

ANÁLISE DA EROÇÃO HÍDRICA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA USANDO O MODELO SWAT ACOPLADO A UM SIG

Isabella Carvalho de MEDEIROS¹ & Richarde Marques da SILVA²

(1) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço Eletrônico: isabellacmedeiros@gmail.com.
(2) Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço eletrônico: richarde@geociencias.ufpb.br.

Introdução
Materiais e métodos
 Caracterização da área de estudo
 O modelo SWAT
 Dados de entrada e aplicação do modelo
 Definição dos parâmetros do modelo SWAT
Resultados e discussão
 Estimativa e análise das perdas de água
 Estimativa e análise das perdas de solo
Conclusões
Referências bibliográficas

RESUMO – A erosão dos solos é um dos mais graves problemas em todo o mundo, e a utilização de modelos de predição vazão-erosão acoplados a um SIG é uma importante ferramenta para o conhecimento sobre o processo de erosão e a gestão dos recursos hídricos. Este trabalho analisa as perdas de água e solo na Bacia Experimental de São João do Cariri, localizada no semiárido do Estado da Paraíba, utilizando o modelo hidrossedimentológico SWAT. Foram utilizados dados diários de precipitação, temperatura, umidade do ar, escoamento superficial e perdas de solo, para o período de 2004 a 2006. Foram utilizados também mapa de uso e ocupação do solo e mapa digital de elevação com resolução espacial de 30 m e mapa dos tipos de solo da bacia. Os dados observados mostram uma variação das perdas de água entre 10 e 12.800 m³ e perdas de solo entre 10 e 430 kg. Os resultados também demonstraram a eficácia do modelo para a análise dos processos hidrossedimentológicos, com valores de R² = 0,87 e 0,66 para perdas de água e solo, respectivamente. Conclui-se que o modelo SWAT acoplado ao SIG é uma ferramenta poderosa na análise do comportamento dos processos hidrossedimentológicos.

Palavras-chave: SIG, modelo hidrossedimentológico, erosão.

ABSTRACT – Soil erosion is a major environmental problem worldwide, and the use of models to predict rainfall-runoff-erosion coupled to GIS is an important tool for knowledge about the erosion process and the management of water resources. This study analyzed the water and soil yield at the São João do Cariri Experimental Basin, located in the semiarid region of Paraíba State, through runoff-erosion model named, SWAT. In order to development of the study, rainfall, temperature and humidity data from 2004 to 2006 were used. Land cover map and digital elevation model with spatial resolution of 30 m, and soil types map were used. The results showed for water yield ranged from 10 or 12,800 m³, and soil loss ranged from 10 for 430 kg. The results also showed the effectiveness of the model for the analysis of runoff-erosion process with R² = 0.84 and 0.87 for soil loss and water yield, respectively. It is concluded that the SWAT model coupled with GIS is a powerful tool in the analysis of temporal and spatial behavior of runoff-erosion processes.

Keywords: GIS, runoff-erosion model, erosion.

INTRODUÇÃO

A erosão dos solos é uma das formas mais significativas de degradação ambiental, sendo influenciada por diversos fatores, tais como: característica do solo; topografia; uso e ocupação do solo e clima (Oliveira et al., 2009). O estudo dos processos erosivos vem sendo feito há diversas décadas, em todo o mundo. Para tal, os pesquisadores têm lançado mão de uma série de métodos e técnicas, dependendo dos objetivos do estudo, dos recursos humanos e financeiros disponíveis, das condições climáticas, dos tipos de solos, das condições ambientais e de outras características relevantes para o tema em questão (Guerra, 2006).

O estudo da erosão dos solos é muito importante sob os aspectos sociais e econômicos, uma vez que analisa as perdas de solo em terras agricultáveis e também no assoreamento de rios e reservatórios (Silva et al., 2012). Com a aplicação de modelos hidrossedimentológicos que utilizam como dados de entrada imagens de alta resolução espacial é possível detectar mudanças no uso do solo e analisar a variabilidade espacial e temporal dos impactos causados pela ação antrópica e com isso, entender melhor os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos (Srinivasan & Paiva, 2011),

sobretudo na região semiárida (Ezz-Aldeen & Al-Ansari, 2013), como é o caso de grande parte da Região Nordeste do Brasil, que se caracteriza por alta variabilidade de chuva, escassez hídrica, vegetação do tipo caatinga e pequena espessura da camada de solo (Braga et al., 2013).

A utilização de modelos matemáticos está em ascensão e vem mostrando, cada vez mais, a importância destes estudos. Nessa perspectiva, a aplicação de modelos matemáticos acoplados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), é cada vez mais importante na predição e na análise da erosão dos solos e de outros problemas ambientais (Zhang et al., 2009). Dentre os modelos com essa característica, pode-se citar o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), como um dos modelos mais utilizados em todo o mundo (Silva et al., 2013a). O SWAT tem uma interface razoavelmente amigável e o fato deste interagir com um SIG enriquece a análise das pesquisas, uma vez que o SIG permite a visualização de diversas informações topográficas, morfométricas, entre outras, sobretudo, na

integração de bases espaciais e na criação de mapas.

