



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Aplicação do modelo SWAT na estimativa da vazão na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco

Madson Tavares Silva¹, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva², Enio Pereira de Souza³
Argemiro Lucena Araújo⁴

¹Bolsista de Pós-Doutorado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil. CEP.: 58429-140 | Fone: (83) 2101.1202. madson_tavares@hotmail.com (autor correspondente). ²Prof. Doutor, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil. CEP.: 58429-140. vicente@dca.ufcg.edu.br ³Prof. Doutor, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil. CEP.: 58429-140. esouza@dca.ufcg.edu.br ⁴Campina Geotech Consultoria em Meteorologia LTDA, Tito Sodré, 539 - Bairro Jose Pinheiro, Campina Grande - PB, Brasil. CEP.: 58407-295. argemiro.geotech@gmail.com

Artigo recebido em 09/11/2015 e aceito em 24/12/2015

RESUMO

Este estudo teve como objetivo a validação do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco – BHSRSF, bem como a análise de sensibilidade dos parâmetros associados a modelagem hidrossedimentológica, com base em dados de vazão das estações fluviométricas de Abreus e Juazeiro localizadas no Estado da Bahia. O período de validação correspondeu aos anos de (1993-2000) para Abreus e (1995-2004) para Juazeiro, com intuito de avaliar os resultados gerados foi utilizado o erro médio absoluto, erro médio percentual e a raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado. De acordo com os resultados obtidos verificou-se que o modelo SWAT foi sensível ao parâmetro Curva Número (Cn2) e aos parâmetros relacionados ao escoamento superficial e de base, denotando a influência do uso e da cobertura do solo. Ainda foi observado que o modelo conseguiu simular satisfatoriamente os hidrogramas observados nas estações fluviométricas utilizadas neste estudo, para ambas as estações. Os valores obtidos para raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RQMDN), o erro médio absoluto (EMA) e o erro médio percentual (EMP) foram considerados satisfatórios.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, semiárido, escoamento superficial.

SWAT model application to estimate the flow in the basin of lower-middle São Francisco River

ABSTRACT

This study aimed to validate the Soil and Water Assessment Tool Model (SWAT) in Basin Lower-middle São Francisco River - BHSRSF as well as a sensitivity analysis of the parameters associated with Hydrossedimentological modeling, based on flow data from gauged stations of Abreus and Juazeiro located in the State of Bahia. The validation period covered the years (1993-2000) and to Abreus (1995-2004) for Juazeiro, in order to assess the results generated was used the mean absolute error, mean percentage error and square root of the mean square of the standard error. According to the results it was found that the SWAT model was sensitive to parameter Curve Number (CN2) and parameters related to runoff and base, showing the influence of use and land cover. It was also observed that the model was able to satisfactorily simulate the observed hydrograms gauged stations used in this study for both stations. The values obtained for the standard square root mean square error (RQMDN), mean absolute error (MPE) and the average percentage error (EMP) were considered satisfactory.

Keywords: hydrological modeling, semi-arid, runoff.

Introdução

As bacias hidrográficas nordestinas, principalmente aquelas situadas na porção semiárida, têm sido degradadas ao longo de décadas devido à extensiva atividade antrópica

como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e pecuária (Aragão et al., 2013). Como relatam Albuquerque et al. (2001) o desmatamento indiscriminado da vegetação nativa para a agricultura e as queimadas sucessivas com manejo inadequado do solo tem

contribuído, juntamente com as secas prolongadas, para comprometer o frágil equilíbrio do meio ambiente destas regiões. A erosão dos solos tem causas relacionadas à própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e a forma das encostas, o tipo de cobertura vegetal e também a ação do homem, como o uso e o manejo da terra que na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos (Mendonça e Guerra, 2004). O processo erosivo pode ser minimizado com o uso integrado de práticas em que o ambiente é considerado como um todo.

A mudança no uso da terra é um dos impactos mais notórios em paisagens agrícolas e urbanas em muitas regiões do mundo. Além disso, as mudanças climáticas associadas às mudanças no uso da terra deverão ter um forte impacto sobre o balanço hídrico de bacias hidrográficas (Defries e Eshleman, 2004).

Existem diferentes modelos sendo aplicados em estudos em todo mundo, descrevendo principalmente os processos hidrológicos de forma física ou por base de abordagens conceituais. Na maioria dos casos os modelos de base física são preferidos, pois grande parte dos seus parâmetros de entrada é mensurável e passível de modelagem em função de alterações nas condições de contorno (Moussa et al., 2002). Entretanto, Machado e Vettorazzi (2003) relatam que a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas é um problema complexo, verificando como maior limitante na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico, no qual essa variabilidade implicará em limitações na aplicação de modelos. Todavia durante a última década, a integração dos SIG e modelagem ambiental têm facilitado uma conexão que oferece uma capacidade para prever as mudanças ambientais e avaliar os impactos em escala local, regional e global (Corwin et al., 2003). Neste contexto, Tucci e Clarke (1998) afirmam que o SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos, ou seja, a integração entre SIG e modelos hidrológicos, atenua principalmente os problemas de manipulação e gerenciamento de dados. Segundo Tsou e Whitemorez (2001), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) fornece uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e exibir dados e pode facilitar a compilação destes,

a calibração do modelo e a exibição de parâmetros e resultados.

