

AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA SUB-BACIA DO RIO DOS BUGRES (SC)

Eduardo Nascimento Manara¹, Thawara Giovanna Souza da Fonseca Guidolin² & Gean Paulo Michel³

RESUMO – O presente estudo contempla a avaliação do modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) como ferramenta de simulação do fluxo hidrossedimentológico em uma sub-bacia do rio dos Bugres-SC com um curto período de dados medidos. A modelagem foi realizada a partir de parâmetros do solo e da inserção de uma série de dados climatológicos definidos gerados para uma região próxima ao local de estudo, além de dados de chuva (médias diárias) e de temperatura (máximas e mínimas diárias) medidos em uma estação na bacia de estudo durante um período sem falha de dados. O modelo foi simulado contemplando apenas um período de calibração e comparado com dados medidos de vazão e descarga sólida. Ao longo das simulações alguns parâmetros do solo foram variados a fim de refinar a correlação entre os dados medidos e simulados. Os resultados obtidos foram comparados através de métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe e erro de volume e se apresentaram satisfatórios, o que indica que, o modelo foi capaz de refletir em uma boa calibração, porém para que se possa inferir que ele representa os processos hidrossedimentológicos da bacia é necessário que haja uma futura validação do modelo.

ABSTRACT– The present study contemplates the evaluation of the SWAT model (*Soil & Water Assessment Tool*) as a tool to simulate the hydrosedimentological flow in a subbasin of the Bugres river-SC with a short period of measured data. The modeling was performed based on soil parameters and the insertion of a series of defined climatological data generated for a region near the study site, in addition to rainfall (daily averages) and temperature (maximum and minimum daily) measured in a station in the study basin for a period without data failure. The model was simulated by templating only one calibration period and compared with measured data of flow and solid discharge. Along the simulations some soil parameters were varied in order to refine the correlation between the measured and simulated data. The results obtained were compared by Nash-Sutcliffe performance metrics and volume error and presented satisfactory values, which indicates that the model was able to reflect on a good calibration, but to infer that it represents the hydrosedimentological basin processes it is necessary that there is a future validation of the model.

Palavras-Chave – Produção de Sedimentos, Modelo SWAT, Rio dos Bugres

INTRODUÇÃO

Com o decorrer do tempo, a ação antrópica sobre o meio ambiente vem se intensificando, culminando na modificação das paisagens e em sérias consequências quanto à degradação ambiental, principalmente no que tange o solo e os recursos hídricos. Com o avanço computacional, a modelagem hidrossedimentológica surge como uma ferramenta que auxilia no diagnóstico e avaliação dos impactos causados em bacias hidrográficas, além de auxiliar na proposição de alternativas de planejamento, necessárias para uma gestão adequada nas bacias (SOUZA *et al.*, 2009).

1) Graduando em Engenharia Hídrica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), eduardonmanara@gmail.com

2) Graduanda em Engenharia Hídrica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), thawara.guidolin@gmail.com

3) Professor do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH-UFRGS), geanpmichel@gmail.com

Nesse contexto, cresce a aplicação de modelos de simulação contínua, já que estes são capazes de representar fenômenos ao longo do tempo e sem saltos temporais; entretanto, as grandes incertezas relacionadas às condições iniciais da modelagem fazem com que seja necessário a utilização de um período de aquecimento, onde se utiliza uma parcela da série histórica no início da simulação para desvincular as variáveis da modelagem da influência imposta pelas condições iniciais inseridas (PEREIRA, 2013), não sendo este período de dados posteriormente utilizado nos processos de calibração e validação do modelo.

Para a aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) sugere-se a utilização de dois anos de dados como período de aquecimento (NEITSCH *et al.*, 2009). Dispondo de apenas sete meses de dados oriundos de monitoramento hidrossedimentológico na bacia hidrográfica do rio dos Bugres (SC), este trabalho visa avaliar a aplicação do modelo SWAT na bacia, não utilizando período de aquecimento para a simulação, tendo em vista a curta extensão da série de dados disponível. Os dados de vazão e produção de sedimentos obtidos com a simulação foram comparados aos valores medidos no exutório da bacia, de forma que foi possível avaliar a aplicabilidade do modelo nestas condições e a confiabilidade de seus resultados.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia hidrográfica utilizada para a aplicação do modelo SWAT está localizada no município de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina (Figura 1). A área está localizada no norte do estado, distante cerca de 93 km do município de Joinville, e caracteriza-se por um clima temperado, com precipitações médias anuais de aproximadamente 1700 mm (CPRM, 2018).

