Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar¹

Letícia Lopes Martins², Wander Araújo Martins², Jener Fernando Leite de Moraes³,
Mário José Pedro Júnior⁴ e Isabella Clerici De Maria³

¹Parte da dissertação de mestrado da primeira autora. ²Mestrando em Agricultura Tropical e Subtropical pelo Instituto Agrônomo de Campinas, Avenida Barão de Itapura, 1481, Botafogo, CEP 13020-902, Campinas – SP. leticia.lufv@gmail.com; ³ Pesquisador Dr. do Instituto Agrônomo de Campinas, Centro de Solos e Recursos Ambientais, Avenida Barão de Itapura, 1481, Botafogo, CEP 13020-902, Campinas – SP. ⁴ Pesquisador Dr. do Instituto Agrônomo de Campinas, bolsista de Produtividade CNPq, Centro de Solos e Recursos Ambientais, Avenida Barão de Itapura, 1481, Botafogo, CEP 13020-902, Campinas – SP.

Artigo recebido em 27/11/2019 e aceito em 02/03/2020

RESUMO

A dificuldade na gestão de recursos hídricos aliada à dinâmica do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas agrícolas são fatores relevantes para a conservação da água e solo. A gestão de bacias hidrográficas, bem como o monitoramento de cenários de expansão agrícola e mudança no uso do solo, podem se beneficiar de ferramentas de modelagem hidrossedimentológica, como o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Entretanto, para que os resultados obtidos sejam confiáveis, os modelos precisam ser calibrados. Objetivou-se, neste trabalho, calibrar e validar o modelo SWAT, para a variável vazão, tendo como base a bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira - São Paulo, que se caracteriza pela expansão da cana-de-açúcar sobre áreas citrícolas. Dados de vazão de um posto fluviométrico localizado no exutório da bacia foram utilizados para a calibração e validação, a partir de séries temporais diferentes. Utilizou-se o software QSWAT para a simulação hidrológica e o SWAT-CUP para a calibração e validação do modelo. O modelo foi calibrado e validado resultando nos seguintes índices estatísticos NSE = 0,64; PBIAS = 15,2 e RSR = 0,60 para calibração e NSE = 0,68; PBIAS = -2,8 e RSR = 0,56 para a validação. O ajuste de parâmetros do SWAT (USLE_P, USLE_C, CN2) e do calendário de operações da cana-de-açúcar em acordo com a situação real da bacia foi necessário para a calibração do modelo. Os resultados indicam que o modelo SWAT subestima as vazões extremas, no entanto, dentro de faixa aceitável. O SWAT, após a calibração, pode ser utilizado na gestão de recursos hídricos na bacia do Ribeirão do Pinhal. Palavras-chave: Simulação hidrológica; uso da terra; vazão.

Hydrological calibration of the SWAT model in a watershed characterized by the expansion of sugarcane cultivation

ABSTRACT

The difficulty in water resources management combined with the dynamics of land use and occupation in agricultural watersheds are relevant factors for water and soil conservation. River basin management, as well as monitoring scenarios of agricultural expansion and land-use change, can benefit from hydrosedimentological modeling tools such as the SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). However, for the results to be reliable, the models must be calibrated. The objective of this study was to calibrate and validate the SWAT model for the flow variable, based on the Ribeirão do Pinhal watershed, Limeira - São Paulo, which is characterized by the expansion of sugarcane over citrus areas. Flow data from a fluviometric station located in the basin's outlet were used for calibration and validation from different time series. QSWAT software was used for hydrological simulation and SWAT-CUP for model calibration and validation. The model was calibrated and validated resulting in the following statistical indices NSE = 0.64; PBIAS = 15.2 and RSR = 0.60 for calibration and NSE = 0.68; PBIAS = -2.8 and RSR = 0.56 for validation. Adjustment of SWAT parameters (USLE_P, USLE_C, and CN2) and the sugarcane operation schedule according to the actual basin situation was necessary for model calibration. The results indicate that the SWAT model underestimates the extreme flow rates, however, within an acceptable range. After calibration, the SWAT can be used to manage water resources in the Ribeirão do Pinhal basin. Keywords: Hydrologic simulation; land use; flow rate.

Introdução

A dificuldade na compreensão dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em nível de bacia hidrográfica torna-se, em muitos casos, um obstáculo para a gestão dos recursos hídricos, identificação de problemas, entendimento do impacto das mudanças no uso e ocupação do solo nos recursos hídricos, aplicação de políticas públicas e práticas de conservação do solo e da água. Em bacias hidrográficas predominantemente agrícolas a compreensão desses fenômenos é de grande importância devido, principalmente, à dinâmica na mudança do uso e ocupação do solo, fato que influencia diretamente os fenômenos hidrológicos e sedimentológicos (Andrade et al., 2013; Pereira et al., 2016b).

As mudanças no uso e ocupação dos solos podem influenciar a produção de sedimentos e alterar a vazão dos cursos hídricos. Situação que vem ocorrendo no estado de São Paulo, por meio da expansão do cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), principal produto do agronegócio paulista, em áreas até então ocupadas pela citricultura e pastagens, fato observado na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira - SP. Essa expansão está ocorrendo, entre outros fatores, devido às condições edafoclimáticas favoráveis ao desenvolvimento da cana-de-açúcar e à facilidade de mecanização, que possibilitam a obtenção de elevadas produtividades e custos mais baixos (Nocelli et al., 2017; Ronquim et al., 2018). A proximidade entre as áreas de cultivo e as unidades de processamento também é um fator considerado na decisão de uso e ocupação e, por vezes, áreas em condições mais favoráveis aos processos erosivos são utilizadas exigindo alterações no manejo do solo que influenciarão direta ou indiretamente o transporte de sedimentos para os corpos hídricos.

As bacias hidrográficas atuam como receptoras de sedimentos e água e a dinâmica na produção de água e sedimentos nestas unidades da paisagem podem ser quantificadas com a utilização de modelos hidrossedimentológicos, os quais estão sendo amplamente utilizados para o planejamento, gestão e monitoramento de bacias hidrográficas (Kim et al., 2016; Strehmel et al., 2016; Mello et al., 2017; Paz et al., 2018; Santos et al., 2018; Silva et al., 2018; Qiu et al., 2019; Nunes et al., 2019). Esses modelos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a ocorrência de processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas temporais e espaciais, com a possibilidade de inferir sobre diversos cenários. Dentre os modelos hidrossedimentológicos existentes, o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) desenvolvido pelo

Agricultural Research Service of the United States Department of Agricultural (ARS - USDA), tem se destacado pela ampla utilização em todo o mundo (Gassman et al., 2007; Bressiani et al., 2015; Strehmel et al., 2016; Vigiak et al., 2016; Pereira et al., 2016b; Khelifa et al., 2017; Tirupathi et al., 2018).

