

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES MÉDIAS ATRAVÉS DO SWAT

Luana Lavagnoli Moreira¹; Dimaghi Schwambach²

RESUMO – A estimativa de vazões em cursos d’águas por meio de modelagem requer o ajuste dessas vazões com os dados medidos em campo por meio da calibração. Porém há um grande esforço computacional e tempo necessário para ajustar diversos parâmetros durante a calibração, sendo recorrente o uso da análise de sensibilidade para identificar quais parâmetros são mais sensíveis à estimativa dessa variável hidrológica. Dessa forma, este trabalho verificou quais os parâmetros são os mais sensíveis em estimar vazões médias, por meio do SWAT, na bacia do rio Jucu, localizada na porção sudeste do estado do Espírito Santo (Brasil). A análise de sensibilidade foi realizada por meio do programa SWAT-CUP ao qual faz uso do algoritmo SUFI-2 e foi verificado que os cinco parâmetros mais sensíveis estão associados ao processo de infiltração de água no solo, sendo eles: constante de recessão do escoamento de base, profundidade do solo, tempo de recarga do aquífero, número da curva do método SCS e condutividade hidráulica saturada do solo, os quais também foram encontrados em diversos trabalhos realizados na região sudeste brasileira.

Palavras-Chave – calibração, modelagem, sensíveis.

ABSTRACT – The flow estimation in watercourses by means of modelling requires the adjustment with data measurement by means of the calibration. However, this is a great computational and time effort consuming task necessary to adjust several parameters during the calibration, being more common the use of the sensitivity analysis in order to identify which parameters are more sensitive to the estimation of this hydrological variable. Thus, this work verified which parameters are the most sensitive in estimating mean flows, through SWAT, in the Jucu River basin, located in the southeast portion of the state of Espírito Santo (Brazil). The sensitivity analysis was performed using the SUFI-2 algorithm and it was verified that the five most sensitive parameters are associated with the water infiltration process in the soil, being: the recession constant of the flow soil depth, aquifer recharge time, SCS method curve number and saturated hydraulic conductivity of the soil, which were in agreement with some other studies carried out in the Brazilian Southeastern region.

Keywords – calibration, modelling, sensitivity.

1) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, lavagnoliluana@gmail.com, 51 3308-7518

2) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador Sancarlense, Parque Arnold Schmidt, 13566590, São Carlos, SP, dimaghi@usp.com, 16 33738270

1 - INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes nos processos de tomada de decisão na gestão de bacias hidrográficas em atividades tais como abastecimento público de água, geração de energia, irrigação, redução de conflitos entre outras finalidades (MELLO *et al.*, 2016). Entre os modelos hidrológicos, o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido por Arnold *et al.* (1998) é mundialmente reconhecido por ser eficiente em simular a quantidade e qualidade dos recursos hídricos sob diferentes coberturas do solo em condições passadas, presentes e futuras (NEITSCH *et al.*, 2011).

Os processos hidrológicos são influenciados por um grande número de variáveis aos quais possuem diferentes níveis de incerteza que são transmitidas aos resultados do modelo (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006). Por essa razão, a comparação entre dados simulados e observados é necessária, onde os parâmetros são ajustados para melhor refletir a realidade, através da "calibração". No entanto, a calibração utilizando todos os parâmetros disponíveis exige alto esforço computacional, recursos financeiros e consumo de tempo, enquanto a remoção de uma variável sensível diminui a precisão dos resultados (ZADEH *et al.*, 2017). Portanto, é importante determinar quais parâmetros exercem maior relevância (sensível) nos resultados do modelo, enquanto os demais são descartados durante o processo de calibração (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006).

A sensibilidade pode ser classificada de acordo com o número de parâmetros analisados: local, onde as mudanças nos parâmetros são feitas uma a uma, enquanto as outras são mantidas constantes, ou globais, onde é realizada uma regressão multilinear considerando todas as variáveis de entrada (BROUZIYNE *et al.*, 2017); e de acordo com a técnica utilizada: manual ou automatizado, com o uso de métodos tais como triagem, análise de regressão, método baseado em variância, método de metamodelagem e outros (BROUZIYNE *et al.*, 2017).

