ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – marcio.ribeiro@cprm.gov.br

⁶ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – rubens.kenup@cprm.gov.br

⁷ CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – adriana.medeiros@cprm.gov.br

⁸ UFRJ/COPPE – zepaulo@coc.uftj.br

⁹ Texas A&M University – folivera@civil.tamu.edu

INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como simplificações da realidade traduzidas através de parâmetros e equações (VILLAS-BOAS, 2018). Segundo TUCCI (1998), a representação dos processos hidrológicos através de modelos é a forma encontrada pelo hidrólogo para estudar os diferentes componentes da parte terrestre do ciclo hidrológico relacionados às interações antrópicas. Os chamados modelos “chuva-vazão” são aqueles que possuem, no mínimo, como variável de entrada a precipitação e como variável de saída, a vazão em determinado ponto, ou seja, representam matematicamente a transformação da chuva em vazão. Dependendo da complexidade do modelo, pode haver mais variáveis de entrada (i.e. dados de evapotranspiração) e parâmetros (i.e. parâmetros que descrevem as propriedades do solo) para descrever esse processo de transformação (VILLAS-BOAS, 2018).

O projeto Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – EIBEX teve início no ano de 2007 e tem como objetivo a avaliação do comportamento hidrológico em região com bioma natural Mata Atlântica, e em áreas de ocupação agrícola e urbanizada e visa desenvolver pesquisa e estudos na área de hidrologia, com ênfase em: climatologia, qualidade da água, solos, GIS, e também o uso de diferentes tecnologias de medição de dados com base em uma rede de monitoramento hidrometeorológico (VILLAS-BOAS *et al.*, 2017). Assim, o uso da modelagem hidrológica representa uma boa ferramenta para auxiliar o desenvolvimento do projeto.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é a apresentação e avaliação da calibração diária do modelo SWAT para a bacia representativa do rio Piabanha a fim de representar o seu comportamento hidrológico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo – Bacia Representativa do Rio Piabanha

A área de estudo selecionada para o trabalho está inserida na bacia do rio Piabanha, uma das principais sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul. O rio Piabanha é afluente pela margem direita do rio Paraíba do Sul cuja bacia ocupa uma área de aproximadamente 2.050 km², a maior parte inserida na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (VILLAS-BOAS *et al.*, 2011).

Nessa bacia funciona o projeto Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – EIBEX, desde 2007, onde o Serviço Geológico do Brasil –

CPRM opera uma rede hidrometeorológica com 13 estações, sendo 9 estações fluviométricas listadas no Quadro 1. Esta rede está inserida em uma bacia representativa, com cerca de 400km², correspondente a área de drenagem da estação Pedro do Rio (seção de controle da bacia) que reúne as características de uso de solo e vegetação da bacia do rio Piabanha para que os resultados possam ser utilizados na gestão de recursos hídricos. Dentro desta área, foram definidas três bacias experimentais, onde predominam os diferentes usos do solo existentes: em área de mata Atlântica preservada, em área predominantemente de uso agrícola e área de ocupação urbana, respectivamente, com as seguintes áreas: 47km², 30km² e 13km², representadas na Figura 1 (ARAÚJO *et al.*, 2007).