O modelo SWAT oferece ferramentas para prever o efeito das ações de uso e manejo do solo, perdas de solo, produção de nutrientes e uso de pesticidas, sobre os recursos hídricos. A aplicabilidade do SWAT na representação da distribuição espacial do uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade e sua diversidade de parâmetros responsáveis pelo controle dos processos do ciclo hidrológico torna o modelo um dos mais utilizados no mundo (Silva et al., 2013b).

A integração entre técnicas de SIG e modelos hidrossedimentológicos é uma importante ferramenta para o gerenciamento da água e do solo, principalmente em ambientes de clima semiárido, como é o caso de grande parte do Estado da Paraíba. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo analisar a aplicabilidade do modelo SWAT utilizando dados de alta resolução espacial, para analisar o comportamento das perdas de água e solo em uma bacia do semiárido nordestino.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) possui uma área de aproximadamente 13,5 km² e está localizada entre as coordenadas 36° 31' 22" O a 36° 32' 58" O e 7° 20' 12" S a 7° 23' 17" S (Figura 1). Esta bacia está inserida no bioma Caatinga, na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, formada por maciços e outeiros altos, com altitude variando entre 650 a 1.000 m. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo climático BSh (semiárido), caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. A temperatura ao longo do ano varia entre 24 °C no mês de junho e 29 °C (máxima) nos meses de setembro a janeiro e a umidade relativa média anual é de aproximadamente 57% (Santos et al., 2007). A Figura 2 mostra a variabilidade da precipitação anual média na bacia, observada no período de 1987 a 2010, com precipitação anual em torno de 460 mm.

A BESJC apresenta solos rasos, pouco porosos e predominantemente plásticos, com vegetação do tipo caatinga e relevo bastante ondulado, com altitudes variando entre 450 a 700 m (Albuquerque et al., 2005). O embasamento geológico é de natureza cristalina, compreendendo rochas metamórficas e ígneas antigas, do Pré-cambriano.

Os tipos de solos encontrados na Bacia Experimental de São João do Cariri são: Cambissolo Háptico, Neossolo Litólico, Luvissole Crômico e Vertissolo Cromado. Deve-se destacar também a presença de afloramentos rochosos em várias partes da bacia. Segundo Chaves (2002), os solos Luvissole Crômico encontrados na bacia são solos rasos a moderadamente profundos, com sequência de horizontes do tipo A, B e C com textura argilosa ou média, bem drenados, desenvolvidos de rochas metamórficas. Apresentam minerais primários de fácil intemperização no perfil e fertilidade natural de média a alta.