Um dos modelos mais utilizados no mundo para simular os processos hidrossedimentológicos é o modelo *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT. Este é um modelo distribuído que pode ser acoplado a um ambiente SIG, que considera a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. O SWAT foi desenvolvido com o objetivo de estimar o impacto de diferentes práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água, na perda do solo e carga de poluentes em uma bacia hidrográfica (Neitsch et al., 2005). No Brasil os estudos de Baldissera (2005) analisando as vazões líquidas mensais nas condições da Bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, e Machado e Vettorazzi (2003) avaliando a produção de sedimentos na bacia do Ribeirão dos Marins – SP são referências preliminares na aplicação do modelo SWAT. Uzeika (2009) aplicou o SWAT na microbacia de Arvorezinha, Rio Grande do Sul, com objetivo de simular dados hidrossedimentológicos; entretanto, tal autora não utilizou nenhuma ferramenta de calibração. Andrade et al. (2013) aplicaram o modelo SWAT no Alto Rio Grande, MG com objetivo de analisar as simulações do escoamento superficial em uma unidade hidrológica com predominância de solos da classe Latossolos. A simulação de produção e transporte de sedimento também foi objeto de estudo por Galharte et al. (2014) quando aplicaram o SWAT na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, localizada no município de São Carlos, SP. Mais recentemente Rodrigues et al. (2015) utilizaram o SWAT na modelagem de cenários de uso de solo e efeitos sobre a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Pará, MG.

Este estudo teve como objetivo realizar a validação do modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco – BHSRSF, bem como a análise de sensibilidade dos parâmetros associados a modelagem hidrossedimentológica, com base em dados de vazão das estações fluviométricas de Abreus e Juazeiro localizadas no Estado da Bahia .

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na região do Submédio do Vale do rio São Francisco, que abrange áreas dos Estados da Bahia e Pernambuco (Figura 1), estendendo-se da cidade de Remanso até a cidade de Paulo Afonso ambas no Estado da Bahia, com 110.446,00 km², ou 17% da área da

Bacia do rio São Francisco. Essa região tem 440 km de extensão e a sua população é de 1,944 milhões de habitantes CODEVASF (1999).

O Submédio do Vale do São Francisco está localizado entre os paralelos 8 e 9°S, cujo clima, BSh segundo classificação Köppen, é caracterizado como tropical semiárido, com temperatura média anual em torno dos 26 °C, pluviosidade de aproximadamente 500 mm e altitude de 330 m em relação ao nível do mar (Teixeira, 2010).

O período chuvoso concentra-se entre os meses de novembro e abril, com 90% do total anual. A quadra chuvosa, de janeiro a abril, contribui com 70% do total anual. Os meses mais quentes são outubro e novembro e os mais frios junho e julho. As médias mensais de temperatura média do ar variam de 24,1 °C a 28,0 °C, ocorrendo uma pequena amplitude térmica anual, atribuída à proximidade da região em relação ao equador terrestre, com desvio padrão menor que 2,0 °C (Teixeira, 2010).

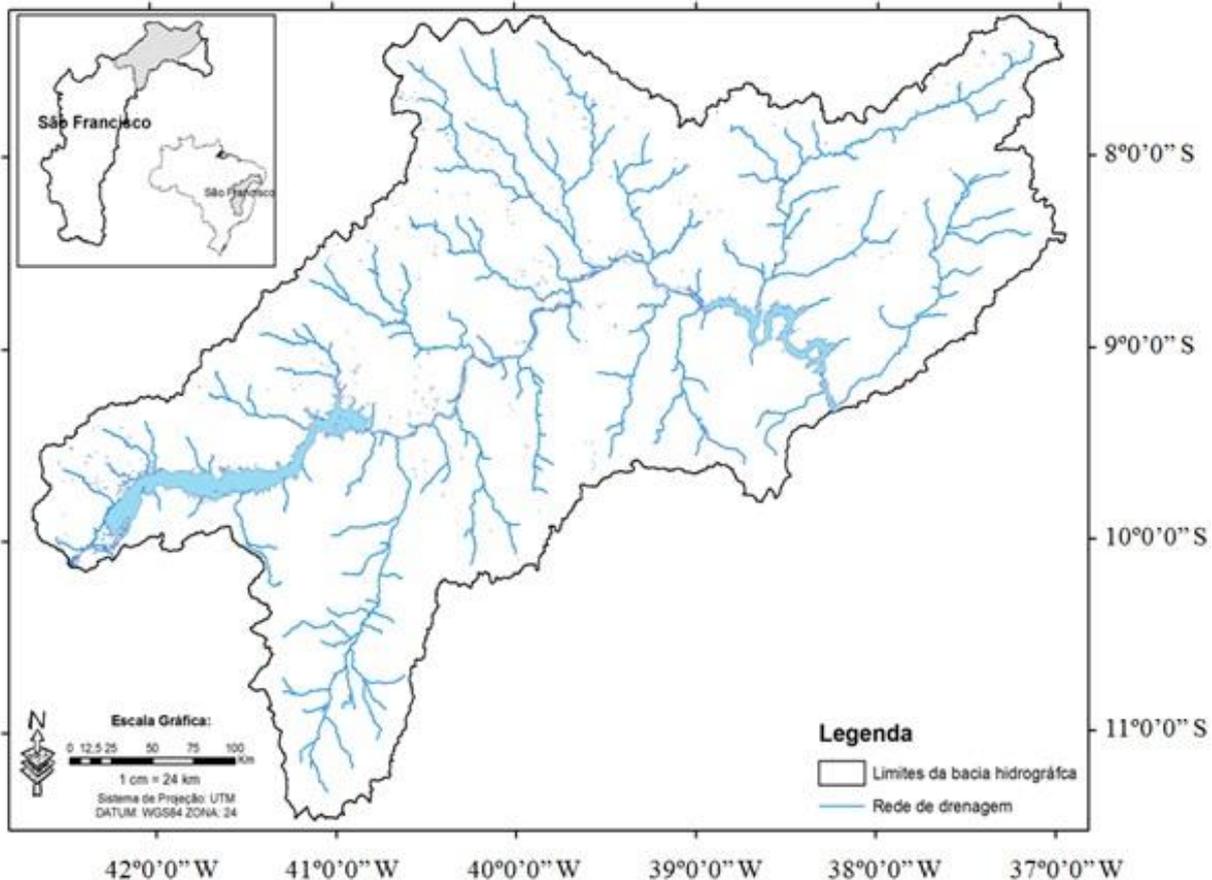


Figura 1. Localização da área de estudo

Funcionamento do modelo SWAT

As características básicas do modelo SWAT são apresentadas por Arnold et al. (1998), como sendo:

- O modelo requer informações específicas sobre o clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo modelo utilizando esses dados de entrada. Um aspecto positivo dessa característica do modelo é que foi desenvolvido para ser aplicado em bacias não monitoradas;

- É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
- É um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação.