O SWAT é um software de domínio público, desenvolvido com o objetivo de prever os impactos das mudanças no uso e manejo do solo atual e futuro, através da simulação de cenários, na produção de água, sedimentos, nutrientes e agroquímicos em bacias hidrográficas (Arnold et al., 1998; Gassman et al., 2007). No entanto, para que os resultados disponibilizados pelo modelo possam ser utilizados com confiabilidade, torna-se necessário calibrá-lo, ou seja, ajustar os dados simulados aos dados observados (Abbaspour et al., 2017; Paz et al., 2018; Premand et al., 2018; Ashikary et al., 2019).

Estudos referentes à calibração e validação do modelo SWAT são realizados em todo mundo. No Brasil há trabalhos que realizaram estes procedimentos e obtiveram resultados satisfatórios (Rodrigues et al., 2015; Pereira et al., 2016; Brighenti et al., 2016; Monteiro et al., 2016; Pontes et al., 2016; Franco e Bonumá, 2017; Paz et al., 2018; Santos et al., 2018), comprovando, que o modelo se aplica às regiões edafoclimáticas diferentes das quais foi desenvolvido. O principal obstáculo para a calibração do modelo em bacias hidrográficas brasileiras é a disponibilidade de dados confiáveis, que quando existentes, geralmente apresentam elevado percentual de falhas, aumentando a dificuldade do processo de calibração (Brighenti et al., 2016; Andrade et al., 2017). Desse modo, este estudo parte da hipótese de que é possível calibrar e validar o modelo SWAT, mesmo com série limitada de dados medidos de vazão.

Excetuando-se as dificuldades citadas, a calibração de modelos hidrossedimentológicos para bacias hidrográficas fornece embasamento teórico para a compreensão e entendimento dos processos que ocorrem na bacia (Abbaspour et al., 2015b; Abbaspour et al., 2017). Com o modelo calibrado torna-se possível simular diferentes cenários e obter resultados confiáveis, o que torna o modelo uma importante ferramenta para a elaboração e aplicação de políticas públicas que auxiliem na gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas. Objetivou-se, neste trabalho, calibrar e validar o modelo SWAT utilizando o software QSWAT e o SWAT-CUP, com o algoritmo SUFI2, e ajustando-se parâmetros pré-definidos e o calendário de operações da cana-de-açúcar, a fim refletir as características reais da

bacia, para que o modelo possa ser usado em estudos e na gestão da BHRP (bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal).

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal (BHRP), situada nos municípios de Limeira (maior porção da bacia), Cordeirópolis, Engenheiro Coelho e Arthur Nogueira, estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°40'43,31" e 22°24'41,00" de latitude Sul e 47°25'59,60" e 47°11'08,79" de

longitude Oeste e altitude média de 570m (Figura 1). Essa bacia está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos número 5 (UGRHI-5), que engloba as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. A UGRHI-5 compreende uma das regiões mais críticas do estado no que se refere à qualidade e disponibilidade de água, segundo CBH-PCJ (2015). As águas da bacia do Ribeirão do Pinhal são utilizadas para as atividades agropecuária e industrial e para o abastecimento público do município de Limeira.

Figura 1. Localização, limite e rede hidrográfica da bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal.

Os solos que ocorrem na bacia pertencem à ordem dos Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Gleissolos, Nitossolos e Neossolos, de acordo com o levantamento de solos realizado por Moraes et al. (2009), seguindo a classificação proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013). De acordo com Moraes et al. (2009), a vegetação original caracteriza-se por Cerrado e Floresta Latifoliada Tropical, no entanto vem sendo suprimida em decorrência do crescimento das cidades e expansão agrícola. O clima da região é classificado como Cwa, tropical chuvoso, segundo a classificação climática de Köppen (Rolim et al., 2007), a temperatura média anual varia de 18,1°C a 24,6°C e precipitação anual de 1.336 mm.

A bacia do Ribeirão do Pinhal caracteriza-se, predominantemente, pelo uso agrícola, destacando-se a atividade canavieira. A expansão das áreas de cana-de-açúcar está ocorrendo em razão da supressão de áreas até então ocupadas pela atividade citrícola. Nos últimos 10 anos as áreas ocupadas com cultivo de cana de cana-de-açúcar aumentaram em 17%, enquanto que a citricultura diminuiu 22%. A BHRP apresenta uma área de 30.111 ha. No entanto para este estudo, considerou-se uma área correspondente a 23.352 ha, que dispõe de dados observados no exutório da bacia hidrográfica.

Softwares utilizados

Para a simulação hidrológica utilizou-se os softwares: QSWAT 1.7, versão do SWAT para o QGIS 2.6.1 Brighton, desenvolvido por Stone Environmental, Inc. em colaboração com Texas A&M Spatial Sciences Laboratory and Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas, USA; SWAT Editor 2012.10.19 e QGIS 2.6.1 Brighton®.

Utilizou-se o software SWAT-CUP 2019 v5.2.1.1, SWAT: *Calibration and Uncertainty Programs* (Abbaspour, 2015a) para os processos de calibração e validação.

O modelo SWAT

O modelo hidrológico SWAT foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito da mudança no uso e ocupação das terras sobre o escoamento superficial e subterrâneo, qualidade da água, produção de sedimentos e outros. Possui uma estrutura dividida em sete componentes, sendo eles: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas (Arnold et al., 1998).

O SWAT subdivide a bacia hidrográfica em sub-bacias, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE). A partir da entrada de dados sobre uso e ocupação das terras, solo e declividade, o modelo gera as Unidades de Respostas Hidrológicas (Hydrologic Response Units – HRU's). Cada unidade hidrológica apresenta características homogêneas tanto no uso do solo quanto nas suas características pedológicas e faixas de declividade.

De acordo com Neitsch et al. (2011), o modelo divide o ciclo hidrológico em duas fases: a fase terrestre e a fase de propagação e, utiliza nas simulações hidrológicas, a equação do balanço hídrico (1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

em que:

SW_t = quantidade final de água no solo (mm H_2O);
 SW_0 = quantidade inicial de água no solo no dia i (mm H_2O); t é o tempo (dias); R_{day} = precipitação total diária no dia i (mm); Q_{surf} = escoamento total

diário no dia i (mm); E_a = evaporação total diária no dia i ; W_{seep} = quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm); Q_{gw} = vazão de retorno no dia i (mm).