A calibração pode ser definida como o processo de estimar os valores dos parâmetros que reduzem erros entre dados simulados e medidos (ERCAN *et al.*, 2014). Embora inicialmente tenha sido feita manualmente, hoje em dia é comum o uso de algoritmos como a Estimativa de incerteza de probabilidade generalizada - GLUE; Método de Markov Chain Monte Carlo - MCMC; Parâmetro Solução - ParaSol; e a versão de ajuste de incerteza sequencial 2 - SUFI - 2. Todos esses algoritmos estão disponíveis para uso livre no modelo SWAT-CUP (*SWAT Calibration Uncertainty Procedure*) desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007).

Com base na deficiência acima, este trabalho realizou uma análise de sensibilidade global usando o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUFI2), tendo como objetivo principal a obtenção dos parâmetros mais sensíveis no modelo hidrológicos SWAT.

2 – METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A modelagem hidrológica foi aplicada à bacia hidrográfica do rio Jucu, localizada na porção sudeste do Estado do Espírito Santo, Brasil (entre as latitudes 20° 09' 08" e 20° 34' 22" e longitudes 40° 45' 57" e 40° 37' 04"). A área de abrangência cobre, total ou parcialmente, os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano, Viana, Vila Velha, Cariacica e Guarapari, com uma área de drenagem de 2.183 km² (Figura 1).

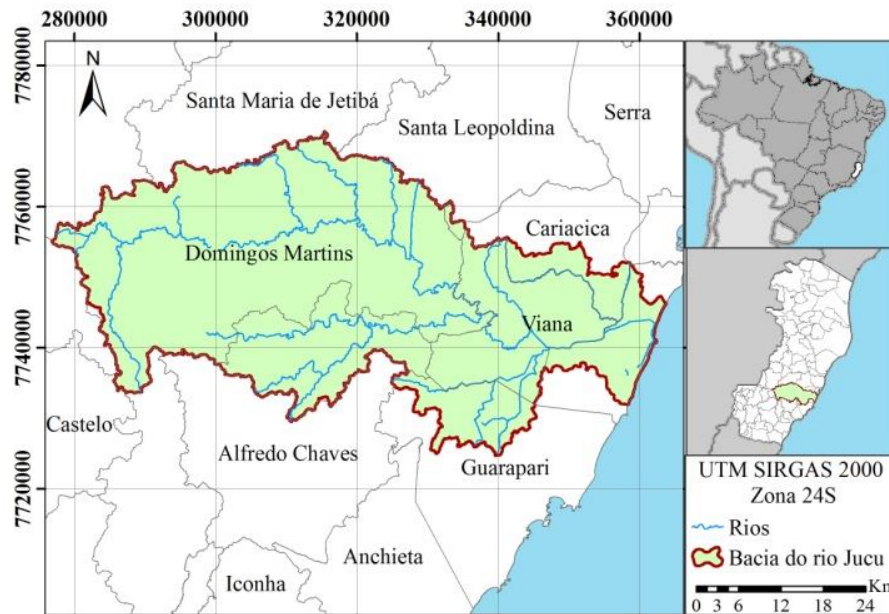


Figura 1 – Localização da bacia do rio Jucu.

2.2 Modelagem hidrológica no SWAT

A primeira etapa da modelagem consistiu na definição das sub-bacias e rede de drenagem. Nesta etapa foi utilizado um modelo de elevação digital (DEM) com resolução espacial de 30 metros obtido através *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) em 2011. Em seguida, foram obtidos dados fisiográficos de pedologia, uso e ocupação do solo e classes de declividade. Os dados pedológicos foram adquiridos por um levantamento de solo do estado do Espírito Santo realizado em 1978 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos por uma pesquisa realizada pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Por meio da combinação dos dados descritos acima foram definidas as unidades de resposta hidrológica (HRU).

Após a definição das HRUs, os dados climatológicos das estações de monitoramento localizadas dentro da bacia foram inseridos no modelo. Esses dados estão disponíveis publicamente pelo setor de hidrometeorologia do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) e pela Agência Nacional de Águas (ANA) e referem-se à radiação solar (KJ/m²),

precipitação (mm), temperatura máxima e mínima do ar (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m/s).

