

PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO SWAT EM DUAS SUB-BACIAS DE UMA BACIA EXPERIMENTAL E UMA AVALIAÇÃO DO MDE DA ENTRADA

José Guimarães de Carvalho Neto ¹ & *Vajapeyam Srirangachar Srinivasan* ²; *Iana Alexandra Alvez Rufino* ³

Resumo – As dificuldades inerentes na obtenção de dados originados pelo monitoramento hidrossedimentológico das bacias hidrográficas são grandes obstáculos para planejamento e aproveitamentos dos recursos naturais de uma bacia. Diante disto, a aplicação de modelos hidrossedimentológicos torna-se bastante prática para obter estimativas da geração do escoamento superficial e da produção de sedimentos pela erosão. No presente trabalho aplicou-se o modelo SWAT nas Sub-Bacias 2 e 1 da Bacia Experimental de São João do Cariri, visando calibrar e validar alguns parâmetros importantes para sua aplicação no semi-árido do nordeste. As simulações foram realizadas utilizando dois Modelos Digitais de Elevação (MDE) para fins de uma análise comparativa: um originado a partir da interpolação de dados topográficos de campo e outro obtido pelo sensoriamento remoto para avaliar o grau da confiabilidade do uso do MDE obtido por sensoriamento remoto. A calibração foi realizada na Sub-Bacia 2. O desempenho do modelo, foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e do fator da eficiência de Nash-Sutcliffe. Os resultados da simulação do escoamento foram satisfatórios para os MDEs, indicando a pouca sensibilidade da topografia na geração de lâmina simulada, enquanto a produção de sedimentos apresentou resultados insatisfatórios com discrepâncias significativas.

Abstract – The difficulties faced in obtaining field data about runoff and soil erosion are a major obstacle for planning the utilization of the natural resources of a hydrologic basin. The use of hydrosedimentological models can be of great help in obtaining reasonable estimates of runoff and soil erosion in basins. This paper describes the procedure and results obtained in calibrating and validating some of the important parameters of the model SWAT with the data from two sub-basins of an experimental basin in the semiarid region of the northeast of Brazil. Two different Digital Elevation Models (DEM) were tried as entry data: one generated by interpolation techniques from field topographic data and the other obtained from remote sensing. The calibration was carried out in sub-basin 2 and the validation in sub-basin 1. The evaluation of the results was based on the coefficient of determination R^2 and the Nash-Sutcliffe Efficiency Factor. The results show that the run was well simulated with both the DEMs indicating low sensitivity for the topographic variations. The results for erosion and sediment production were, however, significantly different.

Palavras-Chave – simulação hidrossedimentológica, modelo digital de elevação (MDE) e SWAT (“*Soil and Water Assessment Tool*”).

¹ Bolsista do projeto Rede Clima, INPE, Cachoeira Paulista, SO, ze.ambiental@gmail.com

² Professor Visitante Nacional Sênior, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, PE. vajapeyam@yahoo.com

³ Professor adjunto da UFCG, CCT, Av. Aprígio Veloso – 882, Bairro Universitário, CEP: 58429-140 – Campina Grande – PB, E-mail iana_alex@uol.com.br

INTRODUÇÃO

Estimativas da produção do escoamento superficial e de sedimentos pela erosão são de fundamental importância para um eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas. Neste sentido busca-se prever de maneira mais realista possível a transformação da precipitação nos mais diversos componentes dos processos do ciclo hidrológico, para ter informações essenciais para uma tomada de decisão. Sendo assim, regiões que apresentam irregularidades no regime pluviométrico são as que mais necessitam de um planejamento e gerenciamento de seus recursos.

No semi-árido do nordeste do Brasil, a precipitação, em geral, se concentra em um quadrimestre no restante do ano apresenta altas taxas de evaporação (MMA, 2007). A precipitação que favorece o desenvolvimento também ocasiona a erosão hídrica, no qual o impacto das gotas de chuva promove a desagregação do sedimento e o escoamento superficial transporta as partículas erodidas (Tucci, 2009). A erosão hídrica possui relevância na degradação do solo, pois promove perda de nutrientes e o conseqüente empobrecimento do solo (Carvalho, 2008) – que afeta o crescimento vegetal. A vegetação possui um papel importante na minimização dos processos erosivos, uma vez atenuando o efeito de impacto das gotas de chuva, aumenta a infiltração no solo e retarda o fluxo superficial (Srinivasan et al., 2003). Assim, seria fundamental evitar a erosão da camada superficial do solo que contém os nutrientes para não iniciar um ciclo degenerativo do solo, no qual a perda da camada fértil dificulta o crescimento vegetal e a redução da vegetação amplifica o processo de erosão do solo, em um processo de início de desertificação.

Em pequenas bacias hidrográficas, o desmatamento ocasiona uma maior geração de escoamento superficial devido a redução da capacidade de infiltração no solo e da evapotranspiração (Tucci, 1997). Santos (2000) demonstrou que a vegetação nativa do semi-árido, a caatinga é bastante capaz de proteger o solo contra erosão e a remoção desta vegetação é prejudicial para a fina camada do solo. Srinivasan et al., (2003) verificaram que o solo com vegetação rasteira e cobertura morta proporciona alto nível de proteção do solo e que a declividade é fator pouco sensível para a geração de escoamento superficial e bastante influente na produção de sedimentos.