A bacia foi dividida em sub-bacias. Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológicas; as quais correspondem a uma única combinação de uso da terra e do solo. Uma ou mais combinações de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia. Subdividir a bacia em

áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos e solos. O escoamento foi calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia. O modelo fornece duas opções de distribuição de HRU's:

- *Dominant HRU*: em cada sub-bacia; a combinação uso do solo e o tipo de solo que apresentarem maior extensão; será considerado para toda a área da sub-bacia; e os demais tipos serão descartados;

- *Multiple HRU's*: múltiplos HRU's serão estabelecidos. Serão criadas várias combinações de usos e tipos de solos para cada sub-bacia gerada; de acordo com o nível de sensibilidade escolhida pelo usuário do programa.

A elaboração das HRU's envolve dois passos: primeiro os usos do solo das sub-bacias

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que:

SW_t : conteúdo final de água no solo (mm);

SW_0 : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm);

t: tempo (dias);

P: precipitação pluvial (mm);

Q_{sup} : escoamento superficial (mm);

ET: evapotranspiração (mm);

W_a : percolação (mm), e

Q_{sub} : fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

Escoamento superficial

O escoamento superficial na rotina de simulação do SWAT se dá através do Método de Curva Número (CN), elaborado em 1954 pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service*, atualmente *Natural Resources Conservation Service*) dos Estados Unidos (Zhang et al., 2007). Tal método foi desenvolvido para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (Neitsch, 2005). Com diversas revisões, este método possui relevante popularidade entre os hidrólogos, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das predições (Zhang et al., 2007).

foram identificados. Uma vez que esses usos a serem modelados forem determinados; os diferentes tipos de solos foram selecionados. Dessa forma; cada HRU estabelecida apresentou uma combinação única entre um tipo de uso do solo com um tipo de solo; caso a escolha seja a "*Dominant HRU*". Para as simulações realizadas nesse trabalho foi escolhido o método das múltiplas HRU's para evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo e aos tipos de solos que foram encontrados.

Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT foi composto de quatro volumes de controle, são eles: reservatório superficial, reservatório subsuperficial, reservatório subterrâneo (aquífero raso) e reservatório subterrâneo (aquífero profundo). No modelo SWAT a determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Equação 1, definida pelo balanço hídrico:

O escoamento superficial por este método se dá conforme as Equações (2) e (3):

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)}, P > 0,2S \quad (2)$$

$$Q_{sup} = 0, P \leq 0,2S \quad (3)$$

em que:

Q_{sup} : escoamento superficial diário (mm);

P: precipitação pluvial diária (mm), e

S: parâmetro de retenção.

O parâmetro de retenção, S, varia: (a) na bacia, por causa do tipo de solo, uso da terra, manejo e declividade; e (b) com o tempo, por causa da

variação do conteúdo de água no solo. S é relacionado à CN pela Equação (4):

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

O fator CN foi determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (Neitsch,

2005). Por fim, a consideração da umidade antecedente do solo pode corrigir o valor de CN, quando há uma situação seca, ponto de murcha, ou uma situação em que está saturado, capacidade de campo (Neitsch, 2005). A condição de CN_2 expressa a condição normal do solo, CN_1 indica a condição do solo em ponto de murcha enquanto que CN_3 o solo na capacidade de campo. O cálculo de CN_1 e CN_3 se dá através uso do valor médio, CN_2 , conforme as Equações (5) e (6).

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2) + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0,0673(100 - CN_2)] \quad (6)$$

Os dados de vazão para a BHSRSF foram adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 2 apresenta as estações fluviométricas inseridas na bacia hidrográfica. Todavia foram utilizadas séries históricas apenas das estações

fluviométricas de Abreus e Juazeiro tendo em vista a disponibilidade e consistência dos dados observados.