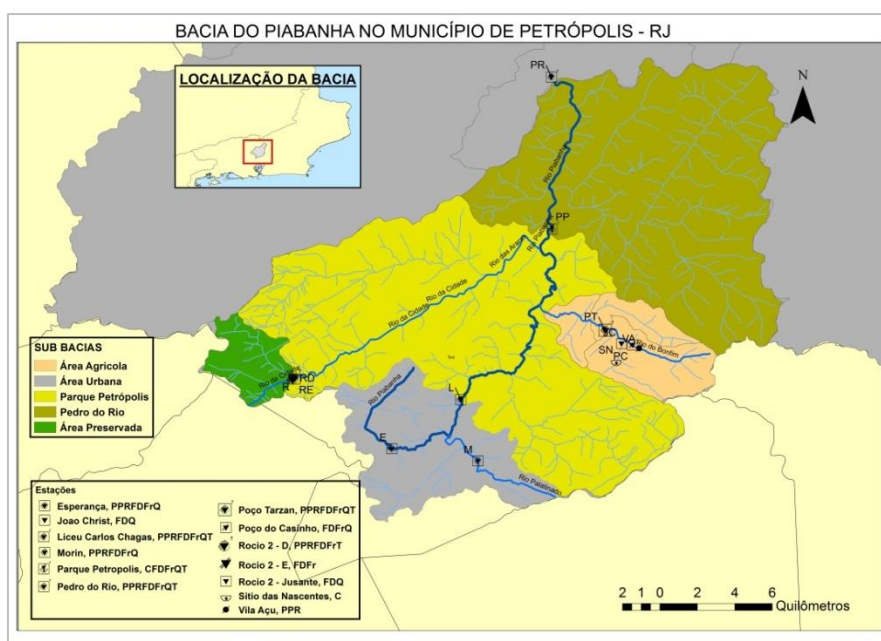


Figura 1 - A Rede de Monitoramento Hidrometeorológica, as bacias experimentais e a bacia representativa do projeto EIBEX (VILLAS-BOAS *et al.*, 2017).

Quadro1 – Estações fluviométricas da bacia representativa do Rio Piabanha.

ESTAÇÃO	CÓDIGO	CURSO D'AGUA	LATITUDE	LONGITUDE	Bacia Exp.
Rocio 2 (R)	58400212	Rio da Cidade	22° 28' 39"	43° 15' 25"	Preservada
Esperança (E)	58400010	Rio Piabanha	22° 30' 39"	43° 12' 37"	Urbana
Liceu (L)	58400050	Rio Piabanha	22° 29' 14"	43° 10' 38"	Urbana
Morin (M)	58400030	Rio Palatinado	22° 31' 00"	43° 10' 08"	Urbana
Poço Tarzan (PT)	58400110	Rio Bonfim	22° 27' 14"	43° 06' 28"	Agrícola
Poço Casinho (PC)	58400104	Rio Açú	22° 27' 40"	43° 05' 41"	Agrícola
Joao Christ (JC)	58400108	Rio Alcobaça	22° 27' 38"	43° 06' 00"	Agrícola
Pq.Petropolis (PP)	58400250	Rio Quitandinha	22° 24' 19"	43° 08' 00"	-
Pedro do Rio (PR)	58405000	Rio Piabanha	22° 19' 56"	43° 08' 01"	-

Modelagem Hidrológica SWAT

Nesse trabalho, a modelagem hidrológica foi desenvolvida utilizando o modelo SWAT. O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo de domínio público desenvolvido conjuntamente pelo Departamento Agrícola americano (USDA/ARS) e pelo Texas A & M AgriLife Research Department da Universidade Texas A&M. SWAT é um modelo físico, semi-distribuído e complexo baseado em escala de bacia hidrográfica, que funciona em um passo de tempo diário (VILLAS-BOAS, 2018). Seu principal objetivo é a avaliação do impacto, a longo prazo, das mudanças no uso de solo nas componentes terrestres do ciclo hidrológico. O modelo SWAT pode simular os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, o transporte de sedimentos, nutrientes, pesticidas e bactérias da bacia modelada (ARNOLD *et al.*, 1998).

- Seleção dos dados

O modelo SWAT foi calibrado para a bacia representativa usando os dados das nove estações da rede. Optou-se em usar a série toda para calibração no período de 2009 a 2012, sendo os anos 2007 e 2008 usados para aquecimento do modelo. Basicamente, o SWAT requer quatro tipos de informações de entrada referentes à área de estudo que devem ser fornecidos pelo usuário (mais detalhes em VILLAS-BOAS, 2018):

- a. O modelo digital de elevação (MDE);

O modelo digital de elevação foi fornecido a partir do SRTM, inicialmente, com resolução de 90m, que foi substituído pelo de 30m.

- b. Informações sobre uso e ocupação do solo;

Foi utilizado o mapa de uso e ocupação do solo na escala 1:25.000 projetado em UTM-WGS_84- 23S.