Dito isto, em regiões em que o monitoramento hidrossedimentológico é precário, ou mesmo inexistente, a utilização de modelos hidrológicos de base física que proporciona estimativas da geração do escoamento superficial e da perda do solo seria bastante útil. Segundo Klemes (1986), a utilidade de um modelo hidrológico reside na sua capacidade de sintetizar informações hidrológicas

necessárias em uma tomada de decisão, no contexto do gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos. Vários são os modelos de base física que consideram a variabilidade espacial, entre eles o modelo “*Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT) tem sido bastante utilizado em várias partes do mundo. 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, 2005).

Devido a sua forma de execução, acoplado internamente a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) através da interface ArcSWAT (Melo, 2010), o modelo SWAT necessita de arquivos geo-espaciais como dados de entrada. O Modelo Digital de Elevação (MDE) – referente a topografia do terreno –, e os mapas da cobertura e tipo de solo, são convertidos diretamente como informações para o modelo pela interface gerando os parâmetros para a simulação. A aquisição das informações sobre a bacia hidrográfica simulada é necessária para fornecer dados referentes a cobertura do solo e o tipo de solo. As informações que dizem respeito a topografia do terreno são obtidas diretamente pela leitura do modelo digital de elevação utilizado.

Os objetivos do presente trabalho são uma avaliação do desempenho do modelo SWAT para estimar o escoamento superficial e a erosão do solo pela: (a) calibração dos dados de cobertura e tipo de solo, numa sub-bacia numa bacia experimental (b) validação dos parâmetros numa outra sub-bacia, e (c) avaliar dois MDEs diferentes, um originado por dados de campo e o outro proveniente de imagem de satélite pelos resultados da simulação do escoamento e erosão .

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo SWAT

O modelo SWAT (“Soil And Water Assessment Tool”), amplamente utilizado no mundo, destaca-se devido a sua versatilidade em trabalhar acoplado a um Sistema de Informações Geográficas. Este modelo considera os componentes climatológicos, hidrológicos, erosivos, crescimento vegetal, do manejo agrícola e da propagação de nutrientes e pesticidas utilizando como dados de entrada mapas temáticos do tipo e cobertura do solo, além de um modelo digital de elevação (Dhar, 2009). Com base física e lidando com diversos eventos de maneira contínua no tempo, o modelo SWAT simula os processos envolvidos considerando as características e as variações espaciais da bacia hidrográfica, de modo que seus resultados podem ser visualizados utilizando as ferramentas de SIG (Neitsch, 2005).

Através do uso do Método de Curva Número, o modelo estima o escoamento superficial relacionando-o com as características da cobertura do solo e tipo do solo. A produção de sedimentos é estimada pela Equação Universal de Perda do Solo Modificada (EUPS-M) e a propagação dos sedimentos na calha fluvial é dada pela Teoria da Potência do Fluxo, de Bagnold (1977). A EUPS-M possui o fator de escoamento superficial, estimado para cada evento de precipitação, e considera características referentes ao solo, cobertura vegetal e manejo além da topografia do terreno.

O modelo utiliza a interface ArcSWAT (Winchell, 2007) para estabelecer a conversão dos dados de entrada em informações para execução do modelo. A interface ArcSWAT também é responsável pelo processo de delimitação da bacia e estabelecimento das Unidades de Respostas Hidrológicas (URH). As URH são áreas que apresentam combinação de cobertura, tipo de solo e o intervalo de declividades entre as classes formuladas pelo usuário da forma que a cada delas apresenta condições homogêneas, na qual o modelo SWAT promove a simulação básica dos processos.

Área de estudo e aplicação do modelo

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), operado pelas universidades federais da Paraíba e de Campina Grande, inserida na Bacia do Riacho dos Namorados, é largamente investigada no que se refere a modelagem hidrológica. Sua região apresenta clima semi-árido, solos rasos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação de caatinga, relevo ondulado (Paiva, 2008) e altitude entre 480 a 540 m (Paes-Silva, 2002). A BESJC é caracterizada como representativa da região semi-árida e possui diversas unidades experimentais (Srinivasan et al., 2004), entre as quais as sub-bacias 1 e 2, apresentadas na Figura 1, foram utilizadas neste trabalho.

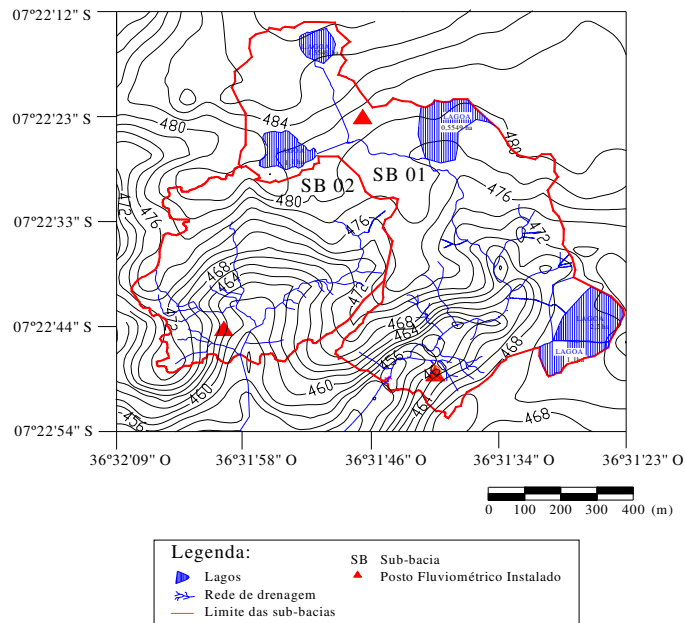


Figura 1 Localização e delimitação das Sub-Bacias 1 e 2 inseridas na BESJC

A sub-bacia 2 (32 hectares) foi utilizada na calibração do modelo por apresentar um maior grau de conservação, por estar totalmente inserida na BESJC. Enquanto que a execução do modelo SWAT na sub-bacia 1 (59 hectares) buscou a validação.