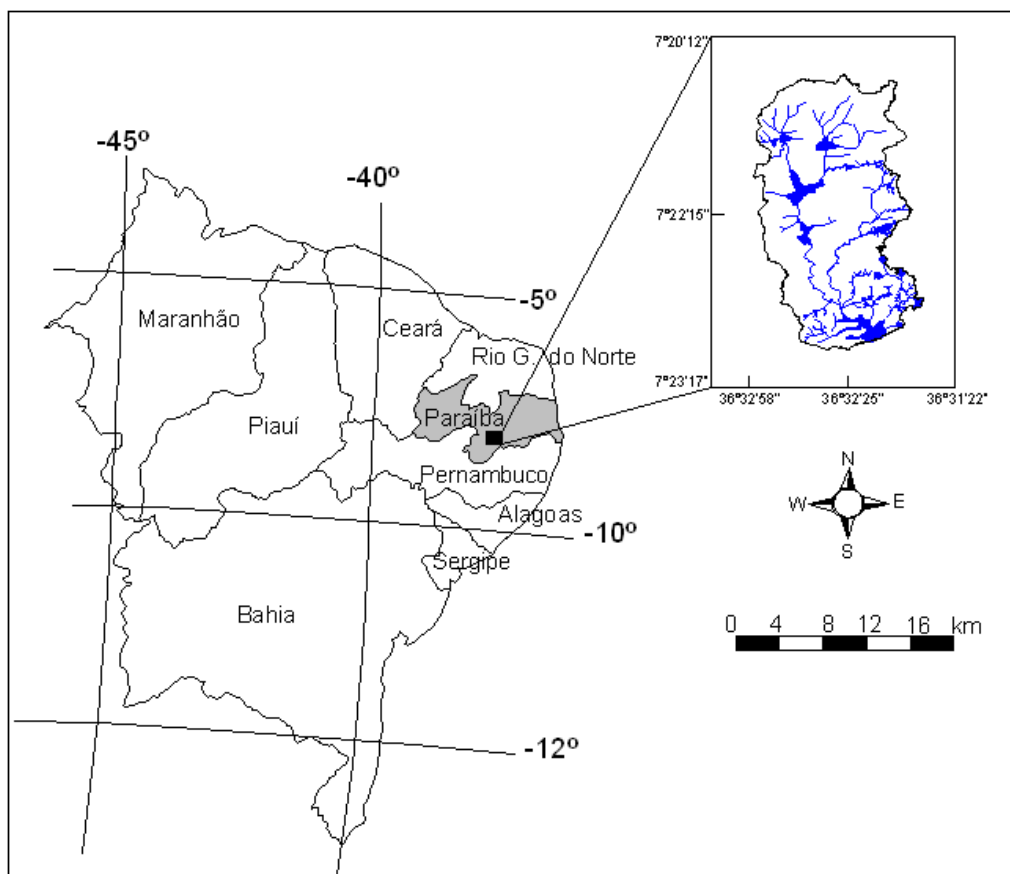


Figura 1. Localização geográfica da Bacia Experimental de São João do Cariri.

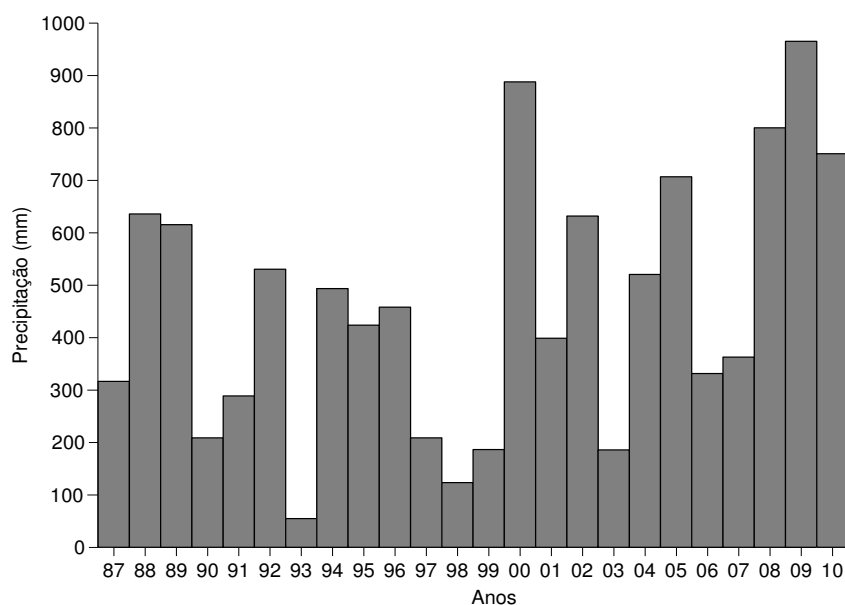


Figura 2. Precipitação anual média na Bacia Experimental de São João do Cariri.

Quanto aos solos do tipo Vertissolo Cromado, estes são argilosos a muito argilosos e menos desenvolvidos que os Luvisolos, possuindo uma toposequência de horizonte A-C-R. De acordo com o levantamento detalhado dos solos realizado Paes-Silva (2002). Esse tipo de solo na bacia apresenta fendilhamentos,

pedregosidade, boa fertilidade, porém, são rasos a moderadamente profundos e ocorrem em relevo plano a suave ondulado. Os solos Neossolo Litótico se caracterizam por serem muito rasos a rasos, com sequência de horizonte do tipo A-R, com textura arenosa ou média, moderadamente drenados, com horizonte A

fraco ou moderado (Paes-Silva, 2002). Os solos do tipo Cambissolo são pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente; pouco profundo e, muitas vezes, cascalhento. São solos considerados "jovens", pois possuem minerais primários e altos teores de silte até mesmo nos horizontes superficiais. Por possuírem alto teor de silte e pouca profundidade, estes solos apresentam permeabilidade muito baixa.

O modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo matemático desenvolvido nos

EUA, pelo *Agricultural Research Service* e *Texas A&M University*. Esse modelo tem como um de seus objetivos simular chuva-vazão-erosão, o efeito das ações de uso e manejo do solo, perdas de solo e nutrientes e uso de pesticidas, evapotranspiração, entre outros, requerendo como dados de entrada informações sobre chuva, temperatura, umidade, solos, relevo e mapas de uso do solo (Silva et al., 2011). A Figura 3 mostra o fluxograma das etapas dos processos hidrológicos no modelo SWAT utilizadas neste estudo.