- c. Os tipos de solo;

As informações sobre os tipos foram reunidas com base no mapa elaborado pelo levantamento realizado pela Embrapa.

- d. Dados climáticos.

O SWAT utiliza cinco variáveis climáticas: precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Assim, foram reunidos dados diários de estações pluviométricas e climatológicas de diferentes redes de monitoramento: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013), The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (NCEP/CFSR, 2013), Rede Nacional Hidrometeorológica e da

rede hidrometeorológica da bacia representativa do Piabanha (mais detalhes em VILLAS-BOAS, 2018).

e. Dados de vazão e qualidade de água.

Foram selecionadas as séries de vazões diárias da estação Pedro do Rio para a calibração da bacia representativa apresentada na Figura 2. As séries foram determinadas a partir de dados convencionais (i.e. 2 leituras de réguas diárias por observador hidrológico) e passaram por uma avaliação preliminar para retirada de inconsistências e correção de algumas falhas. De um modo geral, a estação Pedro do Rio apresenta uma série consistente com pouquíssimas falhas. Foram excluídos da análise os dados de vazão de janeiro de 2011 relativos ao evento chuvoso crítico que ocorreu nas cabeceiras da bacia do Piabanha, pois as estações pluviométricas integrantes da modelagem não registraram o evento.

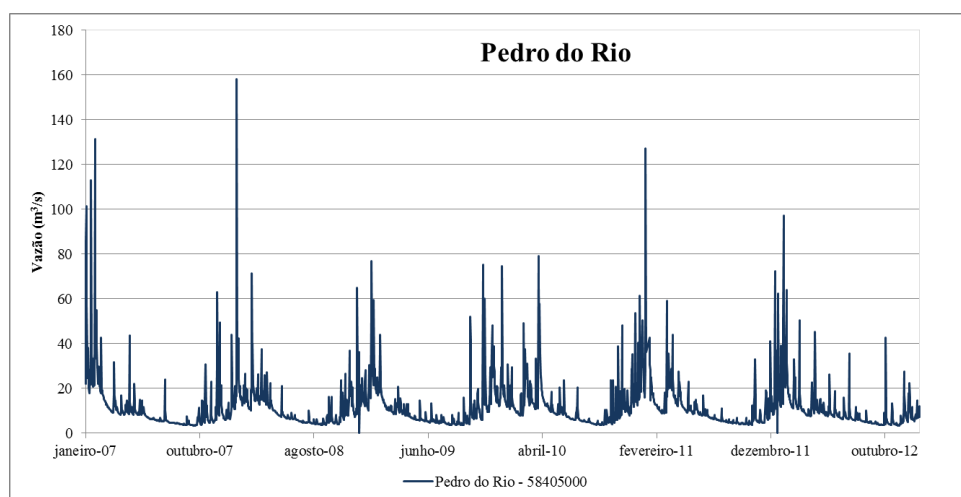


Figura 2 – Vazões diárias para a estação Pedro do Rio.

- Parâmetros da simulação hidrológica

A simulação hidrológica para área de estudo foi realizada a partir da versão do modelo ArcSWAT 2012.10_3.19. A análise de sensibilidade e calibração do modelo foram executadas com o auxílio do software SWAT-CUP 5.1.6.2. As etapas desenvolvidas compreenderam basicamente: a delimitação da bacia, sub-bacias e rede hidrográfica com base no modelo digital de elevação produzido a partir do SRTM e na definição dos exutórios das sub-bacias; definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU's); alimentação do banco de dados da bacia com os dados climáticos; análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo; verificação do modelo definido a partir da compreensão do comportamento hidrológico da bacia simulação; calibração e validação dos cenários (mais detalhes em VILLAS-BOAS, 2018). O Quadro 2 apresenta os parâmetros mais sensíveis para a bacia utilizados na calibração.