O mapa de cobertura vegetal e de tipo de solo originado por Paes-Silva (2002) e Chaves (2004), respectivamente, foram utilizados na execução do modelo. Destaca-se a vegetação da caatinga, cobrindo quase que inteiramente a Sub-Bacia 2, enquanto que cultivo de milho e algaroba (*Prosopis juliflora*), além da própria caatinga encontram-se na área da Sub-Bacia 1. No banco de dados da interface ArcSWAT há informações referentes a uma vegetação esparsa na qual predomina arbustos, denominada “*range brush*”. Esta vegetação foi utilizada em analogia a caatinga. Por outro lado, no banco de dados também se encontra dados referentes a *Prosopis glandulosa*, cuja denominação é “*honey mesquite*”, e fez-se analogia com a algaroba por se tratar de espécies do mesmo gênero. As variáveis que mais influenciam nos processos de escoamento superficial e erosão de sedimentos conforme indicados por Lenhart (2002), foram objeto de modificações nos valores gerados pelo banco de dados de SWAT para assegurar a melhor verossimilhança com a vegetação local.

Quanto ao tipo de solo, o Luvisolo Crômico Vértico e o Vertissolo estão presente em ambas as sub-bacias. Porém foram utilizadas as texturas médias, obtidas em campo, para toda a área em cada sub-bacia. O banco de dados requer informações quanto as características físico-hídricas, tais quais número de camadas e suas respectivas profundidades, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica e o fator de erodibilidade do solo. A capacidade de água disponível foi

estimada segundo Salter e Williams (1967/1969), enquanto que a condutividade hidráulica foi atribuída o valor adotado por Santos (2008), em estudos na mesma área. O fator de erodibilidade do solo foi calculado em função da textura, conforme método de Williams (1995).

A topografia do terreno foi representada pelo uso de dois modelos digitais de elevação, um originado por interpolação de cotas levantados em campo através de levantamentos automatizado e convencional. O outro MDE foi obtido através de imagem de satélite ASTER. Os dados levantados em campo foram tratados no ArcGIS e em seguida interpolados utilizando a ferramenta “topo do raster”, resultando em um MDE com resolução de 20 metros. Este MDE será identificado como “MDE interpolado” no decorrer deste trabalho. O uso de dois MDEs foi feito para verificar o grau de aproximações das informações relevantes obtidos com o uso de uma imagem de satélite com os obtidos com os dados reais do campo.

Quando a água da infiltração atravessa a última camada do solo considerada, o modelo SWAT considera três caminhos como possíveis: recarregar os aquíferos rasos e/ou profundo, e estar disponível para o processo de REVAP. Tendo em vista que na área de estudo não há aquífero algum, toda a água foi direcionada, através do ajuste de coeficientes, para o processo de REVAP. Este processo visa considerar áreas nas quais a zona saturada é próxima à superfície, de tal modo que a água ascende por capilaridade ou é retirada por raízes profundas estando novamente disponível para transpiração das plantas ou para a evaporação na superfície do solo (Neitsch, 2005).

Os dados de, precipitação, evapotranspiração potencial, lâmina escoada e produção de sedimentos foram coletados durante a execução de diversos projetos de pesquisa desenvolvidos na BESJC. Dados climáticos médios foram fornecidos ao gerador climático WXGEN (Sharpley & Williams, 1990) visando gerar as estimativas diárias para a simulação.

Na execução do modelo SWAT, alguns pesquisadores adotaram a prática de duplicação dos três primeiros anos de simulação visando o aquecimento do modelo (Peterson, 1998; White, 2005; Olivera, 2006; Cibin, 2010). O mesmo procedimento foi adotado nas simulações deste trabalho, de modo que os dados de três anos entre 2004 a 2006, foram duplicados (repetidos de novo) para que o primeiro período possa servir como período de aquecimento – sendo os resultados obtidos nesse período descartados. O período de aquecimento do modelo visa estabilizar as condições de umidade do solo.

No processo de delimitação da bacia foi definida a área de contribuição mínima para formação do canal em 0,3 ha para a sub-bacia 2 e de 0,35 ha para as sub-Bacias 1. Foram

utilizados cinco intervalos de declividade: de 0 a 4%, de 4% a 6%, de 6% a 8%, de 8% a 10% e acima de 10%.

