

# MODELAGEM DO ESCOAMENTO NA SUB-BACIA DO RIO JAPARATUBA-MIRIM (SE) ATRAVÉS DO MODELO SWAT

Ricardo de Aragão<sup>1</sup>, Marcus Aurélio Soares Cruz<sup>2</sup>, Julio Roberto Araujo de Amorim<sup>2</sup>

Luciana Coêlho Mendonça<sup>1</sup>, Eduardo Eneas de Figueiredo<sup>3</sup>, Vajapeyam S. Srinivasan<sup>4</sup>

**RESUMO** --- A modelagem do escoamento utilizando modelos matemáticos distribuídos tem se apresentado como ferramenta para a previsão dos impactos no escoamento e erosão do solo em bacias hidrográficas, seja pelas alterações causadas no uso do solo ou por variação nos eventos climáticos. Neste trabalho o modelo SWAT2005, acoplado a um SIG (sistema ArcSWAT), foi aplicado à sub-bacia do Rio Japaratuba-Mirim, nas seções Fazenda Pão de Açúcar – PA (137,3 km<sup>2</sup>) e Fazenda Cajueiro – CJ (277,8 km<sup>2</sup>), em Sergipe, visando a simulação do escoamento na bacia menor (PA) com os parâmetros calibrados com base em dados da bacia maior (CJ), *downscaling*, a simulação do escoamento na bacia maior (CJ) com os parâmetros calibrados na bacia maior, *upscaling*, como também a análise do escoamento na bacia menor quando a bacia maior foi parametrizada. Os resultados mostram que o modelo quando calibrado foi capaz de reproduzir bem os resultados observados. Ademais, a análise do escoamento na seção considerando *downscaling*, *upscaling* e também os dados de escoamento na bacia menor quando a bacia maior foi parametrizada levou a valores do índice de Nash and Sutcliffe (NS) e do PBIAS abaixo dos que seria considerado insatisfatório.

**ABSTRACT** --- The runoff modeling with distributed models has been used to predict the impacts on runoff and soil erosion in hydrographic basins, either caused by the changes in land use or climatic variations. In this work the model SWAT2005, coupled with a GIS (ArcSWAT), was applied to two sub-basins of the Japaratuba-Mirim river basin, one located upstream of Fazenda Pão de Açúcar section – PA (137,3 km<sup>2</sup>), and another one located upstream of Fazenda Cajueiro section - CJ (277,8 km<sup>2</sup>) in the state of Sergipe, with the objective of determining overland flow at PA using the calibrated parameters for CJ, the overland flow at CJ using calibrated parameters for PA, and analyzing simulated overland flow data at PA with the parameter calibrated for CJ. The results show that, when calibrated, the model generated reasonably well the observed runoff in the sub-basins. Moreover the analysis of *downscaling*, *upscaling* and the analyzing simulated overland flow data at PA with the parameter calibrated for CJ led to values of Nash and Sutcliffe (NS) and PBIAS lower than the limit considered unsatisfactory.

**Palavras-chave:** modelo SWAT, previsão de vazão, *downscaling*, *upscaling*, Sergipe.

<sup>1</sup> Prof. da Univ. Federal de Sergipe - SE, Av. Marechal Rondon, s/n Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, 49100-000; e-mail: [ricardoaragao@yahoo.com](mailto:ricardoaragao@yahoo.com)

<sup>2</sup> Pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros - Sergipe. Av. Beira Mar, 3250, Jardins, Aracaju-Sergipe, CEP:49025-040, . Fone (79) 4009-1310. e-mail: [masacruz@cpac.embrapa.br](mailto:masacruz@cpac.embrapa.br), [julio.amorim@embrapa.br](mailto:julio.amorim@embrapa.br)

<sup>3</sup> Prof. da Univ. Federal de C. Grande-PB; C.Postal 505 CEP: 58.100-970, C. Grande – PB. Fone (83) 3310-1156. e-mail: [eneasef@yahoo.com](mailto:eneasef@yahoo.com)

<sup>4</sup> Professor Visitante Nacional Sênior, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. e-mail: [vajapeyam@yahoo.com](mailto:vajapeyam@yahoo.com)

# 1 - INTRODUÇÃO

As atividades humanas realizadas nas bacias hidrográficas (mineração, agricultura, pecuária) têm gerado diversas modificações no regime dos recursos hídricos e no solo destas unidades de planejamento que, se não controladas a contento, poderão causar danos irreparáveis ao meio ambiente. Dentre as principais conseqüências destas atividades estão o desmatamento, a ocupação desordenada e a conseqüente impermeabilização sistêmica que, por sua vez, levam ao aumento de vazão e da produção de sedimentos (Pimentel et al., 1995; Tucci e Clark., 1997; Araújo e Knight, 2005).

Para algumas atividades e em algumas regiões o aumento de vazão ou de aporte de água para os reservatórios é algo benéfico, porém também poderá causar diversos danos via transporte de sedimentos, de nutrientes e de defensivos agrícolas, pondo em risco a qualidade da água armazenada.

Em face destas pressões, surge a necessidade de se avaliar o potencial destas fontes e gerenciar as suas disponibilidades de forma que elas possam ser utilizadas de maneira igualitária e racional (Grassi, 2001), uma vez que o gerenciamento dos recursos naturais necessita de informações sobre carga de sedimento nos corpos de água e aporte hídrico para os rios e reservatórios. Neste sentido, a modelagem hidrossedimentológica surge como uma ferramenta de apoio valiosa para tomada de decisão, visto que, quando bem parametrizados, os modelos poderão fornecer, dentre outras informações, o volume de água e sedimentos para rios e reservatórios em uma dada seção devido a uma chuva ou a diversas chuvas naturais. Outra aplicação da modelagem hidrológica é a previsão de vazão em lugares onde se faz necessária esta informação, mas que não existe a seção de medição ou de dados disponíveis.

Existem na literatura diversos tipos de modelos para diversas situações (Singh, 1995; Beven, 2001; Singh e Woolhiser, 2002; Merrit et al., 2003) uma vez que, até o presente, não foi identificado um modelo genérico para todas as situações. Além disso, à medida que a bacia em questão cresce em tamanho e complexidade de usos, fica cada vez mais difícil a utilização de um modelo concentrado, dando-se preferência àqueles que consideram a espacialização dos processos hidrossedimentológicos na bacia. Entretanto, para estes, faz-se necessária a determinação dos valores dos parâmetros relacionados às sub-bacias componentes da bacia maior, requerendo dados observados.

A disponibilidade destes dados tem sido um dos principais obstáculos no efetivo uso destes modelos. Por outro lado, dada às dificuldades inerentes ao processo de coleta de dados sedimentométricos, geralmente só se registra dados de vazão em seções de medição, principalmente em grandes bacias (Singh, 1995; Singh e Woolhiser, 2002).

Com este fim, o acoplamento de sistemas de informações geográfica a modelos hidrossedimentológicos (Melo, 2010), como é o caso do modelo SWAT (Neitsch, 2005) acoplado a um SIG (ArcSWAT – Winchell et al., 2009), tem produzido bons resultados no Brasil e em diversas partes do mundo (Merrit et al., 2003; Jayakrishnan et al., 2005; Bonumá et al., 2011; Salles e Chaves, 2011; Garbossa et al., 2011; Carvalho Neto et al., 2011; Lelis et al., 2012; Strauch et al., 2012).

A sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim, tributário do Rio Japarutuba, no Estado de Sergipe, que tem área de ~335,4 km<sup>2</sup>, possui duas seções de medição de vazão (Fazenda Pão de Açúcar e Fazenda Cajueiro) e existem diversas informações sobre esta bacia que permitiram neste trabalho a avaliação do modelo SWAT para o processo de previsão de vazão e de transferência de parâmetros (*downscaling* e *upscaling*).

## 2 – A ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Japarutuba (10°13'00'' e 10°47'00'' de latitude Sul e 36°48'00'' e 37°19'00'' de longitude Oeste) é uma das seis grandes bacias que compõe o Estado de Sergipe. Com uma área de 1687,67 km<sup>2</sup>, a bacia abrange 18 municípios e tem sido fortemente impactada ao longo de muitos anos passados até os dias presentes, tanto por atividades de extrativismo como por atividades agropecuárias. O rio principal tem uma extensão de aproximadamente 94 km (Figura 1). Nesta bacia o período chuvoso ocorre entre os meses de abril e agosto sendo os meses de maio e junho os mais chuvosos (SEPLANTEC, 2004).

A bacia do rio Japarutuba possui três regiões climáticas, com diferentes regimes de precipitação: litoral úmido (1000 mm < Pmédia < 1400 mm), agreste (700 mm < Pmédia < 900 mm) e semi-árido (400 mm < Pmédia < 700 mm; período chuvoso entre janeiro e maio). A temperatura média anual é de 25 °C e a umidade relativa do ar é ~74 %. Da área total da bacia, 9,63 % pertencem à região semiárida, 30,18 % a porção litoral úmido e 60,17 % estão localizadas no agreste (Figura 1).

A bacia é composta das sub-bacias dos rios Japarutuba (54% da área total), Siriri (23,37% da área total) e Japarutuba-Mirim (aproximadamente 20% da área total). A sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim está toda inserida na porção agreste da bacia do rio Japarutuba, tem largura média de 8,83 km, comprimento de cerca de 60 km e área de drenagem de ~335,4 km<sup>2</sup>.

O monitoramento hidrológico na sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim é feito através de duas estações fluviométricas (Fazenda Pão de Açúcar (PA) – código ANA – 50042000 - áreas de 137,3 km<sup>2</sup>; Fazenda Cajueiro (CJ) – código ANA – 50043000 – área de 277,8 km<sup>2</sup>), monitoradas pela Agencia Nacional de Águas (ANA, 2002), enquanto o climatológico é feito com uma estação pluviométrica automática e uma estação climatológica convencional (Figura 1). A vazão média na

área da sub-bacia atinge 0,66 m<sup>3</sup>/s para o posto Fazenda Pão de Açúcar, 1,70 m<sup>3</sup>/s para o posto Fazenda Cajueiro (Figura 1).

Para o período sob análise no presente trabalho (1985 a 1990) o uso do solo predominante na sub-bacia foi de pastagem, cultivo de cana-de-açúcar e de floresta secundária (SEPLANTEC, 2004), Figura 2.

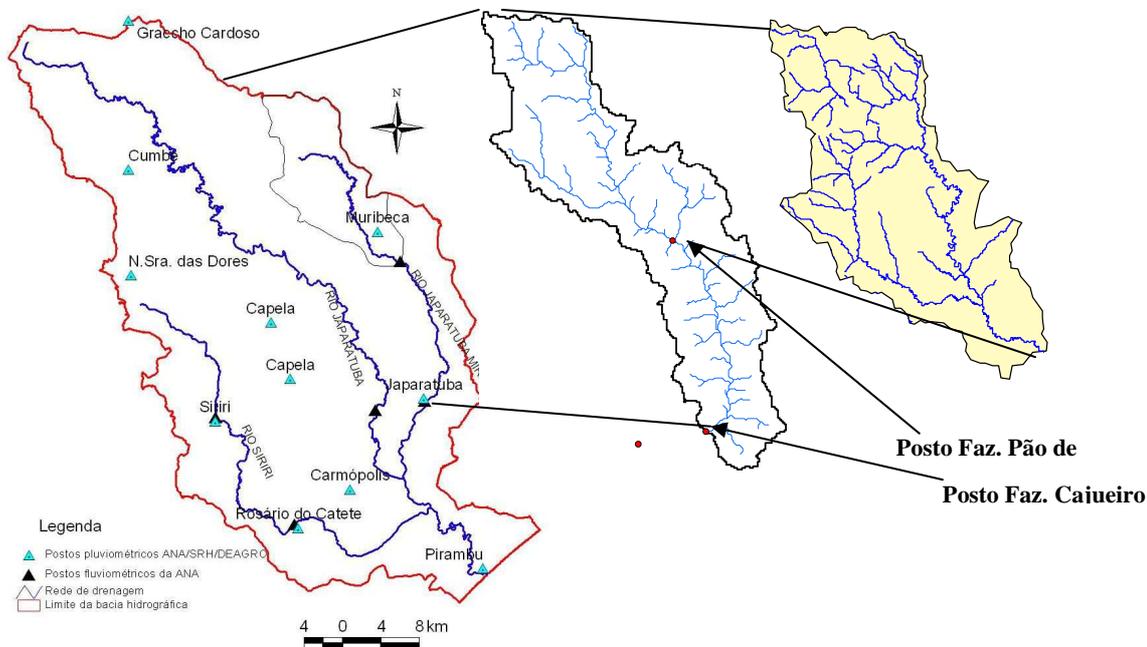


Figura 1 – Bacia do Rio Japarutuba e a sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim



Figura 2 - Uso do solo na sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim

As manchas de solo predominantes na área da sub-bacia são do tipo podzólicos vermelho-amarelo e podzólicos vermelho-amarelo equivalente eutrófico seguidas de latossolo vermelho-amarelo e solos aluviais. Maiores informações sobre a bacia e os estudos hora em andamento poderão ser vistos em Aragão e Almeida (2009), Aragão et al. (2011), Souza et al. (2011).

### 3 – METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente estudo foram utilizados dados climáticos, topográficos e de vazão, bem como as características físicas da sub-bacia para a parametrização do modelo. Além destes, foram feitas diversas visitas à sub-bacia, para o melhor entendimento e visualização dos processos físicos ali desenvolvidos. Assim os dados necessários para a modelagem foram conseguidos.

#### 3.1 – O modelo SWAT

O modelo SWAT – Soil and Water Assessment Tool (Neitsch et al., 2005) é um modelo contínuo no tempo, de base física e distribuído que pode simular o escoamento superficial, a erosão nos planos e nos canais, o transporte de nutrientes e de pesticidas na escala de bacias no passo de tempo diário. Para o SWAT a bacia é dividida em subbacias e cada uma destas é dividida em unidades de resposta hidrológica (HRU – Hydrologic Respose Unit) que consiste em uma combinação única de uso do solo, tipo de solo e declividade dentro da bacia. Por ser distribuído, cada elemento, plano ou canal, poderá ter seu próprio conjunto de parâmetros que o caracteriza adequadamente.