A última etapa do processamento da SWAT consistiu na simulação, onde foram definidos o período de aquecimento, período de simulação, intervalo de tempo da simulação mensal e dados de saída (produção de água - séries de vazões médias mensais). Uma vez determinados os dados de saída, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à produção de água na bacia hidrográfica. A análise de sensibilidade utilizou dados de vazão da estação fluviométrica sob código 57230000, denominado Fazenda Jucuruaba, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA).

2.2 Análise de sensibilidade

A sensibilidade dos parâmetros SWAT foi realizada usando o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUFI2) executado pelo software *SWAT - Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP). Esse processo é realizado em conjunto com o processo de calibração, portanto, é necessário incluir as vazões estimadas pela SWAT e as vazões monitoradas. Isso é necessário porque a sensibilidade é estimada de acordo com as variações de acordo com a função objetivo que avalia a eficácia da calibração do modelo.

A sensibilidade dos parâmetros é calculada pelos sistemas de regressão múltipla representados na equação 1, que retorna os valores dos parâmetros gerados pela amostragem por hipercubo latino versus os valores da função objetivo (ABBASPOUR *et al.*, 2007).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (1)$$

onde g é o valor da função objetivo; b é o parâmetro; α é a constante de regressão; β corresponde ao coeficiente técnico anexado à variável b ; e m é igual ao número de parâmetros.

A média das variações na função objetivo estima a sensibilidade, a qual é calculada alterando cada parâmetro, um por um, enquanto os outros parâmetros permanecem os mesmos. A sensibilidade dos parâmetros é avaliada pelos valores de t -stat e p -value. Quanto maior o valor absoluto de t -stat e menor o de p -value, mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, *et al.*, 2007).

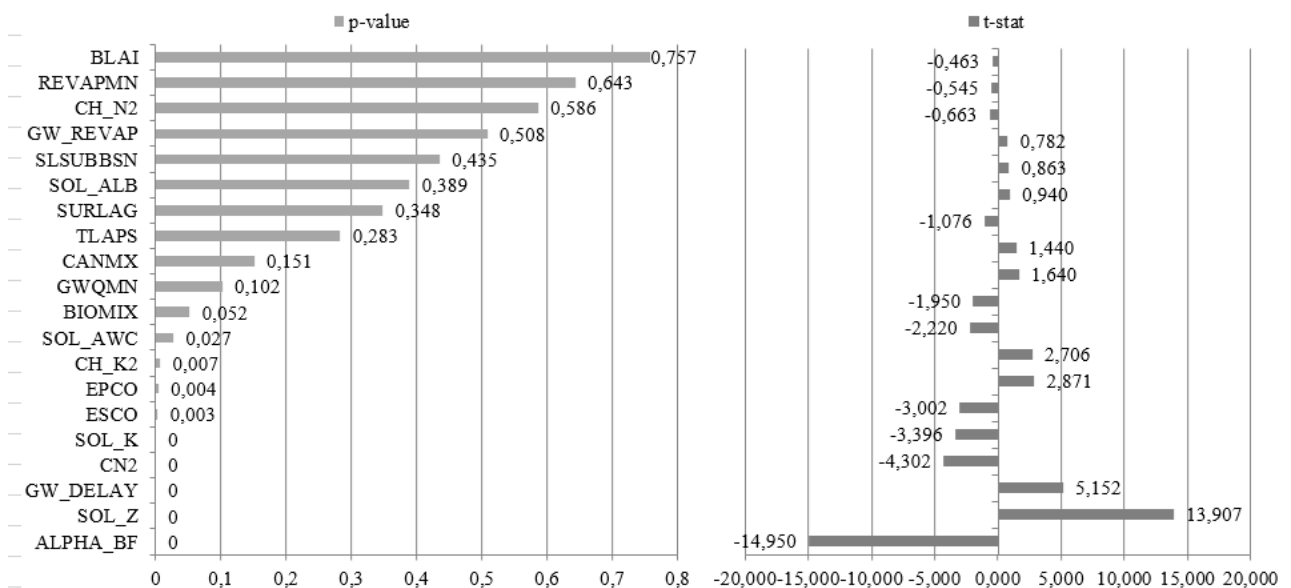
O t -stat é o coeficiente de regressão de um parâmetro dividido pelo seu erro padrão. Se o valor do coeficiente for maior que seu erro padrão, o valor de t -stat é maior que zero, então o parâmetro é sensível (ABBASPOUR *et al.*, 2015). Para calcular o valor de p , é necessário comparar o valor de t -stat com os valores dados na tabela de distribuição t -Student. O valor p para cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente de regressão é igual a zero. Um pequeno valor baixo de p ($<0,05$) indica que podemos rejeitar a hipótese nula. Isso significa que o parâmetro exerce influência sobre a

variável dependente e, portanto, é sensível. O valor de 0,05 indica que há uma probabilidade de 95% de que uma alteração de parâmetro afetará a variável dependente (ABBASPOUR *et al*, 2009).