Os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) e de determinação (R^2) foram utilizados como medidas de avaliação do modelo SWAT. O valor de COE superior a 0,75 indica um bom desempenho do modelo, enquanto que o valor entre 0,36 a 0,75 denota um desempenho satisfatório. Valores inferiores a 0,36 julgam o modelo inaceitável (Silva, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados dizem respeito ao processo de delimitação das sub-bacias, no qual o MDE interpolado resultou em um processo mais consistente, de modo que um único divisor topográfico separou ambas sub-bacias – conforme a realidade da área em estudo. A delimitação com o MDE ASTER apresentou um espaço vago entre ambas as sub-bacias. A área delimitada foi bastante inferior ao valor real para a Sub-Bacia 2, sendo de aproximadamente 16 hectares, enquanto que a área delimitada para a Sub-Bacia 1 foi de cerca de 41,5 hectares. A identificação e distribuição dos intervalos de declividade foram diferentes para as duas sub-bacias nos dois MDEs. A Figura 2 expõe a delimitação e a distribuição da declividade para as delimitações das Sub-Bacias 2 e 1 com os dois MDEs utilizados (Sub-Bacia 2 é a menor).

A distribuição de declividades na Sub-Bacia 2 foi bastante diferente, entre os dois MDEs. No interpolado de 20 metros, cerca de 42% de sua área delimitada foi identificada com declividades superior a 8%. enquanto no MDE ASTER cerca de 22% de sua área foi identificado com declividades superior a 8%. Por outro lado na Sub-Bacia 1 tais diferenças foram bem menores, de modo que foi possível realizar uma distribuição mais equitativa em termos numéricos, mas, houve diferenças significativas quanto a distribuição espacial, conforme a Figura 2. Por outro lado, verificou-se que a distribuição de declividades apresentada pelo MDE interpolado apresentava uma maior consistência com as observações do campo.

As dimensões dos canais definidas por ambos os MDEs mostraram uma boa correlação entre a largura e profundidade, contudo a declividade apresentou uma grander discrepância. Verificou-se que o MDE interpolado apresentou três canais com declividades superior a 0,078 m/m – sendo a maior de 0,085 m/m -, enquanto que o MDE ASTER teve como maior valor de declividade 0,065 m/m. Tais diferenças são relevantes uma vez que a capacidade de transporte de sedimentos

calculada pelo modelo SWAT se dá como função direta da velocidade de pico, e esta depende das dimensões dos canais e da declividade.

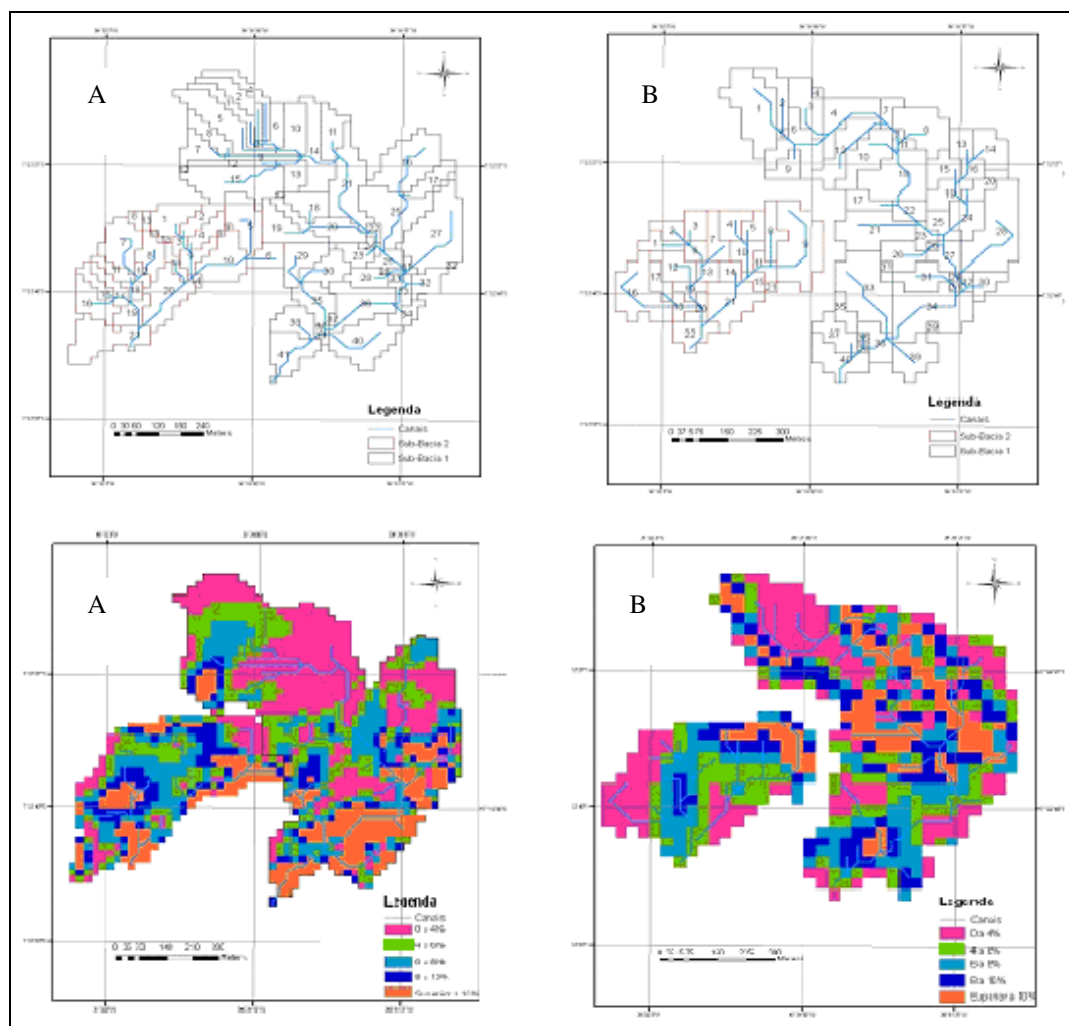


Figura 2 Definição das sub-unidades delimitadas e da distribuição dos intervalos de declividade: (A) MDE interpolado e (B) MDE ASTER