Em termos de escoamento, o ciclo hidrológico é calculado com base na equação do balanço hídrico (Neitsch et al., 2005):

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

onde SW<sub>t</sub> é a quantidade final de água no solo (mm); SW<sub>0</sub> é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm); t é o tempo (dias); R<sub>d</sub> é a precipitação no dia i (mm); Q<sub>sup</sub> é o escoamento superficial no dia i (mm); E<sub>a</sub> é a evapotranspiração no dia i (mm); W<sub>seep</sub> é a percolação no dia i (mm); Q<sub>gw</sub> é o fluxo de retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência, o modelo disponibiliza três opções: Penman e Monteith (Allen et al., 1989), Hargreeves e Samani (1985) e Priestley e Taylor (1972).

O escoamento superficial pode ser calculado via o método modificado do Soil Conservation Service (SCS) ou pela equação de infiltração de Green e Ampt (Chow et al, 1988). O volume de escoamento superficial é calculado via método da curva número (CN) do SCS através da seguinte equação:

$$Q = \frac{(R_d - 0.2 * S)^2}{(R_d + 0.8 * S)} \text{ para } R_d > 0,2S \quad (2)$$

$$Q = 0 \text{ para } R_d \leq 0,2S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

onde  $Q_{sup}$  é o escoamento superficial diário (mm);  $R_d$  a precipitação no dia  $i$  (mm);  $S$  é o parâmetro de capacidade de armazenamento de água no solo (mm). O parâmetro  $S$  varia de acordo com os seguintes critérios: a) bacia, função do solo, do uso do solo, da declividade; b) umidade do solo. O valor de  $CN$  é função do tipo hidrológico do solo (A, B, C, D), nas características do solo, nas condições antecedentes de umidade do solo e declividade do terreno.

A vazão de pico máxima é calculada utilizando o método racional modificado. Na sua forma padrão o método racional é utilizado para encontrar a vazão de pico, comumente, em bacias pequenas, mas no modelo SWAT o cálculo é feito para as diversas Unidades de Resposta Hidrológica – HRU (Neitsch, 2005):

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} Q_{sup} A}{3,6 t_{conc}} \quad (4)$$

$$P_{tc} = \alpha_{tc} R_{dia} \quad (5)$$

$$C = Q_{sup} / R_{dia} \quad (6)$$

$$i = P_{tc} / t_{con} \quad (7)$$

onde  $q_{pico}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $\alpha_{tc}$  é a fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração;  $Q_{sup}$  é o escoamento superficial calculado pelo método SCS-CN (mm);  $A$  é a área da sub-bacia ( $km^2$ );  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);  $i$  é a intensidade da precipitação (mm/h);  $R_{dia}$  é a precipitação no dia  $i$  (mm);  $P_{tc}$  é a quantidade de chuva durante o tempo de concentração (mm);  $t_{con}$  é o tempo de concentração (h).

O volume gerado é escoado com base nos modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. O fluxo é propagado através da rede de drenagem utilizando-se o método do armazenamento variável ou o método de Muskingum. Os volumes seguem via rede de drenagem até o ponto mais a jusante da bacia hidrográfica e neste é contabilizado o valor total de produção de água.

A produção de sedimentos é estimada para cada HRU usando a equação universal de perda de solo modificada (*Modified Universal Soil Loss Equation* – MUSLE), proposta por Williams (1975). Nesta equação, o fator de erosividade da chuva da equação universal de perda de solo – USLE foi substituída por um fator de escoamento superficial, sendo escrita como segue:

$$SedY = 11,8 (Q_{sup} \times q_p \times Area_{HRU})^{0,56} K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (8)$$

onde  $SedY$  é a produção de sedimentos (ton/dia);  $Q_{sup}$  é o escoamento superficial ( $m^3/ha$ );  $q_p$  é a taxa de escoamento de pico ( $m^3/s$ );  $Area_{HRU}$  é a área de drenagem da sub-bacia ou unidade de resposta hidrológica (ha);  $K_{USLE}$  é o fator de erodibilidade do solo;  $C_{USLE}$  é o fator de uso e manejo do solo;  $P_{USLE}$  é o fator de práticas conservacionistas;  $LS_{USLE}$  é o fator topográfico;  $CFRG$  é o fator ligado a rugosidade da superfície inversamente proporcional a rugosidade do solo.

Para o SWAT o transporte de sedimentos na rede de drenagem ocorre em função de dois processos, degradação e deposição, que ocorrem simultaneamente no canal (Neitsch et al., 2005), que são calculados com a equação simplificada baseada na definição de stream power fornecida por Bagnold (Williams, 1975).

Como desvantagem deste sistema, tem-se o fato do mesmo requerer diversas informações como o modelo digital do terreno (MDT), os mapas de solo e uso do solo, características climáticas. Entretanto, com o avanço nas geotecnologias e a disponibilização dos dados coletados pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Moreira et al, 2005), a obtenção destas informações citadas ficou bastante simplificada, sendo necessária apenas a obtenção das informações complementares no campo.

### **3.3 - Dados utilizados**

Para a simulação o modelo SWAT requer diversos bancos de dados, incluindo MDT, dados de solo, uso do solo, dados hidrológicos e climatológicos. Os dados utilizados neste estudo seguiram a seguinte sequência:

Os dados sobre uso do solo, vegetação, localização dos postos pluviométricos, fluviométricos, foram disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH-SE), através do Atlas de Recursos Hídricos (SEPLANTEC, 2004), sendo o uso do solo levantado no ano 2000.

Os dados de precipitação e clima (evaporação, temperatura, velocidade do vento) cobrem o período de 1983 a 2005 e são provenientes da estação Fazenda Experimental Pirangi (latitude 10°29' Sul e longitude 37°04' Oeste (código ANA - 01037078)), localizada no município de Capela (ANA, 2002).

Os dados de vazão média cobrem o período 1973 a 2005 e são disponibilizados via portal HIDROWEB (ANA, 2002), tendo sido coletados no posto Fazenda Pão de Açúcar e no posto Fazenda Cajueiro, que se localizam no curso principal do Rio Japarutuba-Mirim, com área de contribuição de 137,3 km<sup>2</sup> e 277,8 km<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 1).

Os dados de altimetria, em espaçamento de 90 m x 90 m, são oriundos da missão topográfica radar Shuttle – SRTM (Miranda, 2005) e foram utilizados para a geração do modelo digital do terreno que foi empregado na discretização da sub-bacia para uso no modelo.

Além dos dados acima citados, também são necessárias, para a modelagem, informações relativas à textura do solo, granulometria, profundidade e quantidade de horizontes do solo. No presente estudo, estas informações partiram dos dados fornecidos por SEPLANTEC (2004) ou, quando estes não foram disponibilizados, empregaram-se valores disponíveis na literatura (Chow, 1988), tomando-se por base as características da região.

O mapa de solo (escala 1:100.000) empregado para a determinação dos valores dos parâmetros do modelo SWAT foi disponibilizado por SEPLANTEC (2004). As propriedades do solo foram determinadas a partir das informações de Embrapa (1975), Fontes (1997), Baldissera (2000), SEPLANTEC (2004), Gomes et al. (2007). A partir destas fontes, algumas propriedades hidrológicas do solo foram determinadas. Assim, foram assumidas no resultado do modelo as incertezas que esta diferença de escalas poderia gerar.