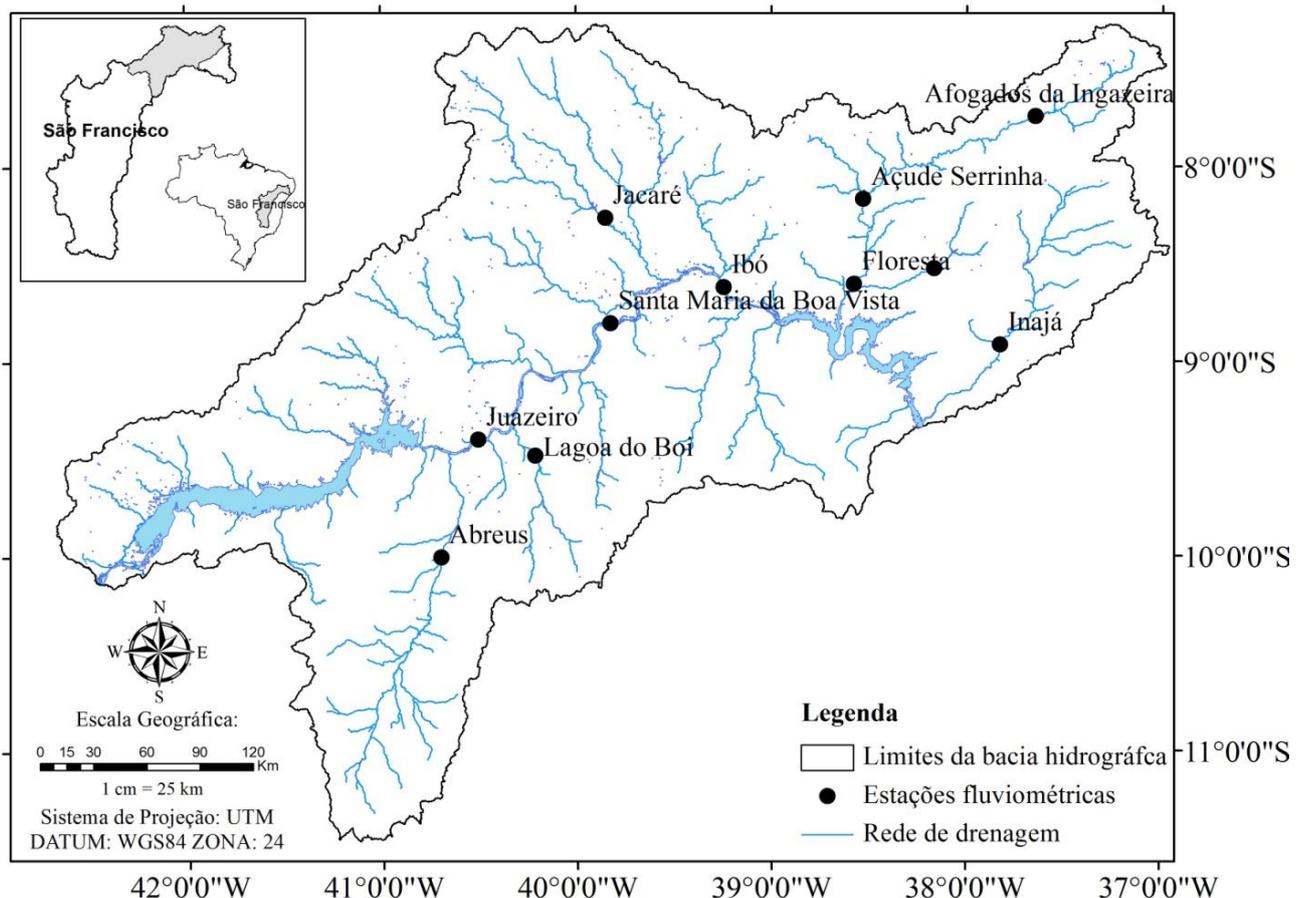


Figura 2. Localização das estações fluviométricas

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é um instrumento para previsão dos parâmetros (Tabela

1) que possuem maior impacto sobre as simulações hidrológicas e sedimentológicas elaboradas diretamente pelo modelo ArcSWAT (Neitsch et al., 2005) proporcionando um conhecimento da influência do parâmetro sobre o modelo o que possibilita a racionalização de etapas de calibração, bem como a fixação de parâmetros aos quais o modelo é pouco sensível.

Arnold e Fohrer (2005) avaliaram na análise de sensibilidade os parâmetros da curva número, capacidade de água disponível do solo, e coeficiente de evaporação do solo, e estes também foram encontrados por serem muito sensíveis em estudo utilizando o modelo SWAT (Cibin et al., 2010; Kim et al., 2010; Zhang et al., 2007; e Muleta e Nicklow, 2005).

Tabela 1. Parâmetros passíveis de calibração do modelo SWAT

Parâmetros	Descrição
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica do solo (adm.)
BLAI	Índice de área foliar Máximo ($m^2.m^{-2}$)
CANMX	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação (mm)
CH_COV	Fator de cobertura do canal
CH_EROD	Fator de erodibilidade do canal
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal ($mm.h^{-1}$)
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal (adm.)
CN2	Curva número inicial para condição de umidade AMC II (adm.)
EPCO	Coefficiente de compensação de absorção de água pelas plantas (adm.)
ESCO	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo (mm)
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água a zona saturada (adm.)
GWQMN	Nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (adm.)
REVAPMN	Prof. limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água na zona não saturada (mm)
SLOPE	Declividade média da sub-bacia ($m.m^{-1}$)
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da sub-bacia (m)
SOL_ALB	Albedo do solo (adm.)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo ($mm.mm^{-1}$)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado ($mm.h^{-1}$)
SOL_Z	Profundidade da camada do solo (mm)
SPCON	Parâmetro linear para calcular a quantidade máxima de sedimentos que pode ser depositado durante o transporte de sedimentos pelo canal
SPEXP	Parâmetro exponencial para calcular a quantidade máxima de sedimentos depositada durante o transporte de sedimentos pelo canal
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto (dias)
USLE_C	Fator de cobertura da USLE
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo da USLE

Análises estatísticas

A precisão da simulação da vazão mensal foi importante porque eventos de chuvas intensas contribuem para a geração de cargas extremas de sedimentos sobre determinados pontos da bacia hidrográfica. A série temporal de dados de vazão das estações fluviométricas de Abreus e Juazeiro foram escolhidas de acordo com as menores

omissões observadas. Na avaliação de desempenho do modelo foram utilizados a raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RQMDN), o erro médio absoluto (EMA) e o erro médio percentual (EMP). Maiores detalhes sobre esses índices podem ser obtidos em Silva (2014).

Resultados e discussão

O processo de ranqueamento dos parâmetros pela análise de sensibilidade aperfeiçoa a identificação dos elementos mais sensíveis que têm uma significativa influência sobre os dados de saída das simulações de vazão e produção de sedimentos fazendo com que a calibração torne-se mais eficaz. A análise de

sensibilidade foi realizada com base nos resultados gerados pelas primeiras simulações, como resultados identificou-se 15 parâmetros sensíveis associados aos processos hidrológicos e são em sua maioria relacionados ao escoamento superficial e de base (Tabela 2) tendência essa também observada por Baltokoski et al. (2010) e Lelis et al. (2012).