A menor área definida no processo de delimitação, aparentemente, origina erros no que diz respeito ao volume simulado, de modo que os processos simulados apresentam um volume inferior àquele real. Esta discrepância é significativa para estudos hidrológicos, em especial no que concerne a Sub-Bacia 2, contudo no presente trabalho analisou-se a lâmina escoada, e não o volume, de modo que a execução do trabalho não é comprometida. Na literatura não foi possível encontrar discussão quanto aos resultados provenientes do processo de delimitação, de tal modo que os trabalhos encontrados tratam apenas do desempenho do modelo perante a simulação da geração do escoamento superficial e produção de sedimentos.

Os resultados da simulação foram analisados em relação a geração de escoamento superficial e a produção de sedimentos. A análise do escoamento superficial aconteceu de maneira direta pelos dados observados, enquanto que a produção de sedimentos buscou-se averiguar também o aporte

por sub-bacia de modo a identificar valores dentro de um intervalo real, já que os dados observados da produção de sedimentos não incluíam a parte em suspensão que teria passado pelos vertedores.

Com relação ao escoamento superficial os resultados indicaram o COE de 0,286 e o R^2 de 0,923, pela simulação com o MDE interpolado de 20 m, e o COE de 0,310 e o R^2 de 0,929 para o MDE ASTER, na Sub-Bacia 2. Este resultado pode ser considerado bom pelos valores de R^2 e considerando que o modelo SWAT, originalmente foi desenvolvido para grandes bacias. Vale ressaltar que há vários trabalhos na literatura em que o modelo foi aplicado em pequenas bacias alcançando resultados razoáveis no que diz respeito a geração do escoamento superficial (Lopes, 2008; Green, 2008; Govender, 2008; Uzeika, 2009). Contudo, uma verificação detalhada dos dados mostrou que havia diversos eventos em que não houve lâmina gerada, tanto a observada e quanto a simulada, bem como a existência de um evento bastante singular, de tal modo que estes mascaravam os coeficientes de análise. O evento singular refere-se a uma precipitação diária de 162 mm, que gerou uma lâmina observada de 40 mm, enquanto que o modelo estimou uma lâmina de 75 mm. Esta discrepância é atribuída ao Método de SCS-CN, pois este não considera a intensidade da precipitação. Com a exclusão desses eventos, valores do desempenho do modelo foram obtidos como: o COE de 0,436 e o R^2 0,706, para o MDE interpolado, e o COE de 0,491 e o R^2 de 0,725 para o MDE ASTER.

Na Sub-Bacia 1 os resultados iniciais do desempenho do modelo mostraram valores bastantes próximos para ambas as simulações, com os dois MDEs: -0,657 para o COE e de 0,718 para R^2 . Nesta sub-bacia, ocorreram dois eventos singulares que promoviam uma deficiência na avaliação do desempenho. Um primeiro no qual houve uma precipitação diária de 61 mm e um segundo com a precipitação de 133 mm, que geraram lâminas observadas de 6,5 mm e 24,2 mm, respectivamente. A estimativa do modelo para estes eventos foi de 34 mm, para o primeiro, e de 55,3 mm, para o segundo. Com a exclusão desses eventos, e daqueles em que não houve lâmina observada nem simulada, foram obtidos valores dos indicadores da eficiência do modelo, com o COE de 0,783 e o R^2 de 0,798.

Na Figura 2 é possível perceber que há diferenças significativas quanto a distribuição dos intervalos de declividade entre ambos os MDEs para as sub-bacias. Contudo, a averiguação destes primeiros resultados mostra que a lâmina escoada simulada é pouco sensível a topografia do terreno, representado pelos MDEs na simulação com o modelo SWAT. A Figura 3 exibe a comparação gráfica entre as lâminas observadas e simuladas para as duas sub-bacias e ambos os MDEs. É possível observar que a dispersão dos dados simulados são bastante semelhantes para os MDEs.

Isto denota um resultado importante quanto à aplicação do modelo em pequenas bacias, tornando possível a confiabilidade na lâmina simulada com o uso de imagem de satélite para representar a topografia do terreno.