O Modelo SWAT

O modelo SWAT – *Soil and Water Assessment Tool* (Arnold *et al.*, 1998), desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (ARS/USDA), permite a modelagem de bacias hidrográficas para uma ampla gama de cenários, gerando respostas em relação a condições hidrológicas (SOUZA, 2016), como por exemplo vazão, além de produção de sedimentos, qualidade da água, etc. Por gerar diversos tipos de dados e, também, possibilitar a modelagem de grandes bacias hidrográficas, o modelo é altamente parametrizável, o que dificulta sua aplicação em bacias sem dados.

O modelo foi utilizado acoplado ao software ArcGIS®, uma ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os *databases* disponibilizados pelo software para aplicação, que contém parâmetros e informações referentes à tipo, uso e ocupação do solo, estações climáticas, entre

outros, são referentes às condições observadas nos Estados Unidos, onde o software foi desenvolvido. Estes parâmetros podem ser modificados e novas informações inseridas no *databases* do software.

O SWAT é um modelo contínuo que representa os processos hidrossedimentológicos por bases físicas. A modelagem envolve a divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs) para as quais a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) é utilizada para calcular a erosão do solo em cada URH.

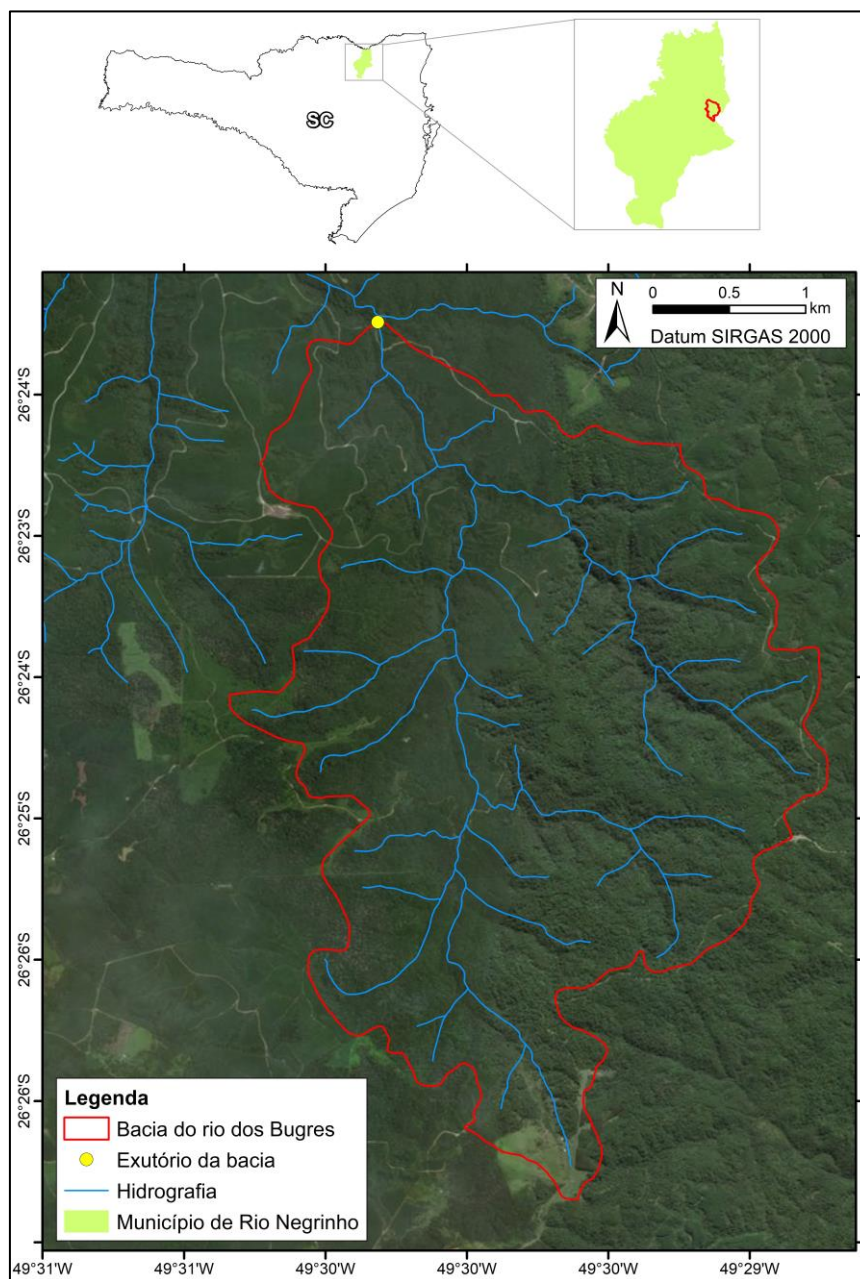


Figura 1 – Bacia do Rio dos Bugres.

Dados de Entrada no Modelo

Para a simulação, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) do estado de Santa Catarina (WEBER *et al.*, 2004). A partir disso, empregou-se a ferramenta *Watershed Delineator* para definir a drenagem da bacia, bem como gerar exutórios ao longo dos trechos de rio. Dos exutórios gerados