Por meio da interface QSWAT, o modelo SWAT trabalha integrado com o sistema de informação geográfica QGIS, o que permite a melhor representação física dos processos que ocorrem no ciclo hidrológico. Além disso, a interface QSWAT possibilita a geração de mapas resultantes dos processos de modelagem.

Dados de entrada no SWAT

Para a realização das simulações o SWAT necessita dos seguintes dados de entrada: modelo digital de elevação, mapa pedológico, mapa de uso do solo e dados meteorológicos.

O mapa pedológico (Figura 2) e o modelo digital de elevação, foram obtidos a partir da base de dados do projeto “Diagnóstico Agroambiental para a Bacia Ribeirão do Pinhal” (Moraes et al., 2009). O levantamento pedológico dessa área foi realizado na escala 1:50.000 e as curvas de nível, são provenientes das cartas topográficas 1:10.000, do IGC-SP (Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo), com equidistância vertical de 5 metros. A partir das curvas de nível e rede hidrográfica, confeccionou-se o modelo digital de elevação, em formato matricial, com resolução espacial de 30 metros. O mapa pedológico, bem como o mapa de uso e cobertura do solo foram inseridos no modelo em formato raster com resolução espacial de 30 metros.

O mapa de uso e cobertura do solo (Figura 2) foi atualizado com imagens de satélite correspondente ao ano 2016 (imagens da Esri, com resolução de 5 metros). Posteriormente à classificação do uso dos solos, realizou-se o agrupamento destes usos em classes atribuídas pelo SWAT.

A fim de garantir maior representatividade do relevo da bacia hidrográfica em estudo, a declividade foi agrupada nas seguintes classes: 0-3%, 3-6%, 6-9%, 9-12%, 12-25% e >25%, de acordo com proposta de Lepsch et al. (1991). A relação dos usos, classes de solos e classes de declividade utilizadas, bem como a representatividade na bacia hidrográfica são detalhadas na Tabela 1.

Figura 2. Mapa de uso do solo e mapa pedológico da bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal. A legenda do uso e classificação dos solos é explicada na tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos usos, classes de solos e de declividade da bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal.

	Abreviação	Descrição	Área (ha)	Área (%)
Uso do Solo	SUGC	Cana-de-açúcar	12276,19	52,57
	ORAN	Citricultura	2792,69	11,96
	FRSE	Mata	1907,31	8,17
	RNGB	Macega	1746,64	7,48
	URLD	Urbano baixa-densidade	1285,2	5,5
	BSVG	Solo exposto	926,63	3,97
	PAST	Pastagem	904,82	3,87
	CORN	Cultura anual	590,24	2,53
	WETL	Várzea	318,76	1,37
	AGRL	Agricultura genérica	212,18	0,91
	WATR	Água	146,52	0,63
	UTRN	Vias	112,48	0,48
	EUCA	Reflorestamento	111,23	0,48
	LETT	Horticultura	21,56	0,09
Solos	¹ LVdf	-	6290,25	26,94
	² LVAd	-	5917,25	25,34
	³ LVAd12	-	5294,85	22,67
	⁴ CXd	-	3282,51	14,06
	⁵ PVA	-	1054,19	4,51
	⁶ RLd	-	863,08	3,7
	⁷ NVdf	-	350,45	1,5
	⁸ LVAPV	-	86,67	0,37
	⁹ GXd	-	60,92	0,26
Declividade	3-6%	-	7198,87	30,83
	6-9%	-	5269,09	22,56
	0-3%	-	4340,43	18,59
	12-25%	-	3199,61	13,7
	9-12%	-	3077,93	13,18
	>25%	-	266,51	1,14

¹LVdf (Latossolo Vermelho distrófico e eutrófico típico, textura muito argilosa e argilosa); ²LVAd (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, A moderado, textura média); ³LVAd12 (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa); ⁴CXd (Associação de Cambissolo Háplico Tb distrófico e Tb eutrófico, textura média e média/argilosa + Neossolo Litólico distrófico e eutrófico, textura média, ambos típicos); ⁵PVA (Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, textura arenosa/média; Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, textura média/argilosa; Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico típico e arênico, textura média/argilosa); ⁶RLd (Associação de Neossolo Litólico distrófico, textura média, + Cambissolo Háplico Tb distrófico, textura média/argilosa); ⁷NVdf (Nitossolo Vermelho distrófico e eutrófico típico, textura muito argilosa); ⁸LVAPV (Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo distrófico argissólico, textura média e arenosa/média); ⁹GXd (Complexo de Gleissolo Háplico Tb eutrófico + Cambissolo Flúvico Tb eutrófico e distrófico gleissólico + Neossolo Flúvico Tb eutrófico e Tb distrófico, textura indiscriminada).

Além das informações geoespaciais o SWAT requer dados de precipitação pluviométrica, temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar. No entanto, em virtude da disponibilidade de dados observados de todas as variáveis, utilizou-se dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar e estimou-se a radiação solar por meio da metodologia proposta por Hargreaves e Samani (1985), conforme equação (2):

$$R_s = K_r \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (2)$$

em que:

R_s = Radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); K_r = coeficiente de ajuste (adimensional); T_{max} =

temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} = Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); R_a = Radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

Deve-se destacar que, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar foram simuladas pelo modelo SWAT. Ressalta-se que para a determinação da radiação solar, utilizou-se o coeficiente de ajuste de 0,16 conforme recomendações do Boletim 56 da FAO.

Os dados de vazão utilizados na etapa de calibração e validação do modelo foram obtidos na plataforma HidroWeb (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf), disponível no portal da ANA (Agência Nacional das Águas). A descrição das estações meteorológicas e posto fluviométrico utilizados neste estudo encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Identificação das estações meteorológicas e posto fluviométrico.

Nome	Tipo	Responsável	Latitude	Longitude	Período dos dados
Nova Odessa	EM ¹	CIIAGRO/IAC ²	22°46'16,19"S	47°18'13,68"O	2004-2017
Cordeirópolis	EM	CIIAGRO/IAC	22°27'32,99"S	47.24'25,95"O	2004-2017
Salto do Lobo	Fluviométrica	ANA ³	22°37'26,04"S	47°16'30,00"O	2011-2017

¹Estação meteorológica; ²Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agrônomo; ³Agência Nacional das Águas.