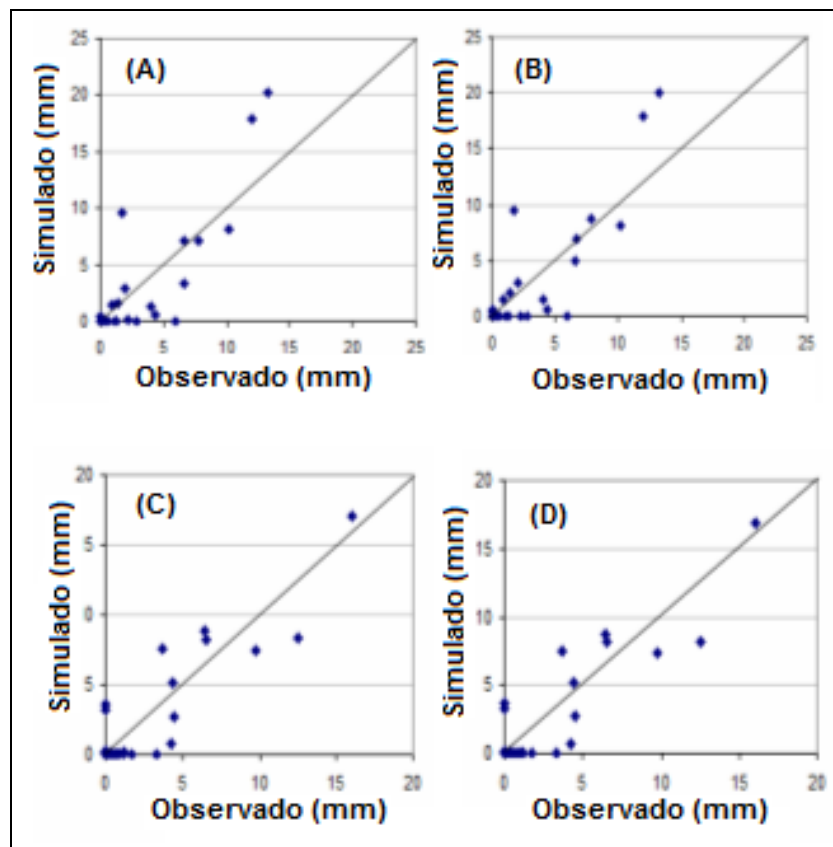


Figura 3 Comparação gráfica entre lâmina escoada e simulada: (A) interpolado e (B) MDE ASTER, na Sub-Bacia 2 e (C) interpolado e (D) MDE ASTER, na Sub-Bacia 1.

A análise da produção de sedimentos não proveu resultados satisfatórios. O modelo SWAT não foi capaz de fornecer valores da carga de sedimentos no exutório conforme aqueles observados. O modelo simulou erosão em quase todas as HRUs, mas, houve um processo de deposição, principalmente no canal da saída da sub-bacia. A quantidade de sedimentos depositada na própria bacia chegou a ser da ordem de 99% para a simulação na Sub-Bacia 2 pelo MDE interpolado, e de 97% pelo MDE ASTER. Na Sub-Bacia 1 o processo de deposição foi menos intenso, com uma fração de 75% pelo interpolado e de 89% pelo MDE ASTER. A carga de sedimentos entrando na última sub unidade da saída, foi bastante grande mas, a carga de sedimento na saída do canal para o exutório foi muito menor indicando uma grande deposição dos sedimentos na calha fluvial principal da saída. Este intenso processo de deposição ao longo da calha fluvial principal, para ambos os MDEs, indicadas nas simulações não correspondem às observações no campo. Na literatura não foram encontradas indicações sobre este tipo de comportamento em outras simulações com o modelo SWAT favorecendo o processo de deposição ao longo da calha fluvial, É possível que a declividade do canal considerado no modelo seja menor do que real ou o modelo esteja

considerando algum efeito de alagamento próximo a saída. De qualquer forma, este aspecto necessita de maiores investigações futuras.

Através do tratamento dos resultados, confeccionou-se um mapa do assoreamento dos canais para todo o período simulado, conforme exibido na Figura 4. Este mapa evidencia o alto processo de deposição no canal principal, obtidos em ambas as simulações e reforçam a necessidade de estudos futuros detalhados.

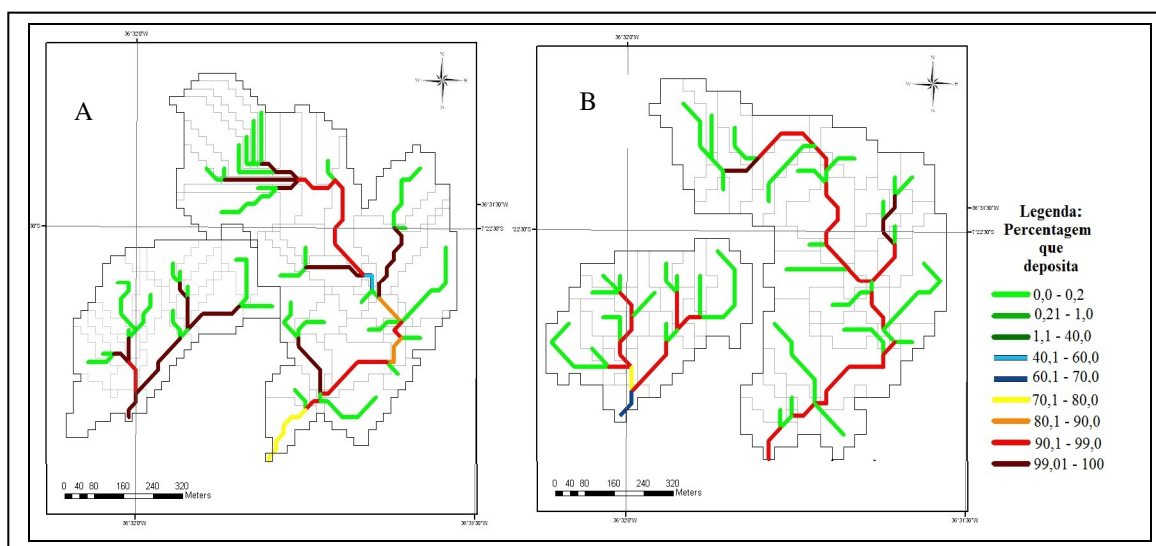


Figura 3 Mapa de assoreamento para o período simulado, (A) MDE interpolado e (B) MDE ASTER

Uzeika (2009) obteve o COE entre 7 a 145 negativos para a produção de sedimentos, havendo uma superestimativa desta pelo modelo SWAT na pequena bacia de 119 hectares. Green (2008) aplicou o modelo SWAT em seis pequenas bacias, com as áreas variando entre 4 a 8,5 hectares e obteve valores médios do coeficiente de Nash para avaliação da produção de sedimentos superior a 0,4. Um resultado similar foi obtido por Shen (2009), no estudo do qual o desempenho do modelo SWAT para a produção de sedimentos atingiu valores de 0,678 e 0,818 para o coeficiente de Nash. Estes trabalhos podem servir de referência da aplicação do dito modelo em pequenas bacias, e denotam a variabilidade da eficiência deste modelo quanto a produção de sedimentos.