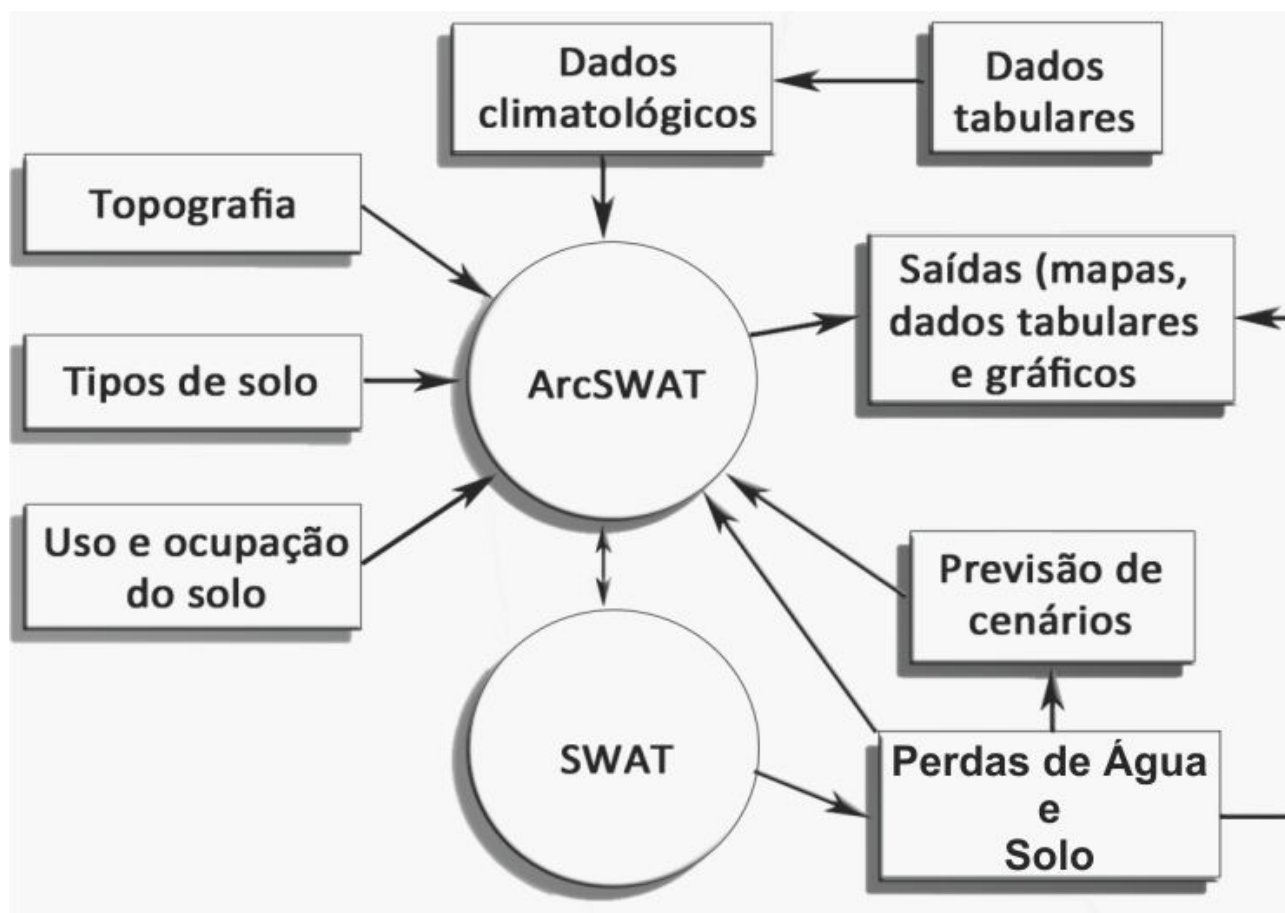


Figura 3. Fluxograma das etapas das perdas de água e solo no modelo SWAT.

Os dados tabulares são compostos por dados climatológicos (precipitação, umidade relativa, direção dos ventos e temperatura), que são utilizados para a caracterização climática da bacia e iniciar os processos de transformação chuva-vazão-erosão. As bases espaciais são constituídas pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e ocupação do solo, e mapa dos tipos de solos, que são utilizados para a delimitação e identificação das sub-bacias e fluxos de drenagem. Neste estudo foi utilizado o MDE com resolução espacial de 30 m, adquirido no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, através do endereço:

<http://www.dsr.inpe.br/topodata> (Valeriano, 2005; Valeriano et al., 2009).

Para a estimativa da infiltração, do escoamento superficial e da força de desprendimento pelo fluxo da água é necessária a determinação do balanço hídrico. Para tanto, o modelo SWAT utiliza a seguinte equação:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad [1]$$

sendo SW_t o conteúdo final de água no solo (mm), SW o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm), t o tempo (dias), R_i a precipitação (mm), Q_i o escoamento superficial (mm), ET_i a evapotranspiração (mm), P_i a percolação (mm), e QR_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

A evapotranspiração é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evaporação potencial. O modelo oferece três opções para a estimativa da evaporação potencial: Penman e Monteith, Hargreaves e Samani, e Priestley e Taylor. No modelo a componente percolação usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinando com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez percolada abaixo da zona das raízes, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. Essa técnica é apresentada pela equação:

$$SW_i - SW_{oi} \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \quad [2]$$

sendo SW e SW_o a umidade do solo no começo e fim do dia (mm), respectivamente, Δt o intervalo de tempo (h), TT o tempo de propagação através da camada i em h, e i o índice de identificação da camada do solo.