A partir do MDT e da rede de drenagem determinada, a sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim, posto Fazenda Pão de Açúcar foi dividida em 32 sub-bacias e para o posto Fazenda Cajueiro a bacia foi dividida em 113 sub-bacias (Figuras 3 e 4).

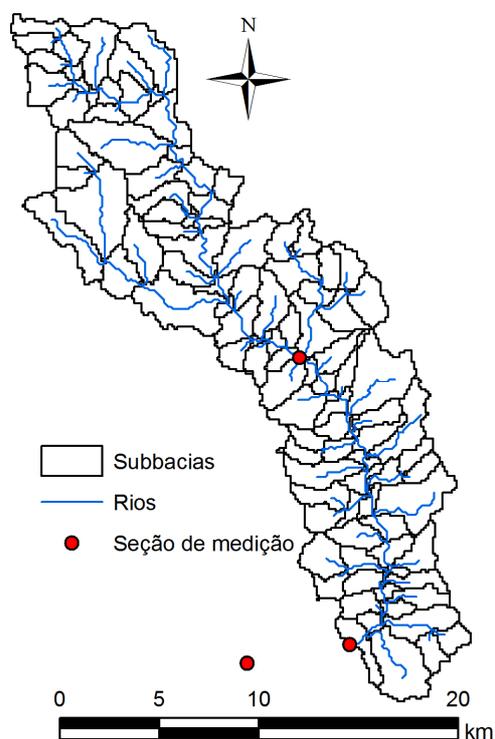


Figura 3 – Discretização em 112 sub-bacias seção Fazenda Cajueiro

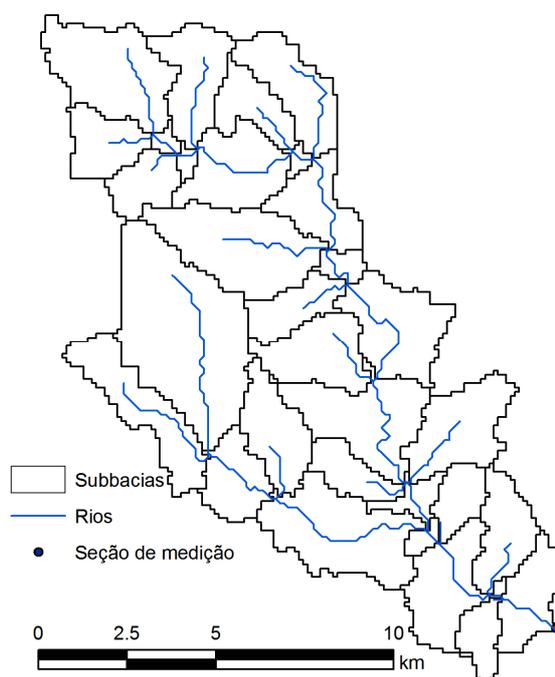


Figura 4 - Discretização em 32 sub-bacias seção Fazenda Pão de Açúcar

### 3.4 Parametrização

#### 3.4.1 Análise de sensibilidade

O modelo SWAT possui 32 parâmetros que precisam ser calibrados ou determinados a partir da literatura/dados medidos. Alguns destes têm uma maior influência e outros, uma menor influencia nos resultados do modelo. Assim, para identificar os parâmetros aos quais a resposta do modelo é mais sensível para a geração do escoamento superficial foi empregado um algoritmo existente no modelo que combina dois métodos de análise de sensibilidade: *Latin-Hypercube* (LH) e *One-factor at a time* (OAT) (Van Griensven et al., 2006). A análise de sensibilidade é efetuada

mudando-se o valor de cada um dos parâmetros a cada tempo e avaliando-se a resposta do modelo com relação aos dados medidos. A análise de sensibilidade foi analisada considerando-se os dados de vazão média mensal (m<sup>3</sup>/s) no período 1985 a 1988, período este também utilizado para a calibração dos parâmetros identificados na presente análise.

### 3.4.2 Calibração e validação

Os parâmetros resultantes da análise de sensibilidade foram calibrados utilizando-se os dados de vazão média mensal, no período 1985-1988, coletados nos dois postos de medição, PA e CJ, no período de 1985 a 1988. Por indicação do desenvolvedor do SWAT, deve-se utilizar um período para adequação inicial dos valores dos parâmetros do modelo (umidade inicial, etc) e neste trabalho, o ano de 1985 foi utilizado para aquecimento do modelo, sendo o período 1986 a 1988 utilizado para calibração. Para tanto, empregou-se a rotina de autocalibração existente no próprio modelo, considerando-se as faixas de valores de cada parâmetro descritas em Van Griensven et al. (2005) e em Neitsch et al. (2005). Em termos gerais esta rotina emprega o método denominado de Parasol (*Parameter Solutions method*) que tem por base algoritmos genéticos citado por Duan et al., (1992) e Sorooshian et al. (1993), também conhecido como *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) Method.

A partir dos valores fornecidos pela rotina cada parâmetro foi modificado de forma manual e o resultado da simulação, considerando-se o período acima citado, foi comparado com os valores observados com o objetivo de ver qual a real influência de cada parâmetro no resultado final.

Uma vez calibrado cada parâmetro para as duas subbacias em questão (PA e CJ) foi possível efetuar a validação, considerando-se para tanto valores de vazão média mensal no período de 1989 a 1990 e índices estatísticos, a saber, o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) e o índice PBIAS (Moriassi et al., 2007). Também foi considerada a análise gráfica dos hidrogramas observados e simulados.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) pode variar de  $-\infty$  a 1 e é empregado com a finalidade de avaliar a eficiência do modelo em simular uma determinada variável. Para NS igual a 1 existe um perfeito ajuste de dados simulados e medidos. Para valores abaixo de -1 entende-se que a média dos dados observados é um preditor melhor do que os resultados do modelo. Por outro lado, o índice PBIAS avalia a tendência geral que os dados simulados mostram em subestimar (PBIAS>0) ou superestimar (PBIAS<0) os dados medidos (Gupta et al., 1999). Sendo estes índices definidos como seguem:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

onde n é o número de dados medidos;  $O_i$  e  $S_i$  são os dados observados e simulados, respectivamente, no tempo i;  $\bar{O}$  é a média dos valores medidos. PBIAS é expresso em percentagem.

De acordo com Moriasi et al. (2007), em função do valor de NS obtido, a simulação de vazão é classificada como: muito boa para  $0,75 < NS \leq 1$ , boa para  $0,65 < NS \leq 0,75$ , satisfatória para  $0,50 < NS \leq 0,65$  e insatisfatória para  $NS \leq 0,50$ ; por sua vez, segundo o valor de PBIAS calculado, classifica-se a simulação de vazão em: muito boa para  $PBIAS < \pm 10$ , boa para  $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ , satisfatória para  $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$  e insatisfatória para  $PBIAS < \pm 25$ .