- Calibração Diária

Nesse trabalho, foi utilizada uma calibração semi-automática com auxílio do programa SWATCup (algoritmo SUFI2), ARC SWAT e SWAT (VILLAS-BOAS, 2018). A calibração diária do modelo apresentada foi realizada tendo como base os resultados da calibração na escala mensal da bacia (VILLAS-BOAS, 2018). Em outras palavras, primeiramente foi realizado o ajuste dos parâmetros com base nos dados mensais do modelo e, em seguida, com o modelo ajustado, foi realizada a calibração com os dados diários. Não foi realizada validação temporal em razão da série ser pequena e, assim, ser recomendável a utilização de todos os dados para a calibração (ARNOLD *et al.*, 2012). Foram definidos dois anos de período de inicialização do modelo para a calibração (2007 e 2008) para permitir a minimização de possíveis efeitos das estimativas iniciais das variáveis.

A Bacia Representativa do rio Piabanha foi dividida em 31 sub-bacias (Figura 3), a partir da combinação dos dados de uso e ocupação do solo, solos e declividade, resultaram em 370 unidades de resposta hidrológica (HRU) (VILLAS-BOAS, 2018).

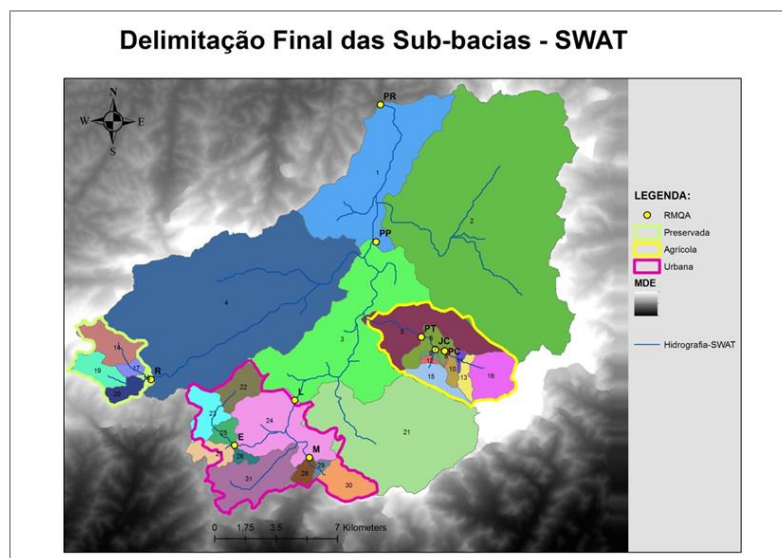


Figura 3 - Mapa da área de estudo com a delimitação final em sub-bacias do SWAT (VILLAS-BOAS, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 corresponde a saída gráfica do programa SWATCup, após a calibração do modelo, com as vazões diárias observadas (azul) e simuladas pelo modelo (vermelha) para estação Pedro Rio bem como o intervalo de confiança de 95% (verde). A Figura 5 ilustra as vazões diárias observadas (azul) e simuladas (vermelho) para estação Pedro do Rio para o período de análise (2009-2012). O Quadro 2 apresenta os valores ajustados dos parâmetros mais sensíveis para a bacia

após a calibração, tanto mensal como diária. Quadro 3 apresenta os valores das métricas estatísticas utilizadas para avaliação do desempenho do modelo, que são as comumente utilizadas nas aplicações do modelo SWAT (MORIASI *et al.*, 2015) e os valores calculados para cada uma após a calibração. São elas: o coeficiente de eficiência Nash e Sutcliffe (NSE); “PBIAS”, que mede o percentual da tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados; o Coeficiente de Determinação (R²); “RSR” que a razão entre a raiz do erro médio quadrático (RMSE) pelo desvio padrão das observações.