automaticamente pelo software, seis deles foram escolhidos para representar o comportamento da bacia hidrográfica, e as sub-bacias correspondentes geradas pelo software. A partir disso, um arquivo *shapefile* com o levantamento do tipo de solo presente na bacia foi inserido (IFFSC, 2018), bem como um arquivo *raster* de uso e ocupação do solo. A inserção destes arquivos foi necessária para que o software seja capaz de processar a resposta da bacia a condições hidrológicas que posteriormente serão definidas, a partir das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). A Tabela 1 apresenta os parâmetros inseridos para o tipo de solo presente na bacia (Cambissolo Háplico), e a Tabela 2 apresenta as classes consideradas de uso e ocupação do solo (avaliadas aqui como equivalentes às apresentadas no *database* original do software) e o fator C da USLE.

Tabela 1 – Valores considerados para os parâmetros de tipo de solo.

Parâmetro	Descrição	Valor
SNAM	Nome do solo	Cambissolo
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D)	C
SOL_ZMX	Profundidade máxima enraizada (mm)	1500
ANION_EXCL	Fração de porosidade	0,6
SOL_CRK	Volume de rachadura	0,5
TEXTURE	Textura do solo	C
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)	1200
SOL_BD	Densidade aparente (úmida) (g/cm ³)	1,4
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada do solo (mmH ₂ O/cm ³)	0,05
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)	84,3
SOL_CBN	Carbono orgânico (% de peso de solo)	2,2
SOL_CLAY	% de partículas do solo que são < 0,002mm de diâmetro	36,4
SOL_SILTE	Silte (% de peso de solo)	15,8
SOL_SAND	% de partículas que têm entre 2,0 e 0,05 mm de diâmetro	33,4
SOL_ROCK	% da amostra que tem um diâmetro de partículas > 2 mm	14,4
SOL_ALB	Albedo	0,2
USLE_K	Fator de erodibilidade	0,0175
SOL_PH	pH do solo	7
SOL_EC	Condutividade elétrica (DS/m)	0

Fonte: ANTUNES, 2015; IFFSC, 2018.

Tabela 2 – Classes de uso e ocupação do solo e suas porcentagens na bacia.

Área (%)	Uso e ocupação do solo	Redefinição para classe no modelo SWAT	Fator C
4,028	Pastagem	PAST - Pasture	0,003
2,261	Agricultura	AGRL - Agricultural	0,2
0,141	Água	WATR - Water	0
0,353	Solo Exposto	BARR - Barren	0,2
0,283	Urbanização	URBN - Residential	-
85,088	Mata Nativa	FRSE - Forest-Evergreen	0,001
7,845	Reflorestamento	PINE - Pine	0,003

Fonte: Neitsch *et al.*, 2009.