A partir da hierarquia de sensibilidade dos parâmetros, estes foram categorizados segundo Van Griensven *et al.* (2006) como muito importante (1ª posição), importante (2ª a 6ª posições), ligeiramente importante (7ª a 14ª posições) e não importante (15ª a 20ª posições).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro teste de sensibilidade gerou a hierarquia de sensibilidade dos parâmetros apresentados na Figura 2, de acordo com os valores de *p-value* e *t-stat*. Segundo classificação de Van Griensven *et al.* (2006), os seguintes parâmetros são classificados como muito importante e importantes: constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF), profundidade da superfície até a base do horizonte do solo (SOL_Z), tempo de recarga do aquífero raso (GW_DELAY), número da curva para condição de umidade II do método SCS (CN2), condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K) e o fator de compensação da evaporação no solo (ESCO).



ALPHA_BF (Constante de recessão do escoamento de base), BIOMIX (Eficiência da mistura biológica do solo), BLAI (Índice máximo de área foliar), CANMX (Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação), CH_K2 (Condutividade hidráulica do canal), CH_N2 (Coeficiente de Manning no canal principal), CN2 (Curva número para condição de umidade II), EPCO (Fator de compensação da remoção de água pelas raízes), ESCO (Fator de compensação da evaporação no solo), GW_DELAY (Tempo de recarga do aquífero raso), GW_REVAP (Coeficiente de ascensão da água da zona de saturação), GWQMN (Profundidade do aquífero raso para escoamento de base), REVAPMN (Profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação), SOL_ALB (Fração de albedo do solo na capacidade de campo), SOL_AWC (Capacidade de água disponível no horizonte do solo), SOL_K (Condutividade hidráulica saturada do solo), SOL_Z (Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo), SURLAG (Tempo de retardo do escoamento superficial), TLAPS (Taxa de variação da temperatura com relação à altitude), SLSUBBSN (Comprimento médio da rampa de declividade).

Figura 2 - Sensibilidade dos parâmetros na bacia do rio Jucu (ES).

Como a sensibilidade dos parâmetros é considerada variável de acordo com a região de estudo, na Tabela 1 são apresentados diversos estudos que estimaram vazões através do modelo SWAT na região sudeste do Brasil: Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP). Dessa forma, é possível perceber que pelo menos três parâmetros entre os encontrados neste artigo contemplam a lista de parâmetros mais sensíveis de cada estudo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros sensíveis para diferentes estudos na região sudeste do Brasil.

Fonte	Parâmetros em ordem decrescente de sensibilidade	Estado
Fukunaga (2012)	CN2, GWQMN, ESCO, CANMX, SOL_K, SOL_AWC	ES
Andrade <i>et al.</i> (2013)	CN2, ALPHA_BF, ESCO, SOL_Z, SOL_K, SOL_AWC	MG
Durães <i>et al.</i> (2011)	ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z, GWQMN, GW_DELAY, SOL_AWC	MG
Lelis <i>et al.</i> (2012)	CN2, SOL_AWC, SOL_K, ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z	MG
Melo Neto (2013)	ALPHA_BF, GWQMN, CN2, ESCO, SOL_AWC, BLAI	MG
Pinto (2011)	ALPHA_BF, CH_K2, CN2, SURLAG, SOL_K, CH_N2	MG
Barbarotto Junior (2014)	CN2, SLSUBBSN, ALPHA_BF, SOL_Z, ESCO, SOL_K	SP
Kuwakima (2012)	SOL_K, CN2, SOL_AWC, GW_DELAY	SP
Pereira (2013)	SOL_K, ALPHA_BF, ESCO, CN2, CH_N2, CH_K2	RJ

Verifica-se que os cinco parâmetros mais sensíveis para estimativa de vazões por meio do SWAT para região de estudo estão relacionados ao processo de infiltração da água no solo. O parâmetro mais sensível, ALPHA_BF, consiste de um índice da resposta de fluxo de água subterrânea nas mudanças de recarga. Os parâmetros SOL_Z e SOL_K representam a capacidade do solo em absorver água, seja pela quantidade de solo existente o que reflete na profundidade ou pela textura e estrutura que indica a capacidade de percolação da água (condutividade hidráulica).