Assim, a percolação pode ser calculada pela seguinte relação:

$$P_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad [3]$$

no qual P_i a percolação em mm/dia.

O tempo de propagação nas camadas de solo é calculado através da equação:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{K_s} \quad [4]$$

onde FC é a capacidade de campo, menos a lâmina de água do ponto de murchamento para

a camada i (mm), e K_s é a condutividade hidráulica do solo (mm/h).

A água contida no solo no ponto de murchamento, bem como a capacidade de campo são definidos pelo modelo como função da densidade do solo em cada sub-bacia. A erosão dos solos no modelo é simulada por intermédio da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), que é uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Enquanto no modelo USLE são utilizados os índices de precipitação como medidas indicativas de energia do impacto das gotas de chuva no solo, a MUSLE usa a quantidade de escoamento superficial e o pico de vazão para simular a produção de sedimentos. O uso da MUSLE resulta em inúmeros benefícios, entre eles, ganho na precisão do modelo e a necessidade de uma razão de transporte é eliminada, permitindo que a equação seja aplicada para eventos de chuva individuais.

$$P_{sed} = 11,8(Q_{surf} \times Q_{peak} \times area_{hru})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \quad [5]$$

no qual P_{sed} é a perda de solo (ton), Q_{surf} o volume de escoamento superficial (m^3), Q_{peak} a vazão de pico do escoamento (m^3/s), $area_{hru}$ a área das Unidades de Resposta Hidrológica – HRU (ha), K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot ha / MJ / mm$), C_{USLE} o fator de manejo e cobertura do solo (adimensional), P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas (adimensional), e LS_{USLE} o fator topográfico (adimensional).

Dados de entrada e aplicação do modelo

Para o levantamento cartográfico do uso e ocupação do solo da área de estudo utilizou-se uma imagem do satélite IKONOS, de maio de 2010, com resolução espacial de 1 m, adotando-se a seguinte composição colorida: Banda 1 (R), Banda 4 (G) e Banda 3 (B). O método de classificação utilizado foi o manual, por se tratar de uma imagem de alta resolução espacial que permitiu uma classificação mais precisa da cobertura do solo na bacia. De acordo com a refletância espectral dos alvos foi possível classificar sete classes de uso e ocupação do solo: Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva, Vegetação Arbustiva-arbórea, Área de Cultivo, Solo Exposto, Água e Urbano. As classes de uso do solo foram checadas em campo em

visitas à bacia, para uma melhor definição das amostras dos tipos de uso e ocupação do solo.

A área classificada como Vegetação Rasteira corresponde à vegetação que acompanha o curso dos rios, sejam eles intermitentes ou temporários, e também no entorno de açudes, em sua maior parte formada por vegetação herbácea. De acordo com Alcoforado-Filho et al. (2003), as áreas classificadas como Vegetação Arbustiva e Vegetação Arbustiva-Arbórea são representativas do bioma da caatinga, e se diferem pelo porte, sendo a arbustiva aquela vegetação com porte de até 1,5 m de altura, a Arbustiva-Arbórea com porte entre 1,6 a 5,0 m de altura (Xavier et al., 2013). A classe Área de Cultivo corresponde às áreas de reflorestamento com espécies do tipo Algaroba (*Prosopis Juliflora*) e também constituída por pequenas áreas agrícolas. A classe Solo Exposto é caracterizada pela falta de cobertura vegetal. As classes Área Construída e Água representam áreas com edificações e rios e açudes, respectivamente.

Para a calibração do modelo SWAT, foram utilizados dados diários de escoamento superficial e produção de sedimentos, para o período de 2004 a 2006, registrados na seção de monitoramento hidrossedimentométrico instalada no exutório da Sub-bacia 19 (Figura 4). A Figura 5 mostra a divisão da BESJC

dividida em 25 sub-bacias no SWAT, com base no modelo de elevação digital da bacia. Essas 25 sub-bacias são responsáveis por controlar os processos de produção de sedimentos e escoamento superficial na bacia. Para a aplicação do modelo SWAT, foram utilizados dados diários de precipitação de 2004 a 2006, de dois postos, uma estação climatológica e um posto pluviométrico. Os dados diários de umidade relativa do ar e de temperatura do mesmo período foram obtidos da estação climatológica.

Esse período para a simulação foi escolhido porque é aquele com maior quantidade de eventos registrados de escoamento superficial e produção de sedimentos na bacia. Mais detalhes sobre o procedimento de coleta e processamento dos dados coletados na seção de monitoramento podem ser encontrados em Srinivasan et al. (2003) e Santos et al. (2012).

Após a preparação do banco de dados, iniciou-se a fase de aplicação do modelo, que seguiu as seguintes etapas: (a) Delimitação da bacia hidrográfica a partir do Modelo Digital de Elevação (DEM), (b) Definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URH), com a inserção dos mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo, (c) Inserção dos dados climáticos; e (d) Simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos na BESJC.