Diante das diferentes distribuições das declividades encontradas nos MDEs, o que se observa é que a produção de sedimentos apresenta, igualmente, diferentes distribuições espaciais de erosão de solo na bacia. Este resultado indica cautela quanto ao uso do MDE como dado de entrada para simulação dos processos de erosão do solo e deposição de sedimentos com o modelo SWAT. A identificação das locais onde os processos de erosão e deposição ocorrem é de grande importância e resultados da simulação contrários a realidade de campo seriam danosos, uma vez que é possível ocorrer uma atribuição equivocada pelo uso de um MDE não representativo da realidade física..

Atenção especial deve ser direcionada quanto ao uso de MDE originado por sensoriamento remoto, que pode gerar resultados inconsistentes pela representação e a escolha inadequada da distribuição e dos intervalos de declividade.

A topografia de uma bacia hidrográfica influencia diretamente os processos hidrossedimentológicos - erosão, transporte e deposição de sedimentos (Borah, 2007). Uma vez que a distribuição do relevo difere entre os MDEs, é natural que haja diferenças entre os resultados obtidos, haja vista que o fator topográfico da EUPS-M é fundamental na estimativa da erosão do solo. Trabalhos futuros, com mais verificação em campo, são necessários de modo a se obter confiabilidade quanto aos resultados obtidos com os MDEs.

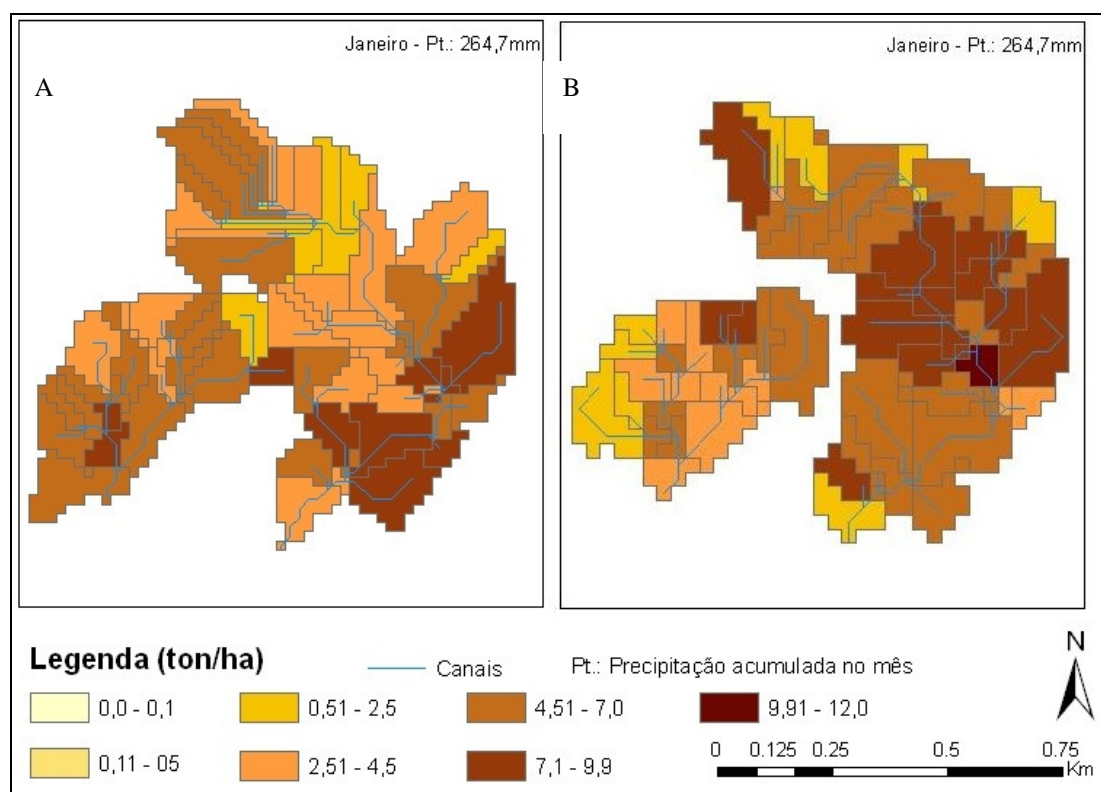


Figura 4 Distribuição espacial da erosão do solo para o mês de Janeiro de 2004: (A) interpolado e (B) MDE ASTER

O aporte de sedimentos estimado pelo interpolado na Sub-Bacia 2 foi superior àquele encontrado pelo MDE ASTER, com valor médio para o período simulado de 4,556 ton/ha/ano, o que promove uma perda de solo da ordem de 0,27 mm/ano. Enquanto que o MDE ASTER acarreta em uma perda de solo de aproximadamente 0,23 mm/ano devido à estimativa de aporte anual em 3,796 ton/ha. A maior estimativa da produção de sedimento pelo MDE interpolado é um reflexo direto da maior área da sub-bacia apresentar declividades superiores a 8%.