Tabela 2. Parâmetros sensíveis selecionados após a análise de sensibilidade

Parâmetros	Mín.	Máx.	Processo
ALPHA_BF	0	1	Escoamento de base
CH_COV	0,05	0,2	Produção de sedimentos
CH_EROD	0	1	Produção de sedimentos
CN2	-25	25	Escoamento superficial e sedimentos
ESCO	0,001	1	Evapotranspiração
GW_DELAY	1	500	Escoamento de base
GW_REVAP	0,02	0,2	Escoamento de base
GWQMN	0	5000	Escoamento de base
SLOPE	-0,5	1	Escoamento superficial
SLSUBBSN	-0,5	1	Escoamento superficial
SOL_AWC	-0,5	2	Escoamento de base e evapotranspiração
SOL_K	-0,5	1	Escoamento de base
SURLAG	1	16	Escoamento superficial
USLE_C	0	0,5	Produção de sedimentos
USLE_K	0	0,5	Produção de sedimentos

A representação espacial de dados hidrometeorológicos tem grande impacto sobre a precisão da simulação do modelo em grandes áreas, principalmente para componentes do balanço hidrológico que possuem grande variabilidade espaço-temporal. Tal questão torna-se ainda mais relevante quando as análises são realizadas em regiões semiáridas. Portanto, para representar a variabilidade espacial do clima,

buscou-se validar os dados simulados de vazão para duas estações fluviométricas inseridas na BHSRSF, pois se considerou que o output de uma única estação poderia limitar o desempenho do modelo neste estudo. As comparações entre as descargas observadas (Qobs) e simuladas (Qsim), para as estações de Abreus e Juazeiro são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Análise estatística das vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus e Juazeiro

Estações	Qobs			Qsim			EMA (m ³ s ⁻¹)	EMP (%)	RQMDN (%)
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.			
Abreus	0,7	2,7	0,08	0,7	2,0	0,06	-0,02	30,9	45,1
Juazeiro	1775,0	2831,0	999,3	1791,4	2724,7	1039,4	16,4	0,8	8,5

O desempenho com relação à vazão simulada foi ainda examinado usando critérios estatísticos, aplicado para o período de validação. O período de validação para as estações possuem séries históricas distintas, Abreus (1993-2000) e Juazeiro (1995-2004), sendo verificado o melhor desempenho para a estação fluviométrica de Juazeiro. Para essa estação ainda é possível

verificar a tendência de superestimativa dos valores simulados em torno dos 0,8%, todavia o maior número de observações representa melhor a variabilidade natural dos dados, ou seja, o maior período de análises para estação do Juazeiro facilita a verificação da consistência do modelo SWAT. Em especial para estação fluviométrica de Abreus o modelo apresentou dificuldade em

simular os picos de cheia, por fim foi encontrado RQMDN da ordem de 45 e 8,5%, para as estações de Abreus e Juazeiro, respectivamente.

As simulações das vazões para estação fluviométrica de Abreus apresentaram grande variabilidade ao longo do período de validação (1993 a 2000), assim como pode ser observado

pela Figura 3, verifica-se a alternância de ciclos de subestimativa e superestimativa caracterizando que as HRU's pertencentes a sub-bacia na qual está inserida a estação possuem configurações distintas das parametrizações utilizadas para calibração.

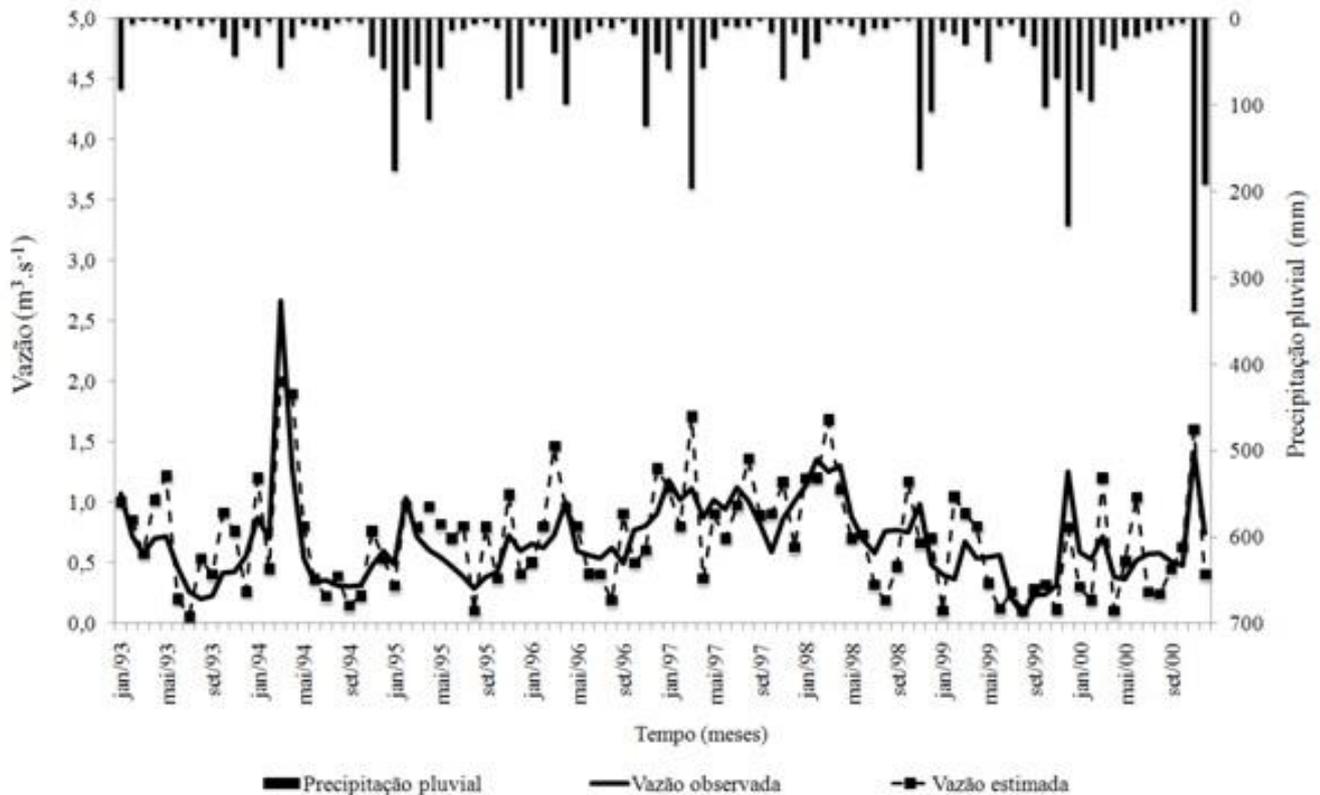


Figura 3. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus (1993 a 2000)