Modificação de parâmetros do modelo SWAT

A simulação hidrológica foi realizada considerando o mapa atual de uso e ocupação do solo, além dos dados já citados (dados meteorológicos, mapa pedológico e MDE). O período de simulação corresponde aos anos de 2004 a 2017, considerando 4 anos de aquecimento do modelo (*"warm up"*), portanto os resultados foram analisados no período de 2008 a 2017. A fim de aprimorar a acurácia dos resultados da modelagem e adequar o modelo à realidade da BHRP, alterou-se os seguintes parâmetros: fator C (USLE_C) e fator P (USLE_P), da equação

universal de perda do solo, curva-número para a condição de umidade II (CN2), além da inserção do calendário das operações realizadas no cultivo da cana-de-açúcar (considerando o cultivo convencional de cana de ano e meio em rotação com soja e cinco cortes). Os valores referentes aos fatores C e P (Tabela 3 e 4, respectivamente) foram determinados a partir de revisão bibliográfica e a curva-número foi atualizada seguindo a classificação proposta por Sartori (2004).

Tabela 3. Valores do fator C (USLE_C) utilizados para os diferentes usos do solo.

Código SWAT	Descrição do uso	Fator C	Fonte
AGRL	Agricultura genérica	0,1345	Tavares (2001)
BSVG	Solo exposto	1,0000	Tavares (2001)
CORN	Cultura anual	0,1100	De Maria e Lombardi Neto (1997)
EUCA	Reflorestamento	0,0491	Tavares (2001)
FRSE	Vegetação nativa	0,0004	Tavares (2001)
LETT	Olericultura	0,1350	Tavares (2001)
ORAN	Citricultura	0,0875	Tavares (2001)
PAST	Pastagem	0,0080	Weill e Sparovek (2008)
RNGB	Macega	0,0010	Machado et al. (2009)
SUGC	Cana-de-açúcar	0,3066 ¹	Weill e Sparovek (2008); Corrêa et al. (2016)
WETL	Várzeas	0,0004	Tavares (2001)

⁽¹⁾ cana-de-açúcar convencional.

Tabela 4. Valores do fator P (USLE_P) utilizados para as diferentes faixas de declividade.

Declividade (%)	Fator P
0-3	0,5
3-6	0,5
6-9	0,6
9-12	0,7
12-25	0,8
>25	0,9

Fonte: Tavares (2001), adaptado.

O banco de dados referente aos parâmetros dos solos foi construído de acordo com as características dos solos da bacia em questão. Os parâmetros SOL_K (condutividade hidráulica saturada do solo), SOL_AWC (capacidade de água disponível no solo), SOL_ALB (albedo do solo), USLE_K (erodibilidade do solo – fator K da equação universal de perda de solo), pH (potencial hidrogeniônico do solo), SOL_BD (densidade do solo), SOL_CBN (conteúdo de carbono orgânico do solo) e teores de areia, silte e argila, foram determinados no projeto “Diagnóstico Agroambiental para a Bacia de Ribeirão do Pinhal”

(Moraes et al., 2009), e atualizados no banco de dados. O fator SOL_K foi determinado com a utilização do Permeâmetro modelo IAC (Vieira, 1998).

A bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal foi dividida em quatro sub-bacias, de modo que o exutório da bacia coincidissem com o ponto em que haviam dados de vazão observados. A rede hidrográfica foi definida pelo QSWAT, e a partir da rede hidrográfica e da inserção do exutório (“outlet”) as sub-bacias foram geradas e, posteriormente, mescladas chegando ao número de quatro sub-bacias, conforme Figura 3.

Figura 3. Delimitação das sub-bacias utilizadas e rede hidrográfica gerada pelo QSWAT.

Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo

A calibração do modelo é o processo de ajuste dos melhores valores da variável resposta estimados pelo modelo aos dados observados, a fim de minimizar as diferenças entre as variáveis estimadas e observadas (Blainski et al., 2017; Pereira et al., 2016; Sarrazin et al., 2016; Bhattacharjee et al., 2019; Triana et al., 2019; Tegegne et al., 2019). Este procedimento foi realizado de maneira semiautomática, com a utilização do software SWAT: *Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP). As análises de incertezas foram realizadas utilizando-se o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2), disponível neste software. Segundo Abbaspour (2015a), o SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino para o processo de definição dos valores dos parâmetros, os quais têm sua faixa inicial previamente definida pelo usuário. Após a realização das iterações, as novas faixas de valores sugeridas pelo programa são atualizadas, até que sejam alcançados os índices estatísticos satisfatórios (Abbaspour et al., 2017).

Optou-se pela utilização deste algoritmo haja vista a extensa utilização do mesmo em procedimentos de calibração em estudos realizados no Brasil e no mundo (Brighenti et al., 2016; Blainski et al., 2017; Santos et al., 2018; Ali Zomorodian e Dowlatabadi, 2019; Strehmel et al., 2016). Realizaram-se 750 simulações para cada iteração, até que fossem atendidas as seguintes condições: melhor ajuste dos dados estimados aos observados e, que os valores dos parâmetros utilizados estivessem dentro da faixa de realidade.

A definição dos parâmetros utilizados nos procedimentos de análise de sensibilidade global, calibração e validação do modelo foi feita por meio de revisão de literatura. O critério utilizado para a escolha destes parâmetros baseou-se na influência dos parâmetros no ciclo hidrológico. Os parâmetros utilizados, bem como o método e as faixas de valores, são elencados na Tabela 5. Destaca-se que neste estudo foi realizada a calibração mensal para a variável vazão.

Tabela 5. Descrição dos parâmetros utilizados para análise de sensibilidade do modelo.

Parâmetro	Descrição	Faixa inicial
*v_SURLAG.bsn	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial (adimensional)	0 a 24
v_ALPHA_BF.gw	Fator de recessão do fluxo de base (dias)	0 a 1
v_GW_DELAY.gw	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)	30 a 450
v_GWQMN.gw	Profundidade mínima do aquífero superficial para escoamento superficial (mm H ₂ O)	0 a 2
v_GW_REVAPMN.gw	Coefficiente de escoamento subterrâneo (adimensional)	0,02 a 0,2
v_RCHRG_DP.gw	Fator de percolação para o aquífero profundo (adimensional)	0 a 1
v_REVAPMN.gw	Limite mínimo de água para a ocorrência do escoamento superficial (mm)	0 a 1000
v_ESCO.hru	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0 a 1
v_EPCO.hru	Fator de compensação de água pelas plantas (adimensional)	0 a 1
**r_SLSSUBSN.hru	Comprimento médio do declive (m)	-0,25 a 0,25
r_CN2.mgt	Curva-número na condição de umidade II (adimensional)	-0,2 a 0,2
r_USLE_P.mgt	Fator P da MUSLE ¹ (relativo às práticas de conservação)	-0,25 a 0,25
v_BIOMIX.mgt	Eficiência do revolvimento biológico (adimensional)	0 a 1
r_SOL_Z.sol	Profundidade da camada do solo (mm)	-0,25 a 0,25
r_SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O/mm solo)	-0,25 a 0,25
r_SOL_K.sol	Condutividade hidráulica (mm.h ⁻¹)	-0,25 a 0,25
r_SOL_ALB.sol	Albedo do solo (adimensional)	-0,25 a 0,25
v_CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm.h ⁻¹)	-0,1 a 0,1
v_CH_N2.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal (adimensional)	-0,01 a 0,3

* v: método de substituição (neste método o valor do parâmetro é substituído por outro valor, obtido na melhor simulação da iteração)/ **r: método relativo (neste método o valor atual é multiplicado por (1+x), onde x é o valor obtido na melhor simulação da iteração) – Abbaspour (2015a). Fonte: Paz et al. (2018), adaptado.