Uma vez que os parâmetros foram calibrados e os resultados foram validados foi possível analisar a resposta do modelo no que diz respeito à previsão de vazão em diferentes escalas. Como a sub-bacia em questão possui duas seções de medição no curso principal do rio (PA e CJ), foi efetuada a comparação entre os valores simulados nas duas seções e os valores observados nestas mesmas, considerando para tanto a parametrização da sub-bacia maior. Por outro lado, os parâmetros ótimos da sub-bacia maior (CJ) foram empregados na sub-bacia menor (PA) para ver como o modelo se comporta na situação onde somente encontram-se disponíveis dados observados em um ponto e deseja-se prever a vazão no interior da sub-bacia (*downscaling*).

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de sensibilidade efetuada considerando-se o período de 1985 a 1988 resultou na escolha dos parâmetros para as duas sub-bacias que estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Sensibilidade dos parâmetros em relação à simulação do escoamento

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor dos Parâmetros	
			PA	CJ
Alpha_Bf	Fator alfa do fluxo de base	dias	0,00	0,00
Canmx	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo	mm	98,17	93,28
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal	mm/h	164,34	345,30
Ch_N2	Coefficiente de Manning (n) do canal	-	0,04	0,03
Cn2	Valor da curva número inicial do método SCS	-	35,00	45,61
Esco	Fator de compensação da evaporação do solo	-	0,10	0,55
Gw_Delay	Retardo do escoamento subterrâneo	dias	414,24	126,39
Gw_Revap	Coefficiente de reevaporação da água subterrânea		0,07	0,34
Gwqmn	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno	mm	5000,00	231,13
Revapmn	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação	mm	359,07	246,17
Sol_Z	Profundidade do solo	mm	25,00	1,69
Surlag	Tempo de retardo do escoamento superficial	dias	12,79	10,02

Observa-se que, apesar do mesmo uso de solo existe uma variação considerável entre os valores de alguns parâmetros, como é o caso do Gw\_Delay, Gwqmn, Sol Z, sendo os dois primeiros relacionados à água subterrânea, que certamente é parte importante para a formação do fluxo nos canais visto ser os rios perenes nesta sub-bacia. Uma explicação para o Gwqmm poderia ser o fato que, por estar em uma região de transição entre semiárido e agreste a geologia da bacia contribuinte para a seção Fazenda Pão de Açúcar leva a uma menor contribuição da água subterrânea para a vazão do rio do que a geologia da contribuinte para a seção Fazenda Cajueiro.

Apesar de se ter utilizado um calibrador automático para a determinação dos valores dos parâmetros (Tabela 1), a inserção destes parâmetros no modelo foi feita um a um e verificou-se que introduzindo o valor de Ch\_K2 (Tabela 1) a tendência era de zerar os valores de vazão em diversos cursos de água. Assim, este parâmetro não foi calibrado, ficando com o valor default que é de zero. Desta forma, os valores calibrados dos outros parâmetros levaram ao resultado da calibração apresentado na Figura 5. Nesta observa-se que o modelo conseguiu reproduzir bem tanto a forma do hidrograma, quanto os picos, fato este comprovado através dos valores de NS e PBIAS, o que leva a considera uma calibração muito boa. Uma ressalva faz-se aos períodos de estiagem onde o modelo subestima os valores simulados. Isto pode ser causado pelo fato de o modelo não conseguir reproduzir bem o processo de água subterrânea neste período.

Em se tratando de validação o modelo subestimou os valores de vazão de pico simulados no período de 89 a 90, fato constatado na Figura 6, porém, acompanhou a forma do hidrograma e assim, via os índices NS e PBIAS, a simulação ainda pode ser considerada boa.

É fato conhecido que, de forma geral, as estações de medição de vazão só são instaladas em grandes bacias, de forma que caso o órgão gestor de recursos hídricos precise outorgar vazão em pontos internos da bacia, uma das práticas utilizadas é o emprego de vazão específica, o que pode ser muito diferente da realidade.

O emprego de modelagem hidrossedimentológica distribuída fornece como vantagem o fato de considerar as diversidades de uso e solo na bacia e isto foi mostrado através dos valores de vazão observada e calculada para a seção Fazenda Pão de Açúcar (Figura 7) e dos índices aqui utilizados. Apesar dos valores não serem muito próximos dos observados, o modelo conseguiu reproduzir com fidelidade o padrão do hidrograma, de modo que os resultados poderão ser considerados como uma primeira estimativa de vazão.

No que diz respeito à transferência de parâmetros de uma bacia maior para uma seção no seu interior (*downscaling*) este procedimento aqui empregado resultou nos hidrogramas apresentados nas Figuras 8 e 9, sendo a primeira relativa ao período de calibração e a segunda relativa ao período de calibração+validação. Assim como para o caso da Figura 7, o modelo superestimou os valores simulados levando a um NS muito baixo (Figuras 8 e 9), sendo a esta simulação considerada

insatisfatória. O que poderá ser atribuído ao valor de alguns valores de parâmetros influentes, como é o caso do CN. Sendo assim, se comparados os resultados mostrados na Figuras 8 e 9 com aqueles da Figura 7, nota-se o mesmo comportamento, e neste caso, o processo de downscaling não levou a bons resultados. Entretanto, na falta de informação este ainda poderá ser utilizado como estimativa inicial.

Visando esclarecer se o processo de *upscaling* poderia levar a resultados melhores, os parâmetros calibrados para o posto Fazenda Pão de Açúcar foram empregados na bacia de contribuição para o posto Fazenda Cajueiro e, novamente, procurou-se simular o período de 86 a 88 (período utilizado para calibração), Figura 10, como também o período de 86 a 90, Figura 11. Para ambos os casos o modelo superestimou as vazões máximas e alguns valores de vazão mínima. Os índices NS e PBIAS aqui utilizados refletem o que o hidrograma apresenta visto que foram fora da faixa discutida por Moriasi et al. (2007). Assim como para as situações anteriores, o padrão do hidrograma foi seguido, porém outros ajustes nos parâmetros são necessários para que a vazão simulada seja próximo do observado.

Em termos gerais, considerando os critérios usados neste estudo, a calibração e a validação para vazão simulada foram ambas satisfatórias, com valores de NS e PBIAS considerados bons.