O modelo ainda conseguiu descrever os perfis de pico de vazão, seguindo os períodos de cheia e foi assim encontrado para o coeficiente de determinação (R^2) o valor de 0,50 (Figura 4). Tal coeficiente ainda se mostrou significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste t-Student. Dentre as configurações que possam ajudar a descrever o comportamento anômalo das HRU's,

verifica-se a predominância do tipo de solo Cambissolo Háplico (53%) que garante a sub-bacia permeabilidade rápida; com relação à textura, o solo foi classificado como médio a franco arenoso, com $USLE_K = 0,1584$. O principal tipo de cobertura é de caatinga arbórea e arbustiva cerca de 50% da área total, a classe de declive mais representativa (78%) é a de várzea.

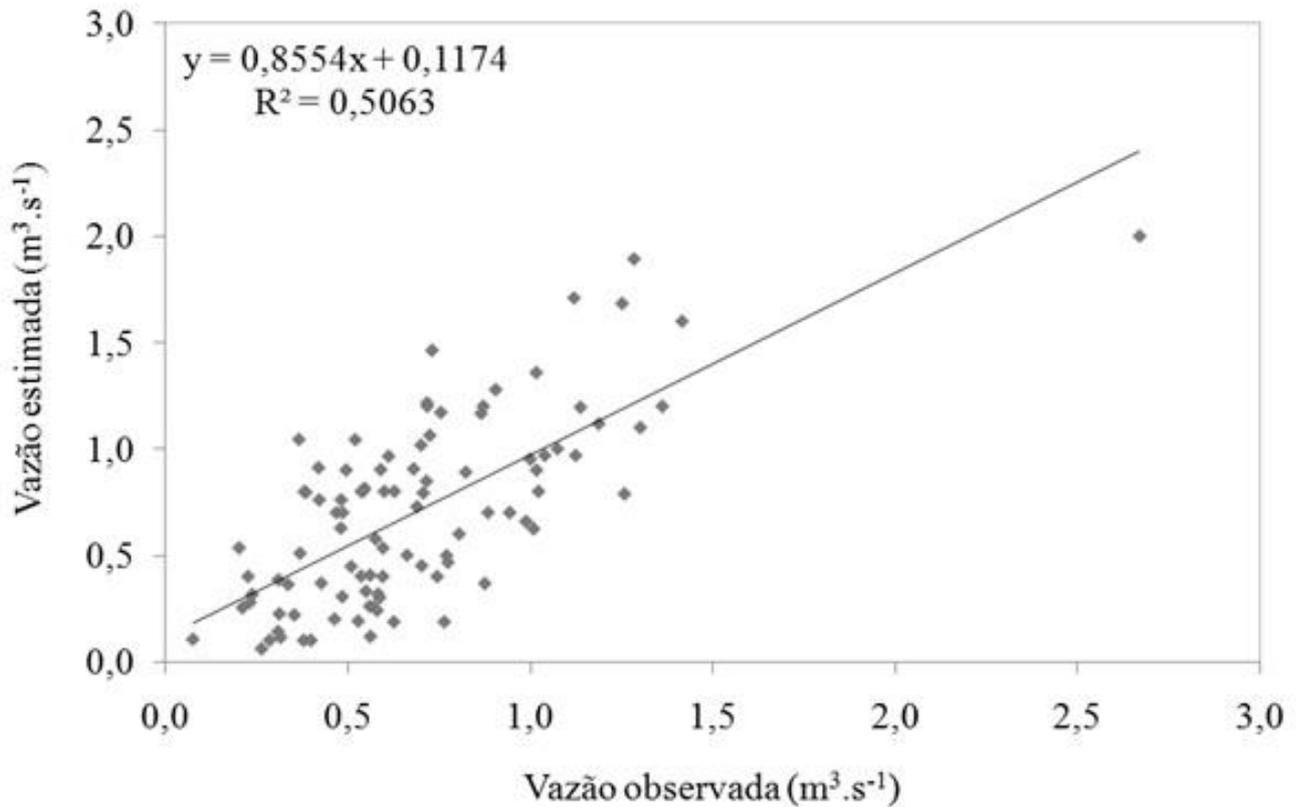


Figura 4. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus

Os dados mensais das vazões da estação fluviométrica do Juazeiro utilizados para validação compreendem o período de janeiro 1995 a dezembro de 2004 e são mostrados na Figura 5. O modelo descreveu razoavelmente bem o comportamento das vazões para sub-bacia em que a estação fluviométrica está inserida durante todo período analisado, entretanto a curva da vazão simulada (Qsim) apresenta uma tendência significativa de superestimativa principalmente nos períodos de maior fluxo oriundo das precipitações na região (janeiro-abril). A superestimativa dos valores simulados pode estar associada aos valores de alguns parâmetros relacionados ao escoamento superficial, que foi a principal componente de recarga das vazões dos rios analisados neste estudo. Dessa forma, pode-se inferir que um dos fatores mais importantes selecionado pela análise de sensibilidade foi o

Cn2 que reflete as composições do tipo de solo e cobertura e que teve influência na simulação das vazões. Sendo assim, com exceção de alguns episódios de picos de cheia os valores simulados pelo modelo conseguiram reproduzir, com fidelidade, o comportamento do hidrograma, as estimativas da vazão mostraram-se eficazes no primeiro momento, apresentando-se como alternativa para preenchimento de falhas ou análise de séries de dados hidrológicos. A escolha da estação do Juazeiro para calibração e validação dos dados do modelo SWAT deve-se ao fato que a mesma é a primeira estação após o represamento do reservatório de Sobradinho, que regulariza a vazão em torno de $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tornando mais eficaz o processo de parametrização das HRU's inseridas na sub-bacia e por consequência otimizam os resultados no que se referem aos processos hidrossedimentológicos.