Figura 4. Exutório da Sub-bacia 19 da Bacia Experimental de São João do Cariri.

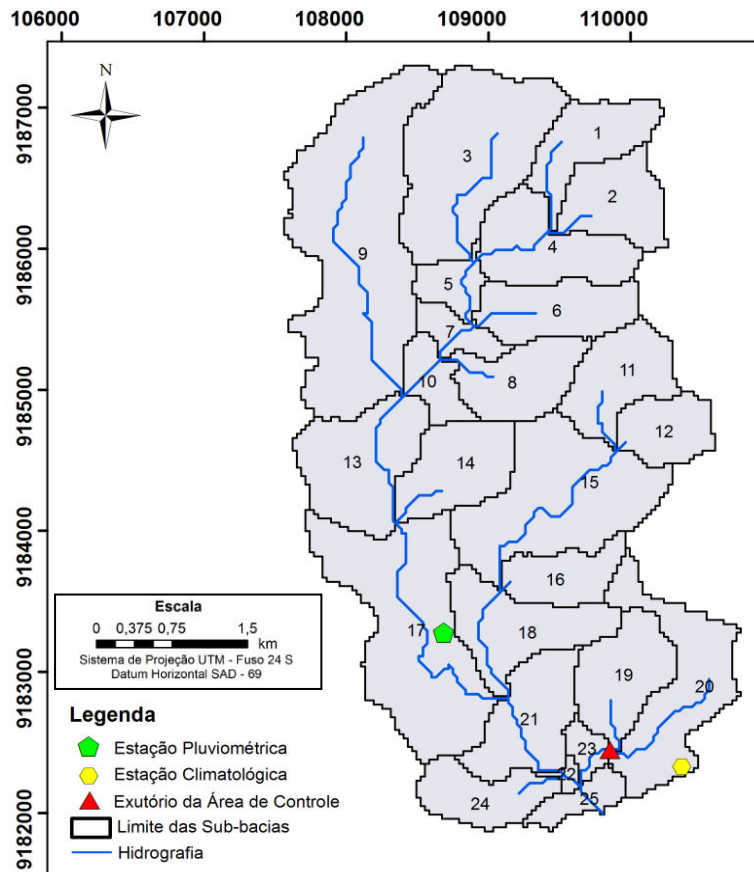


Figura 5. Mapa das sub-bacias geradas, rede hidrográfica, e localização da estação climatológica, posto pluviométrico e seção de monitoramento das perdas de água e solo.

A Tabela 1 mostra a área em km² e em percentual dos tipos de uso e ocupação do solo na bacia. Percebe-se que a bacia apresenta predominantemente cobertura vegetal do tipo Caatinga, com apenas 11,87% de sua área recoberta com Área de Cultivo, caracterizado por criação de cabras e agricultura de subsistência. As áreas com cultivo ocupam a porção noroeste da bacia e estão localizadas próximas à rede de drenagem da bacia. Nota-se que as vegetações do tipo Arbustiva e

Arbustiva-arbórea recobrem 73,42% do total da bacia, portanto são os dois tipos de cobertura vegetal que mais influenciam no Fator C_{USLE} da Equação 5. A Bacia Experimental de São João do Cariri é constituída principalmente por solos do tipo Luvisolo Crômico (57% da área da bacia), seguido do Vertissolo Cromado (36,5%) (Tabela 2). A Figura 6a apresenta o mapa com os tipos de solos da BESJC. A Figura 6b mostra a distribuição espacial dos tipos de cobertura vegetal e usos do solo na bacia.

Tabela 1. Descrição do uso e ocupação do solo da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Tipos de Uso do Solo	Área (km²)	%
Rasteira	1,03	7,64
Arbustiva	7,36	54,81
Arbustiva-arbórea	2,50	18,61
Área de cultivo	1,60	11,87
Edificação	0,01	0,02
Água	0,50	3,69
Solo Exposto	0,45	3,36
Total	13,43	100,00

Tabela 2. Descrição dos tipos de solos da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Tipos de Solo	Área (km ²)	%
Cambissolo Háplico	0,67	5,00
Neossolo Litólico	0,19	1,46
Luvissolo Crômico	7,66	57,05
Vertissolo Cromado	4,90	36,50
Total	13,43	100,00