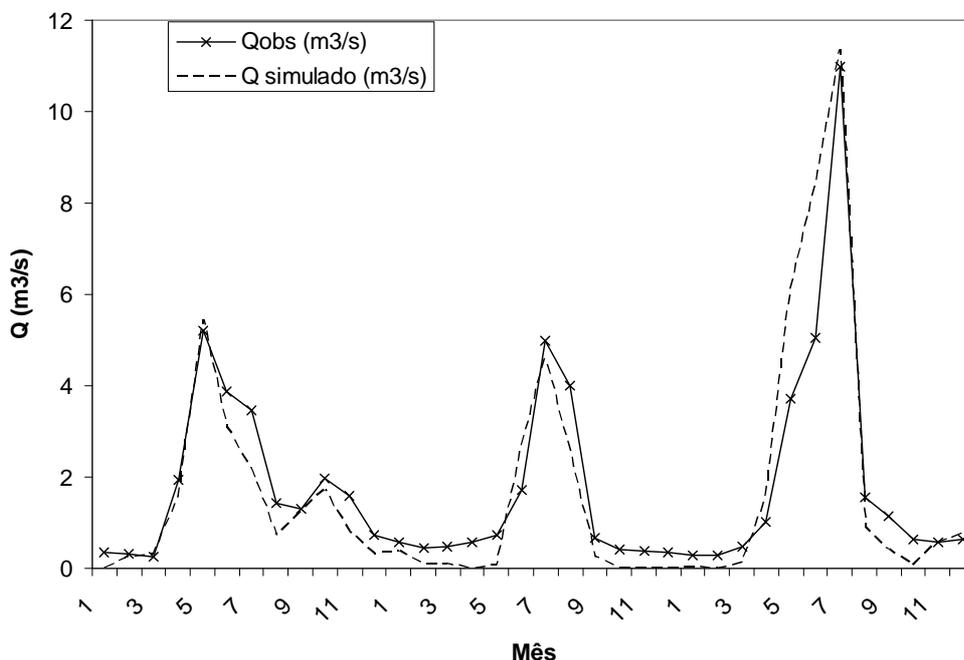


Figura 5 – Hidrograma observado e simulado resultante da calibração com dados do posto Fazenda Cajueiro no período de 1985 a 1988 – NS =0,83; PBIAS= 8,50%

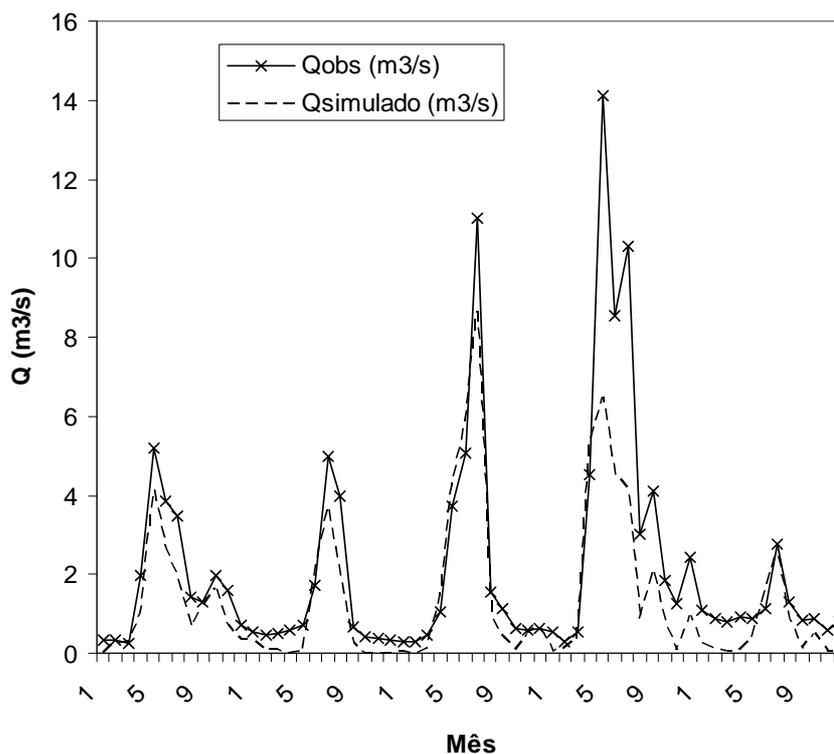


Figura 6 - – Hidrograma observado e simulado resultante da validação com dados do posto Fazenda Cajueiro no período de 1989 a 1990 – NS =0,66; PBIAS= 38,74%

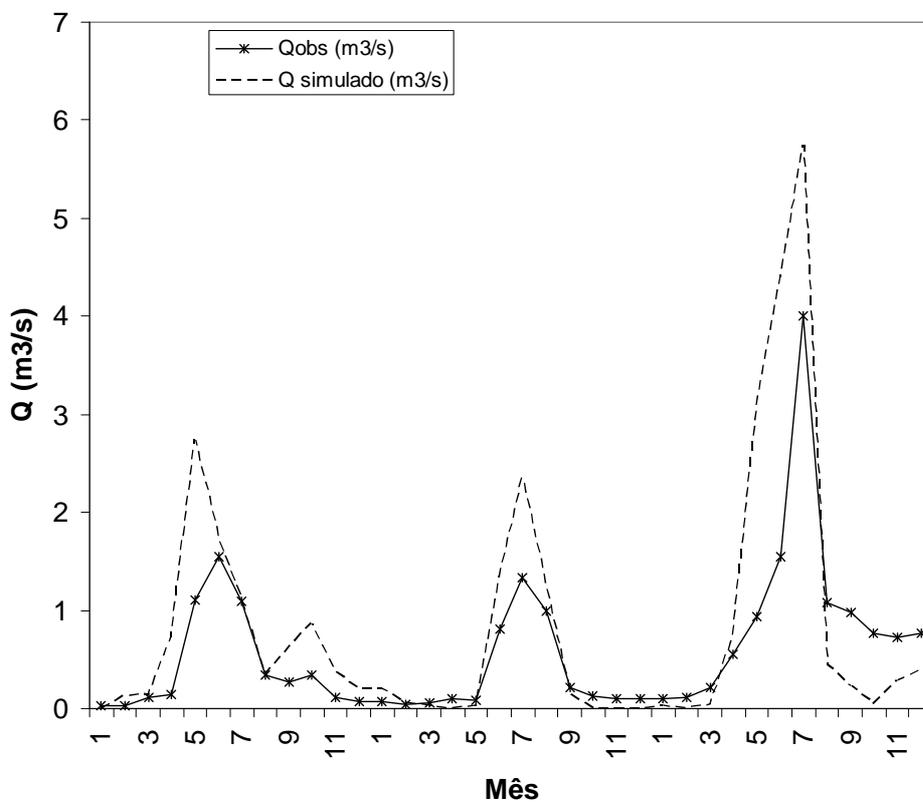


Figura 7 – Hidrograma observado e simulado para o posto Fazenda Pão de Açúcar a partir da calibração na seção Fazenda Cajueiro 1986-1988– NS = -0,10; PBIAS = 41,68%