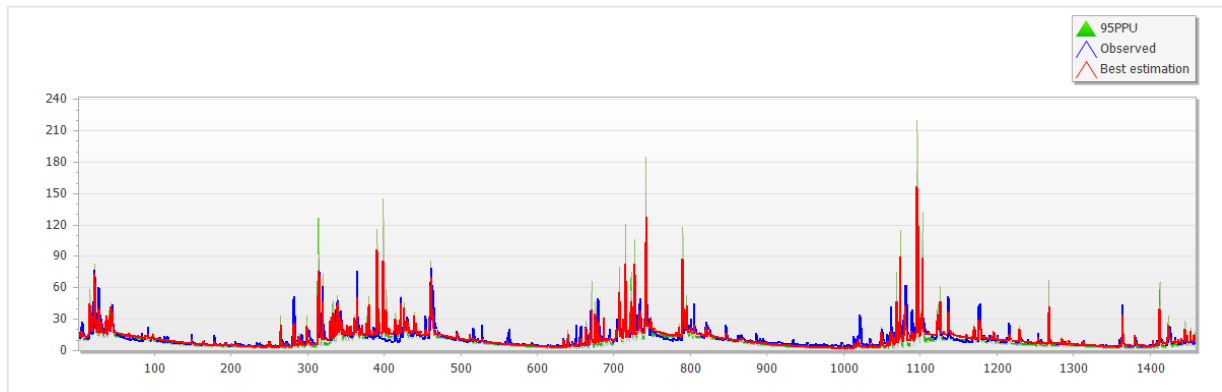


Figura 4 – Vazões diárias observadas, simuladas e intervalo de confiança de 95% para a estação Pedro Rio.

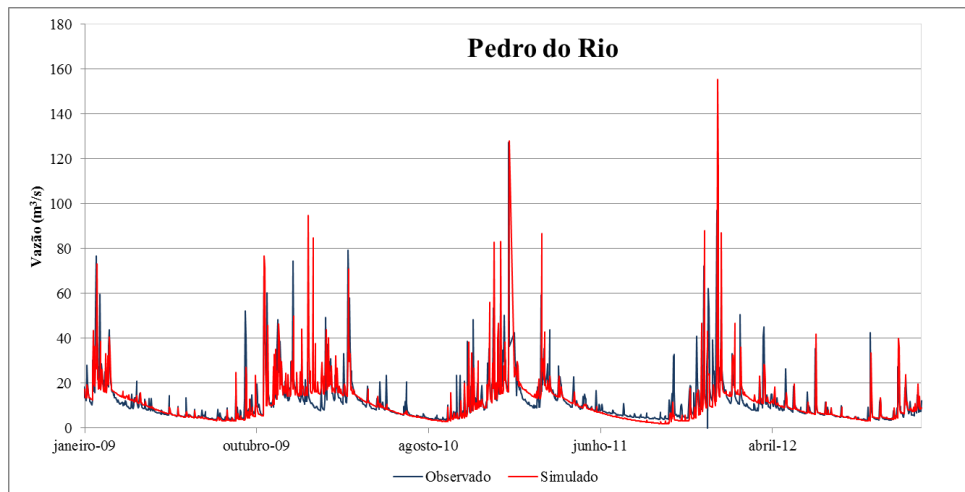


Figura 5 – Vazões diárias observadas e simuladas após a calibração do SWAT para o período de análise.

Quadro 2 – Parâmetros mais sensíveis para a bacia representativa e seus valores após a calibração.

Parâmetros	Descrição do significado físico do parâmetro	Faixa de Medição		Valor do parâmetro após calibração	Escala	
		Valor mínimo	Valor máximo			
1	v_RCHRG_DP.gw	Fração profunda de percolação do aquífero	0	1	0,79	DIÁRIA
2	v_CANMX.hru	Armazenamento máximo das folhas	0	15	10,04	
3	v_ESCO.hru	Fator de compensação da evaporação do solo	0,6	0,9	0,67	
4	v_GW_REVAP.gw	Coefficiente de reabastecimento da água subterrânea	0	0,2	0,02	
5	r_CN2.mgt	Coefficiente curve number SCS	-10%	10%	-0,10	
6	v_CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal.	1	8	1,64	MENSAL
7	v_CH_K1.sub	Condutividade hidráulica efetiva dos tributários.	3	10	8,21	
8	v_LAT_TTIME.hru	Tempo de retorno do fluxo lateral	50	150	78,83	
9	v_SLSOIL.hru	Comprimento da rampa lateral para fluxo de sub-superfície	0	50	0,08	
10	v_SURLAG.bsn	Coefficiente do lag do escoamento superficial	5	20	16,27	
11	CH_N2.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal.	0,05	0,15	0,49	
12	CH_N1.sub	Coefficiente de Manning para s tributários.	0,5	0,15	0,21	

Quadro 3 - Métricas estatísticas para avaliação do desempenho do modelo e valores após a calibração do modelo (MORIASI et al., 2015).