A calibração foi realizada com dados mensais de vazão obtidos no posto fluviométrico localizado no exutório da bacia, correspondentes aos anos de 2011 (dezembro), 2012 (completo) e 2015 (janeiro a novembro) e a validação, com os dados parciais dos anos de 2015 (dezembro), 2016 (outubro, novembro e dezembro) e 2017 (janeiro a agosto) do mesmo posto fluviométrico.

Utilizou-se o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970), como função objetivo. Os índices estatísticos RSR (*Root mean square error to the standard deviation of measured data*) e PBIAS (*Percent bias*), foram utilizados como estatísticas complementares, segundo recomendações de Moriasi et al. (2007), para a calibração hidrológica. O NSE representa o ajuste dos dados de vazão observados e estimados em uma bacia hidrográfica, conforme equação (3):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (Q_{oi} - Q_{ei})^2}{\sum_{i=0}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

em que: NSE= coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; Q_{oi} = vazão observada no dia i ($m^3 s^{-1}$); Q_{ei} = vazão estimada no dia i ($m^3 s^{-1}$); $\bar{Q}_o$ = vazão média observada durante o período ($m^3 s^{-1}$); n = número de dias de dados observados.

O PBIAS representa a tendência dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados correspondentes. Valores de PBIAS iguais a 0,00 indicam que não há viés no ajuste dos

dados estimados aos observados. Valores positivos indicam que os dados estimados estão subestimados, em relação aos observados, enquanto que valores negativos indicam que os dados estimados estão superestimados em relação aos observados (Moriasi et al. 2007), PBIAS é calculado conforme equação (4):

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (4)$$

em que: PBIAS é o viés dos dados estimados em relação aos observados, em porcentagem; Y_i^{obs} = dado observado e Y_i^{sim} = dado simulado.

O índice RSR (*RMSE- observations standard deviation ratio*) é amplamente utilizado como um dos critérios de avaliação do desempenho do modelo no processo de calibração. Os valores ótimos são os que se encontram próximos de 0 indicam que não há variação residual, ou seja, boa simulação do modelo para a variável em análise (Moriasi et al., 2007). RSR é calculado conforme equação (5):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2 \right]} \quad (5)$$

em que: RSR= taxa de desvio padrão das observações, adimensional; Y_i^{obs} = dado observado; Y_i^{sim} = dado simulado e Y^{mean} = média

dos dados observados. O critério de classificação utilizado é apresentado na Tabela 6.

Uma simplificação dos procedimentos realizados neste trabalho está descrita na Figura 4. Os dados de entrada foram inseridos no QSWAT, o banco de dados de solos foi atualizado e os parâmetros foram alterados. Após estas modificações realizou-se as simulações com o período de aquecimento de 4 anos. Os resultados de

vazão obtidos no modelo bem como os dados de vazão observados, foram importados para o software SWAT-CUP. Realizou-se a análise de sensibilidade e em seguida a calibração. Após a calibração do modelo o mesmo foi validado e os novos valores dos parâmetros calibrados foram inseridos no QSWAT. Em sequência realizaram-se novas simulações com o modelo calibrado.

Tabela 6. Critérios de classificação utilizados para a calibração da vazão em escala de tempo mensal.

Classificação	NSE	PBIAS	RSR
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$< \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$
Insatisfatório	$\leq 0,50$	$\geq \pm 25$	$> 0,70$

Fonte: Moriasi et al. (2007), adaptado.

Figura 4. Fluxograma operacional da análise com o modelo QSWAT.

Resultados e discussão

Alteração dos parâmetros e calendário de operações

A alteração dos parâmetros (USLE_C, USLE_P, CN2, calendário de operações da cana-de-açúcar e construção do banco de dados referente aos solos), exerce influência direta nos valores de vazão simulados pelo modelo. De modo que, após a inserção destes parâmetros, principalmente o calendário de operações da cana-de-açúcar, a vazão

simulada pelo modelo apresentou melhor correlação com a vazão observada (Figura 5), com menor valor para a inserção ($a=0,6192$) e maior coeficiente de Pearson ($R^2=0,6234$).

Figura 5. Regressão linear entre vazão observada e vazão simulada. a) sem a inserção do calendário de operações da cana-de-açúcar; b) com a inserção do calendário de operações da cana-de-açúcar.

O aumento no coeficiente de Pearson com a inserção do calendário de operações da cana-de-açúcar evidencia a importância da alteração dos parâmetros de uso e manejo, e não apenas daqueles que descrevem a caracterização física da bacia hidrográfica, especialmente no caso de bacias hidrográficas com o uso predominantemente agrícola, como é a BHRP.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade identifica os parâmetros mais sensíveis do modelo, ou seja, os parâmetros que quando alterados influenciam

significativamente a variável avaliada, no caso a vazão. Os parâmetros mais sensíveis foram utilizados nos procedimentos de calibração e validação do modelo. Destaca-se que, a sensibilidade dos parâmetros foi determinada considerando, simultaneamente, o módulo do *t-Stat* e o *p-value*, de modo que os parâmetros mais sensíveis foram os que apresentaram maior valor absoluto de *t-Stat* e menores valores de *p-value* (Abbaspour, 2015a). Em sequência, realizou-se a calibração do modelo, que determinou os valores ajustados para estes parâmetros (Tabela 7).

Tabela 7. Parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal e os valores ajustados após a calibração.