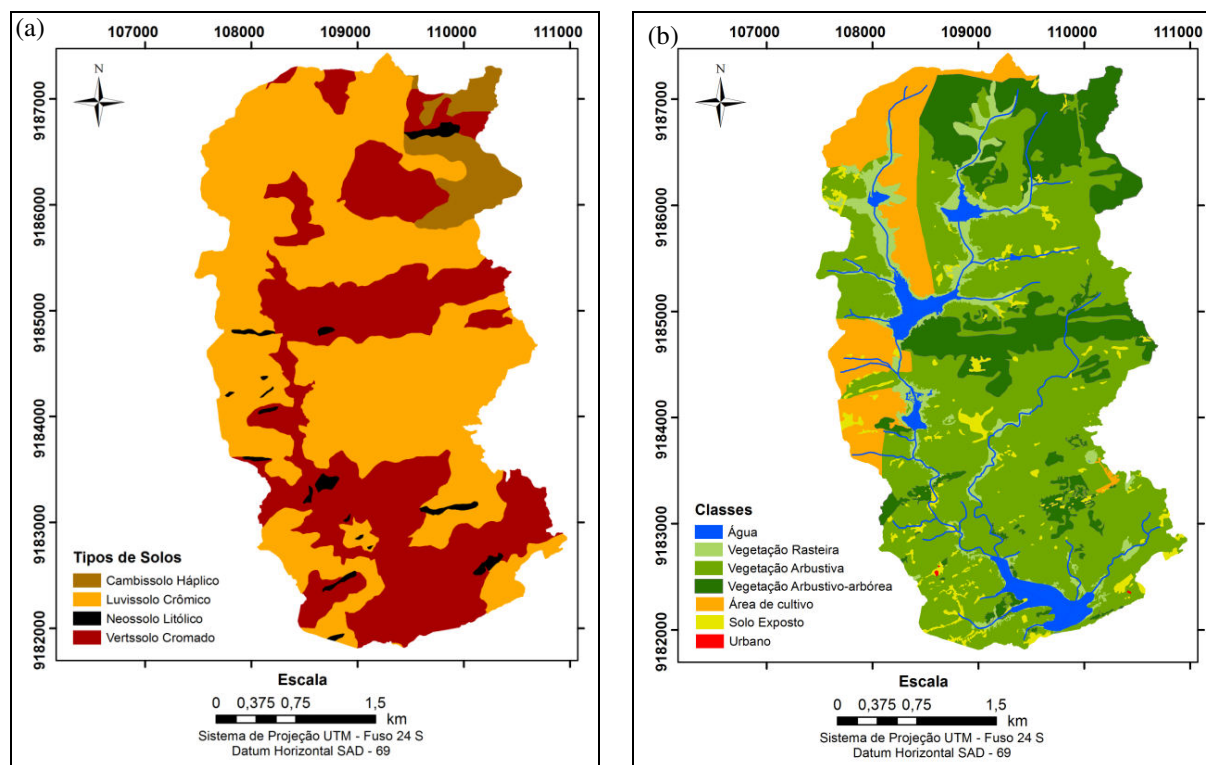


Figura 6. (a) Tipos de solos da BESJC, e (b) mapa de uso e ocupação do solo.

Para analisar os resultados do modelo SWAT, foram utilizados indicadores estatísticos para verificar o desempenho da calibração do modelo. Neste trabalho foi utilizado o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R^2). Esse coeficiente mede a associação linear entre duas variáveis, sendo calculado pela da equação abaixo:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad [6]$$

sendo x_i os valores observados, x_m a média destes valores, y_i são os valores estimados pelo modelo e y_m é a média dos valores estimados pelo modelo. O valor obtido é adimensional, variando entre -1 e 1, sendo quanto mais

próximo de um o valor se apresentar, mais eficiente será a previsão.

Definição dos parâmetros do modelo SWAT

O modelo SWAT possui um banco de dados contendo diversos parâmetros para cada tipo de uso e ocupação do solo. Neste estudo foram realizadas associações/adaptações entre os tipos de uso do solo do banco de dados do SWAT e os usos existentes na bacia. Para a determinação dos melhores valores dos parâmetros do modelo SWAT foram realizadas 90 interações no processo de calibração. Essa etapa foi orientada, majoritariamente para a diminuição das incongruências entre as perdas de água observadas e calculadas, assim, iniciou-se a alteração dos parâmetros físicos do solo pelo método de tentativa e erro.

A classe Arbustivo-arbórea foi reclassificada como *Range Brush*, a classe Arbustiva foi

associada a *Range Grass*, e a Área de Cultivo, por ser predominantemente formada por replantio de Algaroba, pôde ser reclassificada como *Honey Mesquite*, que é uma planta da mesma família da Algaroba. A classe Vegetação Rasteira foi vinculada a classe *Wetlands-Non-Forested*, que se trata de uma vegetação de pequeno porte que permanece úmida na maior parte do ano. A classe Água foi classificada como do tipo *Water* e a classe Área Construída foi associada a classe *Residential*. A Tabela 3 mostra o resumo dos dados alterados que foram inseridos no banco de dados do uso e ocupação do solo do modelo SWAT.

Para testar a aplicabilidade do modelo foi utilizado o método da Calibração Manual, no qual se compara o valor calculado com o observado de perdas de água e solo para cada evento. Os parâmetros mais sensíveis utilizados na comparação entre a produção de sedimentos observada e a calculada, com seus respectivos valores foram: Escs (0,95); Surlag (10); Sol_awc (0,4); Alpha_bf (1); Cn2 (63); Rchrg_dp (1); Ch_k2 (10); Gwqmn (3); Gw_revap (0.1).