Avaliação do desempenho	R ²	RSR	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	-	0,00 ≤ RSR ≤ 0,50	0,80 < NSE ≤ 1,00	PBIAS < ±5
Bom	-	0,50 < RSR ≤ 0,60	0,70 < NSE ≤ 0,80	±5 ≤ PBIAS < ±10
Satisfatório	RSR > 0,70	0,60 < RSR ≤ 0,70	0,50 < NSE ≤ 0,70	±10 ≤ PBIAS < ±15
Insatisfatório	RSR < 0,70	RSR > 0,70	NSE ≤ 0,50	PBIAS ≥ ±15
VALORES APÓS CALIBRAÇÃO	0,7	0,6	0,6	1

É possível observar que o modelo representou bem a maioria dos picos de vazão. Nota-se um ótimo ajuste para as vazões de base, principalmente, para os anos de 2009 e 2012. Com base nas métricas estatísticas podemos qualificar o desempenho do modelo como satisfatório (R² e NSE), bom (RSR) e muito bom (PBIAS).

CONCLUSÃO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta efetiva para representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. A calibração do modelo SWAT apresentou um desempenho minimamente satisfatório para a bacia representativa do rio Piabanha com base nas métricas

estatísticas selecionadas. Os dados simulados representaram bem a maioria dos picos e as vazões mínimas da bacia.

Recomenda-se que seja feita a calibração utilizando os dados das demais estações da Rede Hidrometeorológica da bacia representativa para avaliar se elas oferecem melhoria na calibração.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas Achiles Monteiro (*in memoriam*) e Lígia Araújo pelo apoio e incentivo e ao MCT / FINEP / CT-HIDRO e Coordenação da Melhoria do Pessoal de Educação Superior - CAPES – Brasil (MEC / MCTI / CAPES / CNPq).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. M. N.; MORAIS, A.; VILLAS-BOAS, M.D. et al Estudos Integrados de Bacias Experimentais Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piabanha. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11., 2007, São Paulo. Anais.
- ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., et al., 2012, “Swat: model use, calibration, and validation”, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55(4), pp. 1491-1508.
- ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., et al., 2012, “Swat: model use, calibration, and validation”, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55(4), pp. 1491-1508.
- INMET, 2013 – <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas> Acesso em 9/10/2013
- MORIASI, D.N., GITAU, M. W., PAI, N., DAGGUPATI, P., 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 58, 1763-1785.
- NCEP/CFSR, 2013 – Texas A&M Agrilife Research. Global Weather Data for SWAT. College Station, TX - <https://globalweather.tamu.edu/> - Acesso em 20/09/2013.
- TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos, 1998. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p
- TUCCI, C. E. M. Regionalização das Vazões - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - IPH – UFRGS. Porto alegre, 2000
- VILLAS-BOAS, M.D., BASTOS, A.O., ARAÚJO, L.M.N., SILVA, F.J., MONTEIRO, A.E.G.C., 2011. Manejo do uso do solo como mecanismo regulatório da gestão da qualidade da água - estudo de caso: a bacia do rio Piabanha. In: XIVth IWRA World Water Congress, Porto de Galinhas.
- VILLAS-BOAS, M.D., SANTOS, F.J., SILVA, J.G.P., HENRIQUES, M.P., RIBEIRO, M. J., MEDEIROS, A.D., AZEVEDO, J.P.S., OLIVERA, F.O., 2017. Os 10 anos do projeto institucional da CPRM: Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – conquistas e desafios futuros. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos 2017, Florianópolis/SC.
- VILLAS-BOAS, M.D., 2018, Ferramentas para avaliação da rede de monitoramento de qualidade de água da bacia do rio Piabanha – RJ com base em redes neurais e modelagem hidrológica, 153 p., Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.