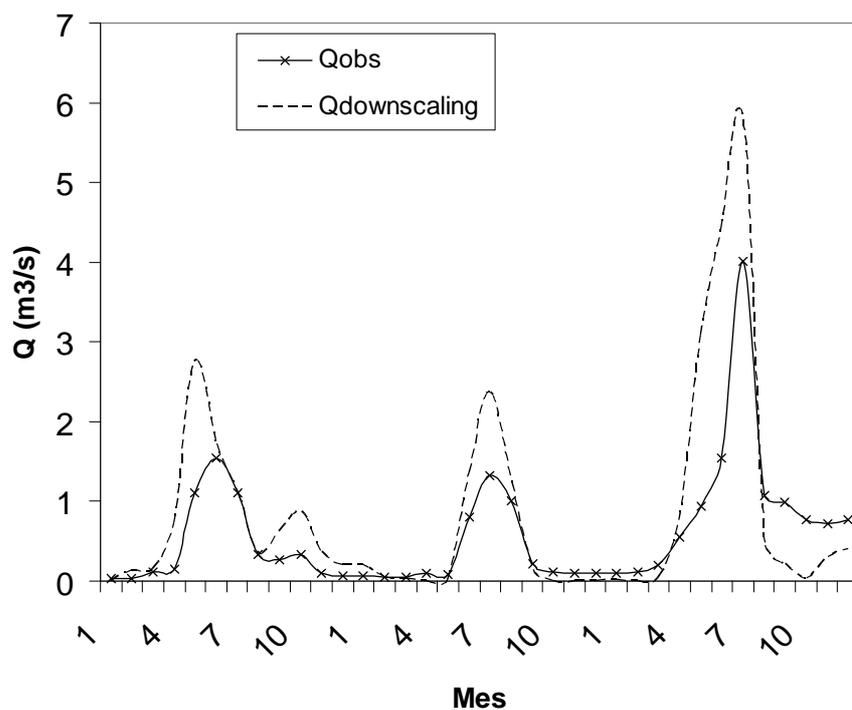


Figura 8 – Hidrograma observado e simulado para o posto Faz Pão de Açúcar utilizando os parâmetros calibrados na Fazenda Cajueiro – 1986-1988 – NS = -0,10; PBIAS = 41,68%

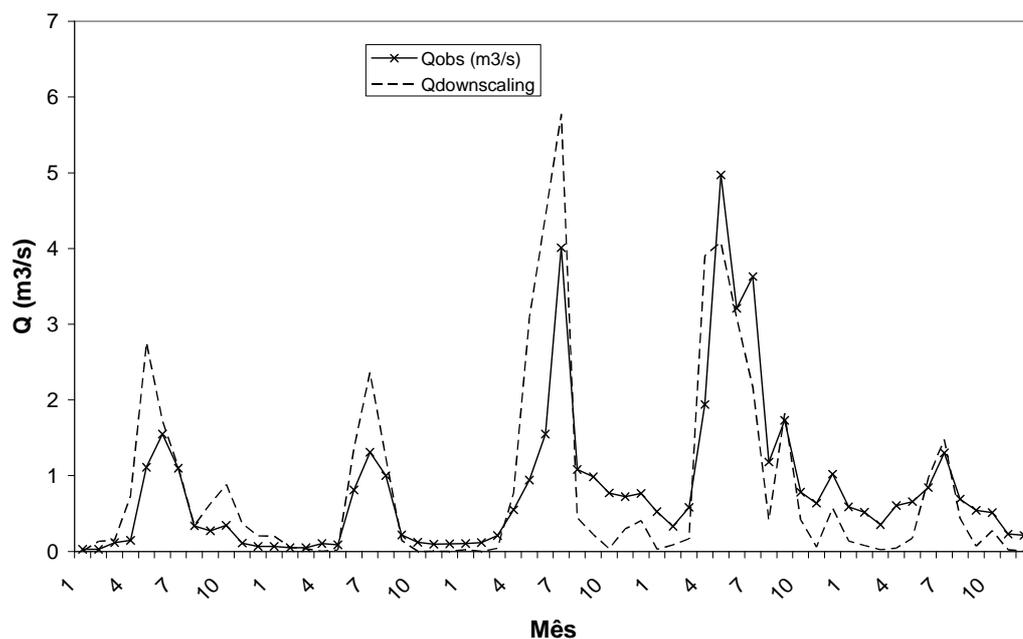


Figura 9 – Hidrograma observado e simulado para o posto Faz Pão de Açúcar a partir dos parâmetros calibrados na Fazenda Cajueiro – 1986-1990 - NS = 0,41; PBIAS = 41,68%

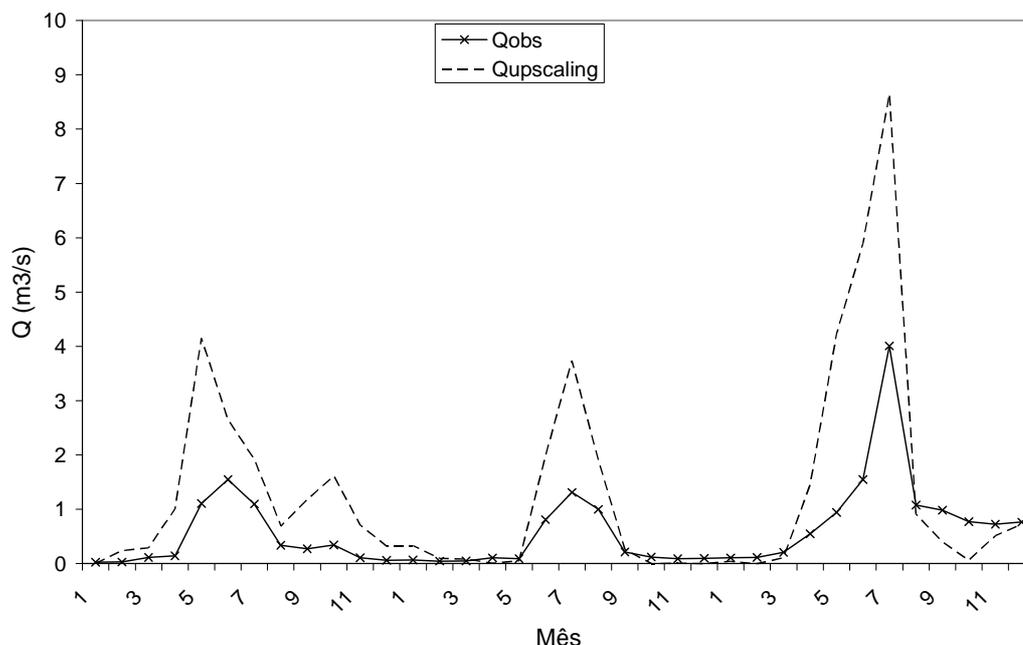


Figura 10 – Hidrograma observado e simulado para o posto Fazenda Cajueiro a partir dos parâmetros calibrados na Fazenda Pão de Açúcar – 1986-1988 - NS = -5,24; PBIAS = 41,68%

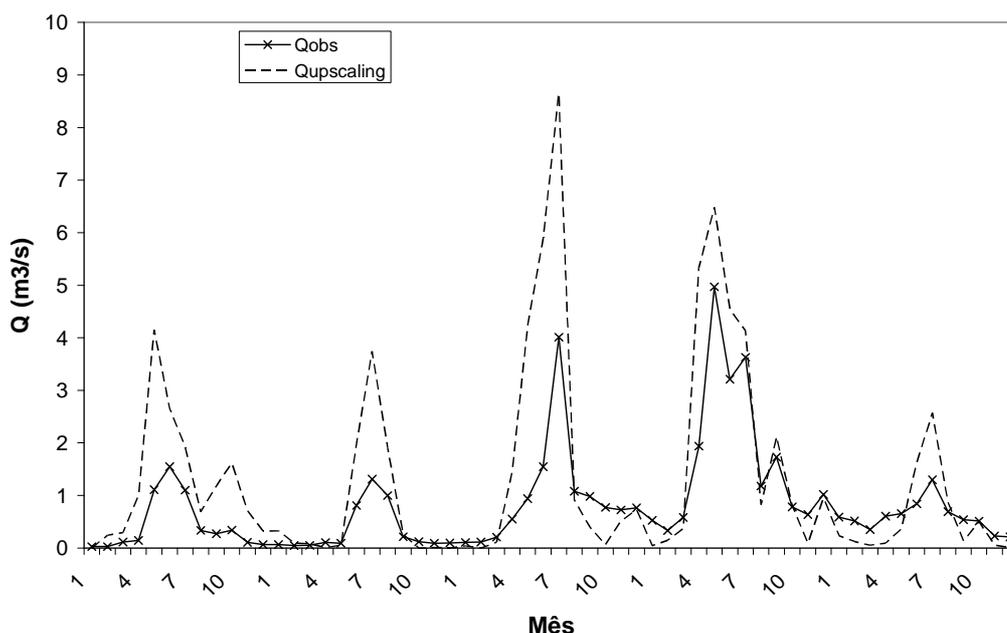


Figura 11 – Hidrograma observado e simulado para o posto Fazenda Cajueiro a partir dos parâmetros calibrados na Fazenda Pão de Açúcar – 1986-1990 - NS = -0,64; PBIAS = 41,68%