Após a geração das URHs (contabilizadas em 47 diferentes unidades), procedeu-se a inserção das estações climáticas. Foi inserida uma estação para a simulação, localizada junto ao exutório da bacia (Figura 1), com dados diários de precipitação e temperatura (máximas e mínimas), que englobam o período de 16 de dezembro de 2011 a 09 de julho de 2012. A descrição dos parâmetros inseridos no *database* do software para posterior simulação climática está apresentada na Tabela 3, obtida através de Antunes (2015) para uma região próxima ao local de estudo. A partir da inserção desses dados e atualização do *database* utilizado, foi possível realizar a simulação.

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros utilizados na simulação climática.

Parâmetro	Descrição
TMPMX	Temperatura máxima média mensal (°C)
TMPMN	Temperatura mínima média mensal (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima no mês (°C)
PCPMM	Total médio de chuva no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para o total médio de chuva (mm)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia seco seguido de um dia chuvoso no mês
PR_W2	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês
PCPD	Média Mensal de dias com chuva
RAINHMX	Chuva máxima mensal em 0,5 h (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ/m ²)
DEWPT	Umidade relativa média no mês (decimal)
WNDVAV	Velocidade média diária do vento no mês

Fonte: ANTUNES, 2015.

Devido ao curto período de dados observados optou-se por não dividir o período de simulação entre calibração e validação, tendo como intuito principal a avaliação de uma possível calibração do modelo SWAT para uma região de curto período de dados observados disponíveis e excluindo-se o período de aquecimento indicado.

RESULTADOS

Após a simulação, uma série de informações foi disponibilizada pelo software, entre elas dados de vazão e produção de sedimentos, em escala diária, para cada uma das seis sub-bacias delimitadas, bem como valores discretizados por Unidade de Resposta Hidrológica. As informações aqui apresentadas referem-se aos valores gerados para toda a bacia hidrográfica em estudo. Os gráficos comparativos entre a resposta do modelo e o valor observado para vazão e a produção de sedimentos na bacia são apresentados na Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

Através das simulações o modelo se mostrou mais sensível a parâmetros de escoamento superficial e subsuperficial, à textura e ao tipo de cobertura do solo. Sendo assim os valores

apresentados foram obtidos através da calibração desses parâmetros do modelo, modificando-os em sucessivas simulações, sendo os resultados comparados com os dados observados através de métricas de desempenho. A calibração foi considerada suficiente quando as métricas de desempenho atingiram valores satisfatórios. A Tabela 4 apresenta os parâmetros que foram modificados no modelo.

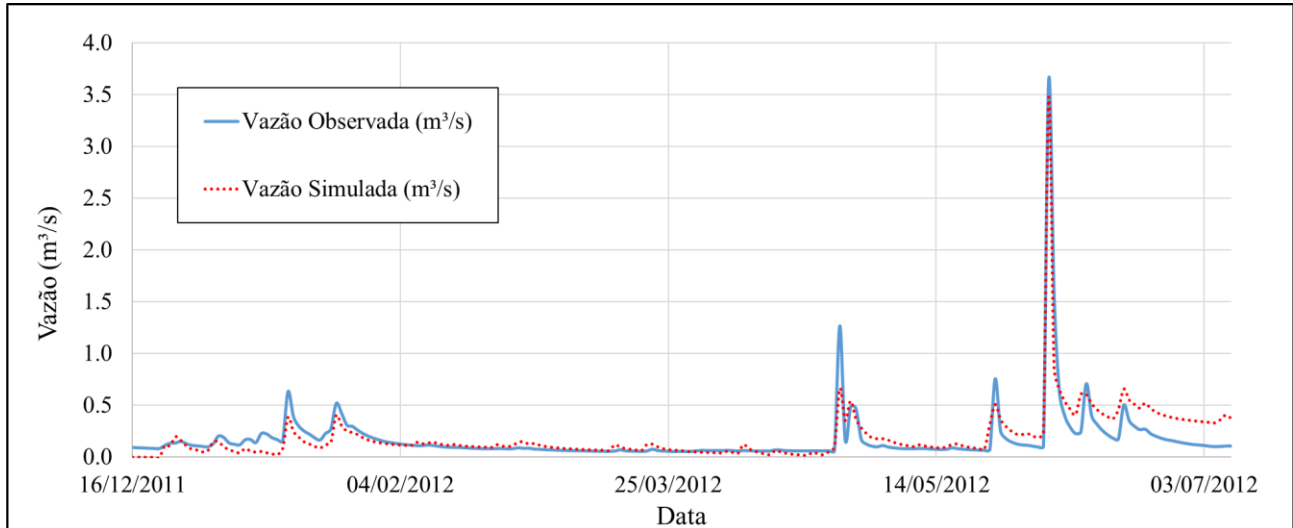


Figura 2 – Comparação entre a vazão observada e simulada pelo modelo SWAT.