O parâmetro CN2, por sua vez, utilizado pelo método SCS, busca retratar a capacidade de infiltração da área em função do tipo de solo, do uso e ocupação e das condições de umidade de uma área. Já o tempo de recarga do aquífero raso (GW_DELAY) depende da profundidade do aquífero e das propriedades hidráulicas da formação geológica na zona vadosa e do aquífero.

4 – CONCLUSÃO

Este estudo consistiu em identificar os parâmetros mais sensíveis para estimativa de vazões médias em uma bacia rural localizada no Estado do Espírito Santo usando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), dessa forma foram obtidas as seguintes conclusões:

- Os cinco parâmetros mais sensíveis relacionam-se ao processo de infiltração de água no solo, sendo eles: constante de recessão do escoamento de base, profundidade do solo, tempo de recarga do aquífero, número da curva do método SCS e condutividade hidráulica saturada do solo;

- Os parâmetros obtidos neste estudo também foram encontrados em diversos trabalhos realizados no mesmo Estado e em outros localizados na região sudeste brasileira, o que indica a relação de sensibilidade com a realidade de cada local.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR K.C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H., KLØVE, B. (2015). “A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model”. *Journal of Hydrology* 524, pp.733-752.
- ABBASPOUR, K. C.; FARAMARZI, M.; GHASEMI, S. S.; YANG, H. (2009). “Assessing the impact of climate change on water resources in Iran”. *Water Resources Research* 45, pp. 1-16.
- ABBASPOUR, K.C, YANG, J., MAXIMOV, I, SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIST, J., SRINIVASAN, R. (2007). “Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT”. *Journal of Hydrology* 333, pp.413-430.
- ANDRADE, M.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S. (2013) “Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande, MG”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17, pp.69-76.
- ARNOLD, J.G, SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S., WILLIAMS, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment – Part I: Model development”. *Journal of American Water Resource Association* 34, pp.73–89.
- BARBAROTTO JUNIOR, J. L. (2014). “Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis”. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.
- BROUZIYNE, Y., ABOUABDILLAH, A., BOUABID, R., OUESLATI, O. (2017). “SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco”. *Arab. J. Geosci.* 10 pp.1-13.
- DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de; NAGHETTINI, M. (2011). “Applicability of the swat model for hydrologic simulation in Paraopeba River basin, MG”. *CERNE* 17 (4), pp. 481-488.
- ERCAN M. B., GOODALL, J. L., CASTRONOVA, A. M., HUMPHREY, M., BEEKWILDER, N. (2014). “Calibration of SWAT models using the cloud”. *Environ. Modell. Softw.* 1, pp.188-196.
- FUKUNAGA, D. C. (2012). “Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT”. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES.
- KUWAJIMA, J. I. (2012). “Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do lobo (Itirapina/Brotas/SP)”. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D. C. de; ROCHA, E. de O. (2012). “Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil”. Revista Brasileira de Ciência do Solo 36, pp.623-634.
- MELLO, C. R. de.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. (2016). “Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes”. Ciência e Agrotecnologia, 40 (1), pp.7-25.
- MELO NETO, J. de O. (2013). “Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT”. 149 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R., KING, K.W. (2011). “Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2009”.
- PEREIRA, D. dos R. (2013). “Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT”. 126 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa - MG.
- PINTO, D. B. F. (2011). “Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG”. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Lavras - MG.
- VAN GRIENSVEN, A., MEIXNER, T., GRUNWALD, S., BISHOP, T., DILUZIO, M., SRINIVASAN, R. (2006). “A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models”. Journal of Hydrology 324, pp.10-23.
- ZADEH, F.K., NOSSENT, J., SARRAZIN, F., PIANOSI, F., GRIENSVEN, A.V., WAGENER, T., BAUWENS, W. (2017). “Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the SWAT model”. Environmental Modelling & Software 91, pp.210-222.