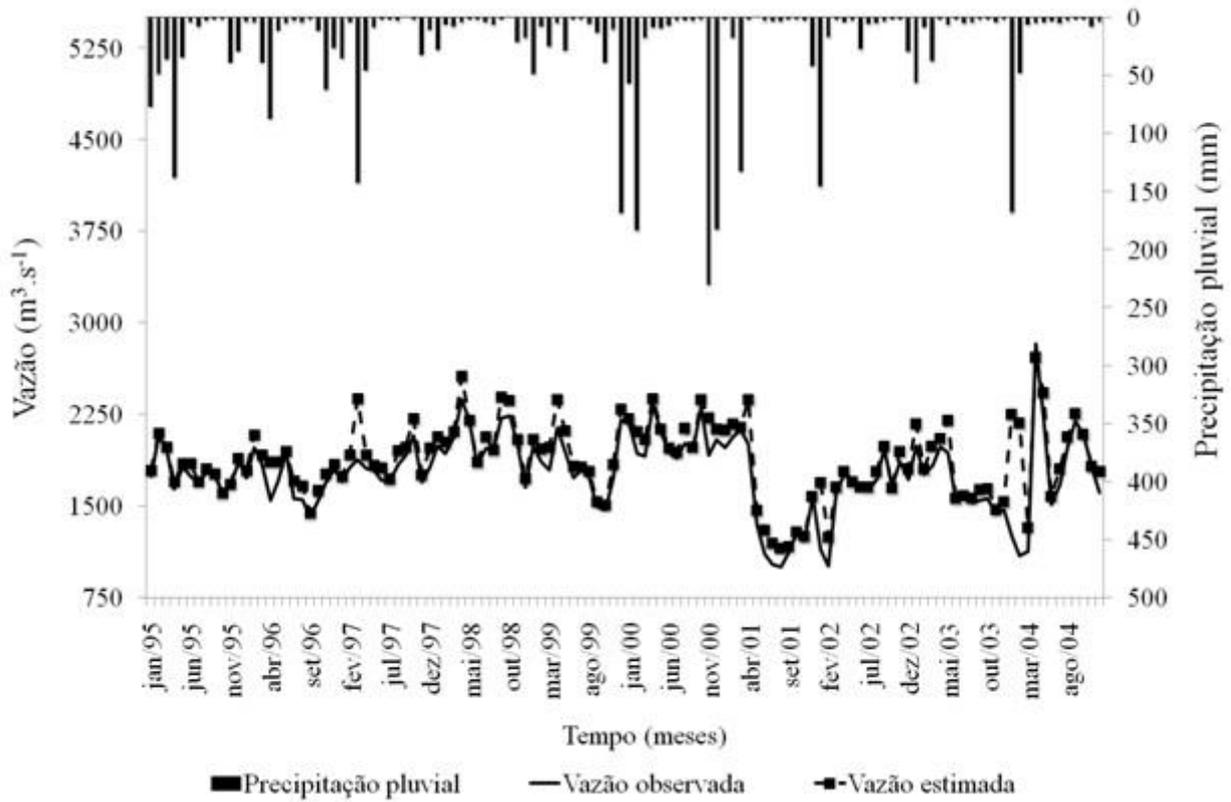


Figura 5. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro (1995 a 2004)

O desempenho no ajuste dos dados de vazão observados e simulados para estação fluviométrica do Juazeiro $R^2 = 0,76$ (Figuras 6) poderiam ser justificados devido a carga regulada do reservatório de Sobradinho a montante do ponto de observação. De acordo com Liew et al.

(2007) este resultado indica boa adequação do modelo SWAT nesta bacia. As estimativas apresentaram assim que o valor de R^2 foi significativo aos níveis de probabilidades de 1 e 5% pelo teste t-Student