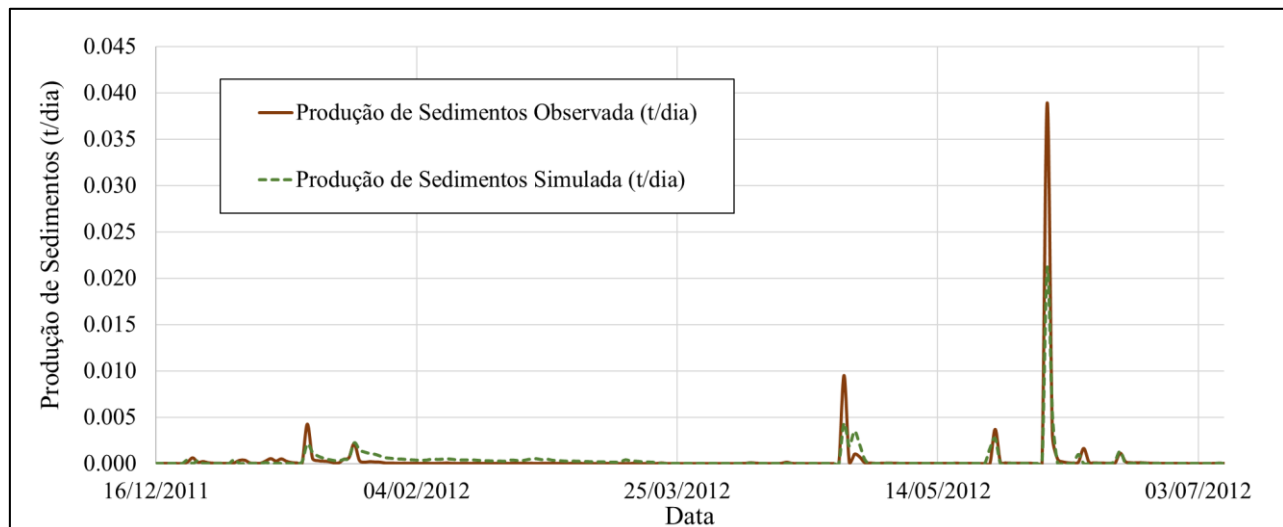


Figura 3 – Comparação entre a produção de sedimentos observada e simulada pelo modelo SWAT.

Tabela 4 – Parâmetros do solo modificados para a calibração do modelo.

Parâmetros do Solo		
Parâmetro	Descrição	Valor
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D)	A
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)	2.950
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada do solo (mmH ₂ O/cm ³)	0,185
SOL_CLAY	% de partículas do solo que são < 0,002mm de diâmetro	40,4
SOL_SILTE	Silte (% de peso de solo)	21,8
SOL_SAND	% de partículas que têm entre 2,0 e 0,05 mm de diâmetro	4,4
SOL_ROCK	% da amostra que tem um diâmetro de partículas > 2 mm	14,4

Parâmetros do Solo		
Classes de Usos e Ocupação do Solo		
Classe	Fator	Valor
AGRL	C - USLE	0,06
PINE	C - USLE	0,001

Os valores gerados através da simulação foram avaliados segundo as métricas de desempenho do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH) e do erro de volume (ΔV) de acordo com as equações abaixo:

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q_i^{obs}})^2} \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^{sim} - \sum_{i=1}^n Q_i^{obs}}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} \cdot 100 \quad (2)$$

Nas quais: *NASH* é o coeficiente de Nash-Sutcliffe; *n* é o número de dados observados e simulados; Q_i^{obs} é a vazão observada [m³/s]; Q_i^{sim} é vazão simulada [m³/s]; e $\overline{Q_i^{obs}}$ é a média das vazões observadas [m³/s] e ΔV é o erro de volume [%].