Parâmetro	Descrição	<i>t-Stat</i>	<i>p-value</i>	Valor ajustado
*r_CN2	Curva-número na condição de umidade II (adimensional)	40,843908021	0,000000000	0,208131
**v_GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)	-34,089498116	0,000000000	20,353958
v_ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	33,493393485	0,000000000	0,978143
v_RCHRG_DP	Fator de percolação para o aquífero profundo (adimensional)	-19,941520073	0,000000000	0,035361
r_SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O/mm solo)	-13,019358710	0,000000000	0,316945
v_EPCO	Fator de compensação de água pelas plantas (adimensional)	-11,051935580	0,000000000	0,442578
v_CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal (adimensional)	-9,293794383	0,000000000	0,084722
r_SOL_K	Condutividade hidráulica (mm.h ⁻¹)	6,420850715	0,000000000	0,258483
r_SLSUBBSN	Comprimento médio do declive (m)	-6,234067962	0,000000001	0,179299

*r: método relativo (neste método o valor atual é multiplicado por (1+x), onde x é o valor obtido na melhor simulação da iteração) / ** v: método de substituição (neste método o valor do parâmetro é substituído por outro valor, obtido na melhor simulação da iteração) – Abbaspour (2015a).

Na análise de sensibilidade percebe-se que os parâmetros de maior sensibilidade são os relacionados com o uso e manejo do solo e infiltração de água no solo: relação entre precipitação, infiltração de água no solo e manejo (CN2), capacidade de água disponível, condutividade hidráulica, percolação e evaporação de água (pelo solo e espécies vegetais). O modelo também é sensível ao comprimento médio do declive, provavelmente porque está relacionado com a velocidade da enxurrada e a infiltração de água no solo. Esse fato ocorre devido à maior influência desses parâmetros na estimativa da vazão (Paz et al., 2018). CN2 foi o parâmetro que apresentou maior sensibilidade na bacia do Ribeirão do Pinhal, a maior sensibilidade desse parâmetro também foi relatada por Fukunaga et al. (2015), Pereira et al. (2016) e Paz et al. (2018). Destaca-se também a influência dos parâmetros relacionados às águas subterrâneas (GW_DELAY e RCHRG_DP), fato que ocorre em razão da predominância de solos profundos na sub-bacia, como Latossolo Vermelho-Amarelo (42%). A

sensibilidade desses parâmetros, relacionados às águas subterrâneas, solo e culturas, de acordo com Paz et al. (2018) ocorre devido à maior influência destes no ciclo hidrológico. A sensibilidade dos parâmetros está relacionada às características edafoclimáticas e fisiográficas de cada bacia hidrográfica.

A calibração resultou em valores satisfatórios para os índices estatísticos avaliados e na validação os resultados foram classificados como bons (Tabela 8). Estes resultados corroboram com os trabalhos realizados por Pereira et al., 2016; Monteiro et al., 2016; Blainski et al., 2017; Paz et al., 2018; Rafee et al., 2019; Nunes et al., 2019, os quais obtiveram resultados satisfatórios nos procedimentos de calibração hidrológica do SWAT em bacias localizadas em território brasileiro, com usos predominantemente agrícolas. Na Figura 6 tem-se a comparação entre a vazão observada e simulada para o período de disponibilidade de dados observados (2011-2017), antes e depois do processo de calibração e validação.

Tabela 8. Índices estatísticos obtidos nas etapas de calibração e validação do modelo.

	Calibração	Validação
NSE	0,64	0,58
PBIAS	15,2	-2,8
RSR	0,60	0,56

Figura 6. Histograma da precipitação e hidrograma da vazão observada e simulada para o período de disponibilidade de dados observados (2011-2017). a) Hidrograma antes da realização da calibração do modelo; b) hidrograma após a realização da calibração e validação do modelo

Verifica-se que, em geral, há um bom ajuste dos dados simulados aos observados, no entanto os picos de vazão não são bem representados, em alguns casos (Figuras 6a e 6b). Comportamentos como esse foram observados por Pereira et al. (2016) e Viana et al. (2018), e são atribuídos à distribuição temporal e espacial das chuvas, que pode não ter sido bem representada devido à escassez de estações pluviométricas, com dados de qualidade, na área da bacia hidrográfica (Pereira et al., 2016). Destaca-se também, que os fatores relacionados ao escoamento superficial, subsuperficial e de base, podem estar influenciando

a representação temporal da vazão, já que a vazão medida na calha dos rios é influenciada por esses fatores (Abbaspour et al., 2015b).

A baixa disponibilidade de dados observados de vazão, não foi impeditiva para a realização da calibração e validação do modelo, conforme demonstrado pelos índices estatísticos obtidos nestes processos. Deste modo, pode-se inferir que a calibração do modelo é função de um conjunto de dados e parâmetros representativos da bacia hidrográfica em estudo, logo, é dependente do conhecimento pré-existente a respeito da bacia hidrográfica.

Os valores da vazão máxima, média, mínima e desvio padrão das vazões observada e simulada (Tabela 9) indicam bom ajuste dos dados simulados aos observados, com a vazão média apresentando valores 3% maiores nos dados simulados. As vazões máximas e mínimas simuladas foram subestimadas em relação à vazão

observada, porém dentro da faixa de valores aceitável, conforme resultados obtidos nos procedimentos de calibração e validação. A análise desses resultados permite inferir que, há maior acurácia nos resultados das vazões médias simuladas.

Tabela 9. Comparativo das vazões máxima, média, mínima e desvio padrão das vazões observadas e simuladas.

	Vazão Observada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Vazão Simulada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Máxima	20,49	11,59
Média	4,84	4,99
Mínima	1,36	0,33
Desvio Padrão	4,47	3,27

A compreensão dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é de suma importância para o planejamento, gestão e monitoramento de bacias hidrográficas, principalmente no que se refere à conservação da qualidade e quantidade de água. O estudo das variáveis hidrológicas é de grande importância para a aplicação de legislações específicas, estudos de hidráulica e outros (Pereira et al., 2016; Blainski et al., 2017).

A curva de permanência é uma representação da probabilidade de ocorrência de determinados valores de vazões em uma rede hidrográfica. A Q_{95} representa a vazão em que 95%

dos demais valores são superiores a ela, o mesmo princípio vale para Q_{90} e Q_{50} . Observa-se que o modelo, em geral, teve bom ajuste aos dados observados (Figura 7), havendo subestimativa nas baixas probabilidades de ocorrência, até 10% e nas elevadas, a partir de 80%. No entanto, o comportamento do modelo em subestimar os dados observados foi verificado no procedimento de calibração pelos valores do PBIAS (Tabela 8), e encontra-se dentro dos limites aceitáveis. Blainski et al. (2017), também observaram comportamento semelhante na análise da curva de permanência dos valores de vazão simulados e observados.