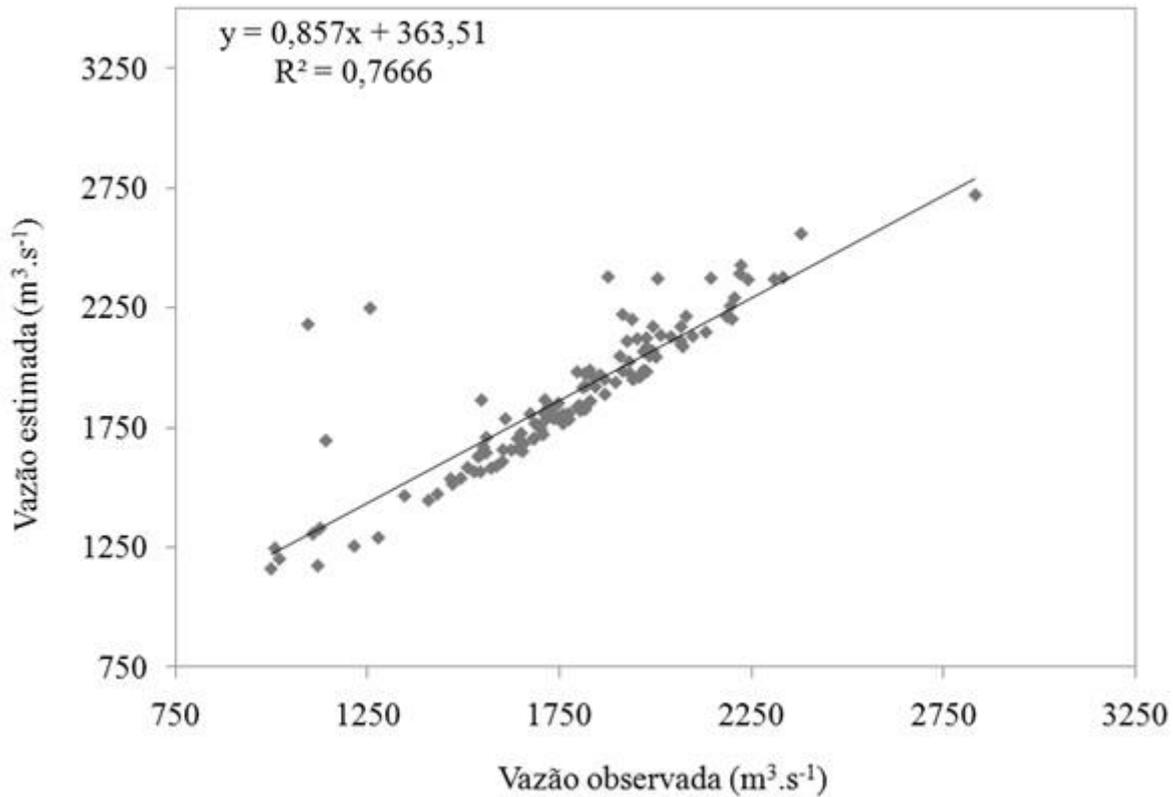


Figura 6. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro

Conclusões

1. O modelo SWAT foi sensível ao parâmetro Curva Número (Cn2) e aos parâmetros relacionados ao escoamento superficial e de base, denotando a influência do uso e da cobertura do solo.
2. O modelo conseguiu simular satisfatoriamente os hidrogramas observados nas estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

3. Os valores obtidos para raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RQMDN), o erro médio absoluto (EMA) e o erro médio percentual (EMP) foram considerados satisfatórios a partir da literatura consultada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pela concessão da Bolsa de Pós-Doutoramento ao primeiro autor.

Referências

- Albuquerque, A.W., Lombardi Neto, F., Srinivasan, V.S., 2001. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 25. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000100013>. Acesso: 12 maio 2014.
- Andrade, M.A., Mello, C.R.de, 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. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>. Acesso: 23 abr. 2015.
- Aragão, R., Cruz, M.A.S., Amorim, J.R.A., Mendonça, L.C., Figueiredo, E. E., Srinivasan, V., 2013. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 37. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400026>. Acesso: 10 ago. 2014.
- Arnold, J.G., Fohrer, N., 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes* [online] 19. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>. Acesso: 10 ago. 2014.

- <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5611>. Acesso: 13 abr. 2015.
- Baldissera, G.C., 2005. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Dissertação (Mestrado). Cuiabá, UFMT.
- Baltokoski, V., Tavares, M.H.F., Machado, R.E., Oliveira, M.P., 2010. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 34. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100026>. Acesso: 23 maio 2015.
- Cibin, R., Sudheer, K.P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Process* [online] 24. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7568>. Acesso: 23 ago. 2015.
- CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 1999. Inventário de projetos. Brasília.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Oster, J.D., Kaffka, S.R., 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* [online] 131. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.014>. Acesso: 14 mar. 2014.
- Defries, R., Eshleman, K.N., 2004. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future. *Hydrological Processes* [online] 18. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5584>. Acesso: 23 set. 2015.
- Galharte, C.A., Villela, J.M., Crestana, S., 2014. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [online] 18. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000200010>. Acesso: 11 jun. 2015.
- Kim, N.W., Lee, J., 2010. Enhancement of channel routing module in SWAT. *Hydrological Processes* [online] 24. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7474>. Acesso: 17 jan. 2015.
- Lelis, T.A., Calijuri, M.L., Fonseca, A., 2012. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 36. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200031>. Acesso: 19 fev. 2014.
- Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D., Arnold, J.G., 2007. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrological Research* [online] 12. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1061/ASCE1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/ASCE1084-0699(2007)12:2(173)). Acesso: 23 jul. 2014.
- Machado, R.E., Vettorazzi, C.A., 2003. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 4. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400018>. Acesso: 11 ago. 2015.
- Mendonça, J.K.S., Guerra, A.J.T., 2004. Erosão dos solos e a questão ambiental, in: Guerra, A.J.T., Vitte, C.A. (Orgs.), *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 225-251.
- Moussa, R., Voltz, M., Andrieux, P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes* [online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.333>. Acesso: 12 mar. 2015.
- Muleta, M.K., Nicklow, J.W., 2005. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology* [online] 306. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.005>. Acesso: 12 abr. 2015.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation, Version 2005. Texas.
- 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. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p70-76>. Acesso: 12 maio 2015.
- Silva, M.T., 2014. Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.
- Teixeira, A.H.C., 2010. Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009. Petrolina.
- Tsou, M.S., Whitemorez, D.O., 2001. User interface for ground-water modeling: ArcView Extension. *Journal of Hydrologic Engineering* [online] 6. Disponível:

- [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:3\(251\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:3(251)). Acesso: 23 jul. 2015.
- Tucci, C.E.M., Clarke, R.T., 1998. Environmental Issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development* [online] 14. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/07900629849376>. Acesso: 22 set. 2015.
- Uzeika, T., 2009. Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.
- Zhang, H.G., FU, S.H., Fang, W.H., Imura, H., Zhang, X.C., 2007. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. *Transactions of the ASABE* [online] 50. Disponível: <http://handle.nal.usda.gov/10113/10743>. Acesso: 10 jan. 2015.