Para avaliação das métricas de desempenho geradas para a modelagem foram utilizados os indicativos do trabalho de Moriasi *et al.* (2007) que apresenta faixas indicativas da performance dos modelos hidrológicos e de sedimento para valores mensais de acordo com a Tabela 5. Os valores dos coeficientes calculados para a simulação no Rio dos Bugres se encontram na Tabela 6.

Tabela 5 - Faixas de performance para escala de tempo mensal.

Performance	NASH	ΔV	
		Vazão	Sedimento
Muito Bom	0,5 – 1,0	$\leq \pm 10$	$< \pm 15$
Bom	0,65 – 0,75	$\pm 10 - \pm 15$	$\pm 15 - \pm 30$
Satisfatório	0,5 – 0,65	$\pm 15 - \pm 25$	$\pm 30 - \pm 55$
Insatisfatório	$\leq 0,5$	$> \pm 25$	$> \pm 55$

Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 6 - Métricas de desempenho obtidas nas simulações.

Modelo	NASH	ΔV
Vazão	0,824	13,07
Sedimento	0,768	-3,92

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo na bacia escolhida gerou resultados simulados satisfatórios, quando comparados aos dados observados no local. Ambas as simulações, vazão e sedimentos, apresentaram

valores considerados muito bons para métrica de desempenho de Nash-Sutcliffe, muito bons para o erro de volume da modelagem de sedimentos e bons para o erro de volume da modelagem hidrológica.

Os resultados obtidos configuram-se promissores, visto que as faixas de performance indicadas por Moriasi *et al.* (2007) consideram para as simulações uma escala de tempo mensal na qual muitos erros em escala de tempo menores se suavizam a partir da média dos valores, indicando que o modelo para a bacia em questão apresenta uma boa representação dos processos hidrossedimentológicos mesmo com poucos dados observados e sem o aquecimento prévio do modelo SWAT.

Entretanto, apesar do bom ajuste da simulação retornado pelos valores dos coeficientes de Nash-Sutcliffe calculados, os parâmetros ajustados para gerar tais resultados não apresentam uma correlação direta com as condições de tipo de solo observadas na bacia. O valor dos parâmetros obtidos através da bibliografia não representa os parâmetros inseridos no software para gerar a simulação, como por exemplo o grupo hidrológico do solo – definido como C por Sartori *et al.* (2005) e admitido como A na simulação. Admite-se, com isso, que os parâmetros modificados para a realização da simulação tiveram como objetivo gerar bons ajustes de correlação, mesmo que não representem os parâmetros físicos da bacia.

Por fim é necessário considerar que qualquer modelo pode ser calibrado, entretanto, sem conhecer os processos e valores dos parâmetros da bacia, os resultados podem se distinguir das condições reais. Por isso, para fazermos inferências a partir de modelos (prognósticos, previsões, etc) é necessário que o modelo passe por um período de validação para que se possa inferir com segurança que o modelo é capaz de representar os processos hidrossedimentológicos governantes na bacia em que é simulado.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, T. A. (2015). *Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT*. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Lages, Brasil.
- ARNOLD, J, G; SRINIVASAN, R; MUTTIAH, R, S; WILLIAMS, J, R. (1998). *Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development*. Journal American Water Works Association, v. 34, p. 73-89.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2018). *Levantamento da Geodiversidade: Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil - Isoietas anuais médias (Período 1977 a 2006)*. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/atlas_pluviometrico_brasil/isoietas_totais_anuais_1977_2006.pdf >.
- IFFSC. (2018) Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina. *Arquivos vetoriais de tipo de solo*. Disponível em: < <https://sites.google.com/view/iffportal/produtos/mapas> >.

- MORIASI, D.; ARONOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R. D.; & VEITH, T. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transactions of the ASABE. pp 885-900.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2011) *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation*, Version 2009. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, Technical Report No. 406. 618p.
- PEREIRA, D.R. (2013). *Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT*. Tese (Doutor Scientiae) – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. 126p.
- SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. (2005). *Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 10 n. 4.
- SOUZA, R.M.; SANTOS, I. KOBAYAMA, M. (2009). *O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro*. In Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, MS, 14p.
- SOUZA, W. V. (2016). *Aplicações do modelo SWAT no Brasil: revisão e estudo de caso – Amazônia*. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, Brasil. 2016.
- WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. (2004). *Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação*. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>.