## 5 - CONCLUSÕES

A aplicação do modelo SWAT à sub-bacia do Rio Japarutuba-Mirim, considerando as suas duas seções de medição (PA e CJ), permitiu verificar que quando os parâmetros são calibrados, o modelo consegue simular satisfatoriamente os hidrogramas observados. Além disso, uma vez que os parâmetros foram bem calibrados é possível fazer a previsão de vazão em pontos não monitorados

da bacia, informação esta que poderá ser utilizada como informação de referência em processos de outorga pelos órgãos gestores. Em se tratando de transferência de parâmetros, para as condições aqui apresentadas e considerando os índices utilizados (NS e PBIAS), os resultados não foram satisfatórios, mas não os exclui em caso de uma estimativa inicial requerida. Por fim, considerando o banco de dados disponível, o SWAT mostra-se bastante promissor para a simulação de vazão em bacias desta magnitude.

## AGRADECIMENTOS

Os autores também agradecem a Agencia Nacional de Águas, a Universidade Federal de Sergipe – UFS, a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, a Secretaria de Recursos Hídricos de Sergipe – SRH-SE, da SEMARH-se; ao Centro de Meteorologia de Sergipe (CEMESE).

## BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.
- ANA (2002). HIDRO - Sistema de Informações Hidrológicas. Versão 1.0. Manual do Usuário.
- ARAGÃO, R; ALMEIDA, J. A. P.. (2009). Avaliação Espaço Temporal do Uso do Solo na Área da Bacia do Rio Japarutuba - Sergipe Através de Imagens LANDSAT. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. NATAL-RN : INPE, v. 1. p. 1231-1238.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. (2011) Avaliação do desempenho do sistema KINEROS2-AGWA numa bacia hidrográfica no Estado de Sergipe. In: XIX Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 2011, MACEIÓ: ABRH, 2011. v. 1. p. 1-20.
- ARAÚJO, J.C.; KNIGHT, D.W. (2005) A review of the measurement of sediment yield in different scales. Revista da Escola de Minas, v. 53 p. 257-265.
- BEVEN, K. (2001). Rainfall-Runoff Modelling-The Primer. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England. 360p.
- 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). Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; BARROS, C. A. P.; RODRIGUES, M. F. BUARQUE, D. C. (2011). Simulação da vazão e da produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT. In: Lima, Jorge E. F. e Lopes, W. T. A. Engenharia de Sedimentos – na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Brasília, 2011.
- CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. (2011). Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do riacho dos namorados no cariri Paraibano. Rev. Geogr. Acadêmica v.5, n.2 (2011)

- CHAGAS, C. S. et al. (2004). Estrutura e organização do sistema de informações georreferenciadas de solos do Brasil (Sigsolos - versão 1.0). Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. 2004, vol.28, n.5, pp. 865-876. ISSN 0100-0683.
- CHOW, V.T; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988) Applied Hydrology. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. Singapore. 572p.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models". Water Resources Research 28(4), pp. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1994). Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology 158, pp. 265-284.
- EMBRAPA (1975) Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado de Sergipe. Boletim Técnico no. 36. Série Recursos de Solos, n. 6, 545p.
- FONTES, A. L (1997). Caracterização da bacia do Rio Japarutuba (SE). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Universidade Estadual Paulista, 1997. (Tese de Doutorado em Geografia).
- GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C. (2011). The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. Proceedings of the 2011 International SWAT Conference & Workshops. Toledo, Spain, 2011.
- GOMES, J. B. V.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SIQUEIRA, O. J. W.; CARVALHO FILHO, A.; SOBRAL, L. F. (2007). Principais classes de solo do Estado de Sergipe. In SOBRA L. F, et al. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes no Estado de Sergipe. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. p. 25-79.
- GRASSI, M. T. (2001) As águas do planeta Terra. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição especial.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1(2): 96-99. 1985
- JAYAKRISHNAN, R; SRINIVASAN, R; SANTHI, C; ARNOLD, J. G. (2005) Advances in the application of the SWAT model for water resources management. Hydrological Processes v.19, p.749–762 (2005)
- 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 Ciências do Solo v.36, p.623-634, 2012
- MELO, H. A. (2010) Integração entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas: Uma Avaliação Metodológica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, UFCG
- MERRITT, W.S; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. (2003) A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software v.18 (2003) p.761–799.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). (2005) Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 5 jun. 2009.
- MISHRA, SK; SINGH, VP (2003) Soil Conservation Service Curve Number(SCS-CN) Methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- 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. Transactions of the ASABE, v.50, p.885-900.

- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J. R. (2005) Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation – version 2005. USDA Agricultural Research Service.
- PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; et al. (1995) Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, v. 267, p. 1117-1123.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. v.100, p.81-92.
- SALLES, L. A.; CHAVES, H. M. L. (2011). Estudo da sensibilidade de variáveis sedimentológicas influentes no desempenho do modelo SWAT. In: Lima, Jorge E. F. e Lopes, W. T. A. Engenharia de Sedimentos – na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Brasília, 2011.
- SEPLANTEC (2004). Atlas Digital de Recursos Hídricos. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia de Sergipe: Superintendência de Recursos Hídricos, 2004.
- SINGH, V.P. (1995). Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- SINGH, V.P., WOOLHISER, D. A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 4, July 1, 2002.
- SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q.; GUPTA, V. (1993). Calibration of rainfall – runoff models: Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Water Resources Research* 29(4), pp. 1185-1194.
- SOUZA, A. M. B.; CRUZ, M. A. S.; ARAGÃO, R. (2011). Análise comparativa do uso de modelos digitais de elevação para a caracterização física da bacia do rio Japarutuba. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió: ABRH, 2011. v. 1. p. 1-20.
- STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. (2012) Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT stream flow simulation. *Journal of Hydrology*. 414-415, p. 413-424
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1997) Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, N. 1, p.135-152
- VAN GRIENSVEN, A. et al. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 324 p.10-23, 2006
- WILLIAMS, J. R. (1975) Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resource Bulletin* v. 11, n. 5, p.965-974, 1975
- WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. (2009) ARCSWAT 2.3.4 interface for SWAT2005 - user's guide. USDA Agricultural Research Service.