Figura 7. Curva de permanência da vazão observada e simulada.

Os resultados obtidos no modelo SWAT para a bacia do Ribeirão do Pinhal, após a calibração, auxiliarão na gestão de recursos hídricos da referida bacia. As aplicações dos resultados gerados no modelo são inúmeras, desde a previsão de cheias, impacto das mudanças no uso e ocupação do solo na vazão e produção de sedimentos, estudos de erosão do solo, recomendação de práticas de conservação do solo, estudo do balanço hídrico na bacia (Pereira et al., 2016; Santos et al., 2018).

O conhecimento dos fatores que mais interferem na vazão da bacia hidrográfica é de grande importância para a obtenção de melhores ajustes dos dados simulados aos observados. Além disso, a realização da análise de sensibilidade é fundamental para o entendimento e conhecimento dos parâmetros que mais influenciam a variável estudada na bacia hidrográfica.

Vale ressaltar que resultados satisfatórios no processo de calibração e validação do modelo foram obtidos após o teste da combinação de vários períodos de dados disponíveis. Além disso, a alteração dos parâmetros que apresentam relação direta com o manejo, como a curva-número e o calendário de operações da cana-de-açúcar, influenciaram os valores de vazão simulados, os quais se aproximaram dos valores observados. Desse modo, para a realização da simulação hidrológica, calibração e validação de modelos hidrológicos é indispensável o conhecimento prévio sobre a bacia em que se está trabalhando, além da inserção de dados confiáveis e de qualidade no modelo.

Conclusões

O modelo SWAT mostrou-se eficiente para a simulação da vazão na escala de tempo mensal, após a calibração e validação do modelo, por meio dos softwares QSWAT e SWAT-CUP, utilizando o algoritmo SUFI2, na bacia do Ribeirão do Pinhal, mesmo com limitados dados de vazão observados.

O ajuste de parâmetros do SWAT (USLE_P, USLE_C, CN2) e do calendário de operações do cultivo de cana-de-açúcar, de acordo com as características da bacia, foi necessário para validação do modelo SWAT e permitiu uma melhor estimativa da vazão simulada.

A curva de permanência da vazão observada e simulada demonstra o ajuste

satisfatório dos valores simulados aos observados, evidenciando a aplicabilidade do modelo SWAT para a gestão hídrica na bacia do Ribeirão do Pinhal.

O SWAT pode ser utilizado como ferramenta de gestão de recursos hídricos e planejamento agroambiental na predição de cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão do Pinhal. Estudos subsequentes a estes permitirão simular cenários de alterações no uso e ocupação das terras, de práticas de manejo do solo agrícola e verificar os seus impactos na produção de água e sedimentação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro e segundo autores.

Referências

- Abbaspour, K.C. 2015a. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A user manual. 100 p. Ewag.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 2015b. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* [online] 524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbaspour, K. C.; Vaghefi, S. A.; Srinivasan, R., 2017. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. *Water (Switzerland)* [Online] 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Ali Zomorodian, S. M. e Dowlatabadi, S., 2019. Modeling of river discharge in the Firoozabad watershed using soil and water assessment tool model. *International Journal of Energy and Water Resources* [Online] 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42108-018-0007-y>
- Andrade, C.V. L., Montenegro, S.M.G.L., Lima, J.R.S., Montenegro, A.A.A., Magalhães, A.G., 2017. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do

- Brasil. Journal of Environmental Analysis and Progress [Online] 2. DOI: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/1443>
- 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 [Online] 17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; Willians, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and Assessment part I: model development. Journal of the American Water Resources Association [Online] 34. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Ashikary, P.P., Sena, D. R., Dash, J. C., Mandal, U., Nanda, S., Madhu, M., Sahoo, D.C., Mishra, P.K., 2019. Effect of Calibration and validation decisions on streamflow modelling for a heterogeneous and low runoff- producing river basin in India. Journal of Hydrologic Engineering [Online] 24. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001792
- Bhattacharjee, N.V., Ranjan, P., Mandal, A., Tollner, E.W., 2019. A history matching approach for calibration hydrological models. Environmental and Ecological Statistics [Online] 26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10651-019-00420-9>
- Blainski, E.; Acosta, E.; Nogueira, P. C. P., 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science [Online] 12. DOI: <http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v12n2/1980-993X-ambiagua-12-02-00226.pdf>
- Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., Mendiõdo, E. M., 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering [Online] 8. DOI: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765/0>
- Brighenti, T. M.; Bonumá, N. B.; Chaffe, P. L. B., 2016. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [Online] 21. DOI: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2318-03312016000100053&script=sci_abstract&tling=pt
- COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (CBH-PCJ), 2015. Relatório da Situação dos Recursos Hídricos. Editora Parla, Piracicaba.
- Corrêa, E.A., Moraes, I.C., Pinto, S.A.F., Lupinacci, C.M., 2016. Perdas de solo, razão de perdas de solo e fator cobertura e manejo da cultura de cana-de-açúcar: primeira aproximação. Revista do Departamento de Geografia USP [Online] 32. DOI: 10.11606/rdg.v2i0.116671
- De Maria, I.C. e Lombardi Neto, F., 1997. Razão de perdas de solo e fator C para sistemas de manejo da cultura do milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo 21, 263-270.
- EMBRAPA, 2013. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. 3. ed.rev.ampli. Editora Embrapa, Brasília.
- Franco, A.C.L. e Bonumá, N.B., 2017. Multi-variable SWAT model Calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [Online] 22. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716090>
- Fukunaga, D.C., Cecílio, R.A., Zanetti, S.S., Oliveira, L.T., Caiado, M.A.C., 2015. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. Catena [Online] 125. DOI: 10.1016/j.catena.2014.10.032
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., Arnold, J. G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers [Online] 50. DOI: https://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/asabe_swat.pdf
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering Agriculture 1, 96-99.
- Khelifa, W. B., Hermassi, T., Strohmeier, S., Zucca, C., Ziadat, F., Boufaroua, M., Habaieb, H., 2017. Parametrizations of the effect of bench terraces on runoff and sediment yield by swat modeling in a small semi-arid watershed in northern Tunisia.