Os resultados do aporte de sedimentos na Sub-Bacia 1 mostrou uma boa conformidade entre os dois MDEs. Os resultados de simulação indicaram uma produção de sedimentos de 6,02 ton/ha/ano e 6,112 ton/ha/ano, para o MDE interpolado e o MDE ASTER, respectivamente. Tais valores correspondem a uma perda aproximada de 0,37 mm/ano de solo. Os valores de erosão do solo estimados estão dentro de um intervalo real admissível para os solos do estado da Paraíba, conforme Oliveira (2008).

CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, é possível concluir que:

- O processo de delimitação de bacia, utilizando a interface ArcSWAT, é bastante simples e eficiente. A má delimitação da Sub-Bacia 2 ocorrida com ambos os MDEs, pode ser atribuído ao seu tamanho reduzido e a insensibilidade do processo para detectar variações topográficas nesta escala. Sendo bem maior, a delimitação da Sub-Bacia 1 apresentou maior conformidade;
- A utilização direta de um mapa de cobertura do solo, representando apenas a vegetação, favoreceu a um satisfatório desempenho do modelo perante a simulação da lâmina escoada, mesmo com um processo simples de parametrização apenas visando à conformidade com a área de estudo;
- A lâmina escoada apresentou baixa sensibilidade quanto aos MDEs utilizados como dado de entrada para o modelo;
- A carga de sedimentos que alcança o exutório é bastante sensível ao MDE utilizado, do mesmo modo do transporte destes ao longo dos trechos de rios;
- A distribuição espacial do aporte de sedimentos apresenta algumas diferenças quantitativas e qualitativas significativas, entre os MDEs, e
- A taxa média de erosão do solo para a sub-bacia 1 indica uma boa proximidade entre os valores, de tal modo que esta estimativa mostra alguma conformidade entre os dois MDEs utilizados no caso desta sub-bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGNOLD, R. A. (1977). Bedload transport in natural rivers. *Water Resources*, v13, 0 303 – 312.

CARVALHO, N. de O (2008). *Hidrossedimentologia prática*. Interciência. Rio de Janeiro, 2ª ed., 600p.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. (2010). Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Process*, vol 24, p. 1133-114.

DHAR, Sujana; MAZUMDAR, Asis (2009). Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. *Hydrological Processes*, vol 23, p. 2394 – 2406.

GASSMAN, P. W. et all (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, p. 1211-1250.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. (2005). Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrological Processes*. v. 19, p. 683-692.

GREEN, G. H.; GRIENSVEN, A. (2008). Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software*. v. 23, p. 422-434.

KLEMES, V (1986). Operational testing of hydrological simulation. *Hydrological Sciences*. Vol. 31, 13-24 pp.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*. v. 27, p. 645-654.

LOPES, Nadia Hidemi Yano (2008). *Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 164p.

MELO, Heber de Andrade (2010). *Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 119p.

Ministério do Meio Ambiente (2007). Atlas das Áreas Suscetíveis à Desertificação do Brasil. 134p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2005) Soil And Water Assessment Tool – Theoretical Documentation. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 494p.

OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; SILVA, I. F.; SILVA, M. L. N. (2008) Tolerância de Perda do Solo por Erosão para o Estado da Paraíba. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 8, n 2, p 60-61.

OLIVERA, Francisco; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. (2006). ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. Journal of the American Water Resources Association, v. 42, n. 2, p. 295-309.

PAES-SILVA, Albanita Peixoto (2002). Cobertura Vegetal da bacia hidrográfica do açude do Namorado no Cariri Oriental Paraibano. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. 95p.

PETERSON, J. R.; HAMLET, J. M. (1998). Hydrologic Calibration of the SWAT Model in a Watershed Containing Fragipan Soils. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n.3, p. 531 - 544.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1967). The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV. A method of estimating the available water capacities of profiles in the field. Journal of Soil Science, v. 18, p. 174-181.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1969). The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V. Relationships between particle size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available water. Journal of Soil Science, v. 20, p. 126-131.

SANTOS, L. L. (2008). Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três Modelos em Pequenas Sub-Bacias na Região Semi-Árida Paraibana. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 155p.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. 1990. EPIC – Erosion productivity impact calculator: Model Documentation. Washington: U.S. Department of Agriculture. 145p.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. (2008). Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 258 – 265.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. (2003). Erosão Hídrica do Solo no Semi-Árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 56-72.

SRINIVASAN, V.S.; et all. (2004). Bacia Experimental de São João do Cariri-PB. In: Righetto, A.M. (Org.), *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126.

TUCCI, C. E. M. (2009) *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 943 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1997). Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n 1, p. 135-152.

UZEIKA, Talita (2009). Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.

WHITE, Kati L.; CHAUBEY, I. (2005). Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. *Journal of the American Water Resources Association*. October, p 1077– 1089.

WILLIAMS, J. R. (1995). Chapter 25: The EPIC model. V.P. Singh (ed). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. 909-1000 pp.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; LUZIO, M.; ARNOLD, J. (2007). *ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User’s guide*. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 436p.