- Land Degradation & Development [Online] 28. DOI: 10.1002/ldr.2685
- Kim, Y.D., Kim, J.M., Kang, B., 2016. Projection of runoff and sediment yield under coordinated climate change and urbanization scenarios in Doam Dam watershed, Korea. *Journal of Water and Climate Change* [Online] 8. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.068>
- Lepsch, I.F.; Bellinazzi Jr., R.; Bertolini, D.; Espíndola, C.R., 1991. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4a aproximação, 2a. impressão revisada. Editora Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas.
- Machado, M. L., Alves, J. S., Gomes, I., Vieira, E. M., Simão, M. L. R., Naime, U. B., 2009. Levantamento sistemático dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solos (USLE) para o delineamento de áreas com potencial erosivo da bacia PN1 – IGAM, Minas Gerais (resultados parciais). XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7733–7739.
- Mello, K., Randhir, T. O., Valente, R. A., Vettorazzi, C. A., 2017. Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering* [Online] 108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>
- Monteiro, J. A. F., Kamali, B., Srinivasan, R., Abbaspour, K., Gücker, B., 2016. Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human-impacted Brazilian catchment. *Ecohydrology* [Online] 9. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1726>
- Moraes, J. F. L.; Adami, S.; Coelho, R.M.; Chiba, M.K.; Ambrósio, L.A. 2009. Diagnóstico Agroambiental para a gestão e monitoramento da bacia de Ribeirão do Pinhal. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.
- Moriasi, D.N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* [Online] 50. DOI: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R., 2011. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation. Version 2009. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research. Disponível: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Nocelli, R. C. F., Zambon, V., Silva, O.G.M., Morini, M.S.C., 2017. Histórico da cana no Brasil: Contribuições e importância econômica, in: Fontanetti, C. S.; Bueno, O. C., Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica. Editora Canal 6, Bauru.
- Nunes, H.G.G.C., Sousa, A.M.L., Santos, J.T.S., 2019. Simulation of flow in the Capim River (PA) using the SWAT Model [Online] 26. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017116>
- Paz, Y. M., Galvêncio, J. D., Holanda, R. M., Srinivasan, R., Jones, C. A., 2018. 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* [Online] 11. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.1.p371-388>
- Pereira, D.R., Martinez, M. A., Pruski, F. F., Silva, D. D., 2016. 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* [Online] 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Pereira, D.R., Martinez, M.A., Silva, D.D., Pruski, F.F., 2016b. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrologic: Regional Studies* [Online] 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.008>
- Pontes, L.M., Viola, M.R., Silva, M.L.N., Bispo, D.F.A., Curi, N., 2016. Hydrological modelling of tributaries of Cantareira System, Southeast Brazil, with the SWAT model. *Engenharia Agrícola* [Online] 36. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1037-1049/2016>
- Premanand, B. D., Satishkumar, U., Maheshwara Babu, B., Parasappa, S.K., Dandu, M., Kaleel, I., Rajesh, N.L., Biradar, S.A., 2018. QSWAT Model Calibration and Uncertainty Analysis for Stream

- Flow Simulation in the Patapur Micro-Watershed Using Sequential Uncertainty Fitting Method (SUFI-2). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* [Online] 7. DOI: <https://www.ijcmas.com/7-4-2018/B.D.%20Premanand3,%20et%20al.pdf>
- QGIS Development Team, 2018. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível: <http://qgis.org/en/site>
- Qiu, J., Yang, Q., Zhang, X., Huang, M., Adam, J.C., Malek, K., 2019. Implications of water management representations for watershed hydrological modeling in the Yakima river basin. *Hydrological and Earth System Sciences* [Online] 23. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-35-2019>
- Rafee, S. A. A., Uvo, C. B., Martins, J. A., Domingues, L. M., Rudke, A. P., Fujita, T., Freitas, E. D., 2019. Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. *Water* [Online] 11. DOI: doi.org/10.3390/w11050882
- Rodrigues, E.L., Elmiro, M.A.T., Braga, F.A., Jacobi, C.M., Rossi, R.D., 2015. Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [Online] 19. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p70-76>
- Rolim, G. S., Camargo, M. B. P., Lania, D. G., Moraes, J. F. L., 2007. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia* [Online] 66. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>
- Ronquim, C. C., Fonseca, M. F., 2018. Avanço das áreas de cana-de-açúcar e alterações em áreas de agropecuária no interior paulista. Documentos 123, Embrapa Territorial, Campinas.
- Santos, J., Nunes, H. G. G. C., Pontes, A. K. S., Sousa, A. M. L., 2018. O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA. *Revista de Gestão de Água da América Latina* [Online] 15. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/reg.v15e2>
- Sarrazin, F.; Pianosi, F.; Wagener, T., 2016. Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation. *Environmental Modelling and Software* [Online] 79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005>
- Sartori, A., 2004. Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (Dissertação de Mestrado). Campinas, Universidade Estadual de Campinas.
- Silva, A.K.L., Souza, A.M.L., Santos, J.T.S., Villela, J.M., Martorano, L.G., Crestana, S., 2018. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [Online] 22. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>
- Strehmel, A., Jewett, A., Schuldt, R., Schmalz, B., Fohrer, N., 2016. Field data-based implementation of land management and terraces on the catchment scale for an eco-hydrological modelling approach in the Three Gorges Region, China. *Agricultura Water Management* [Online] 175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.007>
- Tavares, A.C.F., 2001. Diagnóstico Agroambiental para Gestão do Uso da Terra da Microbacia do Rio Jundiá-Mirim. Dissertação (Mestrado) – Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas.
- Tegegne, G., Kim, Y-O, Seo, S.B., Kim, Y., 2019. Hydrological modelling Uncertainty analysis for different flow quantiles: a case study in two hydrogeographically different watersheds. *Hydrological Sciences Journal* [Online] 64. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1587562>
- Tirupathi, C., Shashidhar, T., Srinivasan, R., 2018. Analysis of rainfall extremes and water yield of Krishna river basin under future climate scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies* [Online] 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.10.004>
- Triana, J.S.A., Chu, M.L., Guzman, J.A., Moriasi, D.N., Steiner, J.L., 2019. Beyond model metrics: The perils of calibrating hydrologic models. *Journal of Hydrology* [Online] 578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124032>
- Viana, J. F. S., Montenegro, S. M. G. L., Silva, B. B., Silva, R. M., Sousa, W. S., 2018. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – PE utilizando o modelo SWAT. *Journal of Environmental Analysis and Progress* [Online] 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2018.02.005>

- <https://doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1709.155-172>.
- Vieira, S.R., 1998. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. O Agrônomo, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.
- Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Grizzetti, B., Weissteiner, C., Pastori, M., 2016. Impact of current riparian land on sediment retention in the Danube River Basin. Sustainability of Water Quality and Ecology [Online] 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2016.08.001>
- Weill, M. A. M.; Sparovek, G. 2008. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. Revista Brasileira de Ciência do Solo [Online] 32. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034>