O parâmetro Cn2 representa o valor da curva número inicial, o Rchrg_dp a fração de percolação que recarrega o aquífero profundo, o Ch_k2 corresponde à condutividade hidráulica efetiva no canal, o Gwqmn é a profundidade de

água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno e o Gw_revap é o coeficiente de re- evaporação da água subterrânea. O parâmetro Alpha_bf representa o Fator Alfa do Fluxo de Base, que lida diretamente com o número de dias para que o fluxo subterrâneo atinja o canal; o Surlag é o coeficiente de atraso do escoamento superficial, o Escs é o fator de compensação da evaporação do solo e o Sol_awc é a capacidade de água disponível na camada do solo.

No que tange aos parâmetros mais sensíveis que foram ajustados para cada tipo de uso do solo destacam-se ainda, o de área foliar (BLAI) e a altura da copa (CHTMX) que, segundo Carvalho Neto (2011) são parâmetros bastante influentes no escoamento superficial e no aporte de sedimentos foram modificados no banco de dados do modelo e utilizados nas simulações. Os parâmetros de porosidade e condutividade hidráulica do solo foram definidos baseados em Rawls e Saxton (1982), como sendo 0,398 e 4 mm/h, respectivamente, valores estes que foram adotados para todos os tipos de solo. Para o valor da profundidade da raiz utilizou-se o valor da profundidade da última camada de cada solo e à densidade aparente foi atribuído o valor de 1,65 g/cm³, conforme adotado por Carvalho Neto (2011).

Tabela 3. Valores dos parâmetros dos tipos de solo utilizados para calibração do modelo SWAT.

Parâmetros	Tipos de Solos		
	Luvissoilo Crômico	Vertissoilo Cromado	Neossoilo Litólico
Número de camadas	3	4	2
CLAY (1)	14	28	8
SILT (1)	33	19	20
SAND (1)	53	53	72
SOL_CBN (1)	1,36	1,53	0,56
SOL_Z (1)	40	40	200
USLE_K (1)	0,15061	0,1228	0,16511
SOL_AWC (1)	0,175	0,15	0,175
CLAY (2)	21	40	12
SILT (2)	26	14	22
SAND (2)	53	46	66
SOL_CBN (2)	0,63	0,65	0,31
SOL_Z (2)	180	250	350
USLE_K (2)	0,16345	0,13013	0,17058
SOL_AWC (2)	0,15	0,142	0,175
CLAY (3)	40	39	–
SILT (3)	23	17	–
SAND (3)	37	44	–

SOL_CBN (3)	0,35	0,51	–
SOL_Z (3)	500	650	–
USLE_K (3)	0,1475	0,138	–
SOL_AWC (3)	0,175	0,183	–
CLAY (4)	–	31	–
SILT (4)	–	16	–
SAND (4)	–	53	–
SOL_Z (4)	–	900	–
SOL_AWC (4)	–	0,15	–

Quanto ao parâmetro Grupo Hidrológico, todos os solos da bacia foram classificados como Grupo hidrológico C, que, de acordo com as recomendações da *U.S. Natural Resource Conservation Service* (Medeiros et al., 2013), são solos com baixa taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/h, com textura moderadamente fina a fina, que impedem o movimento da água nos horizontes. Esses solos possuem baixa taxa de transmissão de água (alto escoamento superficial potencial).

O valor para o albedo de 0,17 e as especificações das texturas dos diferentes tipos de solo foram adquiridas segundo Carvalho Neto (2011) e Medeiros et al. (2013), por meio da relação feita entre os solos mapeados neste trabalho com os que o referido autor define como Perfis 31, 41 e 53, correspondendo aos solos Luvisolo Crômico, Vertissolo Cromado e Neossolo Litólico, nesta ordem. Com isso, apenas alguns valores diferiram entre os tipos de solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa e análise das perdas de água

Na Figura 7 são apresentados os valores de precipitação mensal. Percebe-se que os meses de janeiro a maio possuem os valores mais altos de precipitação, e os menores valores ocorrem entre junho e dezembro, durante o período de 2004 a 2006. Analisando os dados de perdas de água do meso período na BESJC (Figura 8), observa-se que foram registrados 31 eventos chuvosos que geraram escoamento superficial, dos quais apenas oito eventos registraram valores acima da média, sendo apenas um considerado como evento extremo para a região (13.000 m³). O valor médio do escoamento superficial registrado para o período estudado foi de 1.280 m³. Resultados semelhantes para perdas de água em diferentes sistemas de manejo e cobertura do solo também foram constatados por Freitas et al. (2008) e Bezerra & Cantalice et al. (2009).

Como esperado, os dados demonstram que em grande parte do ano, a bacia apresenta uma tendência a pequenos eventos chuvosos e sua irregularidade espacial e temporal, entretanto, essa região é susceptível a eventos extremos de chuva, que podem acarretar grandes volumes de

perdas de água e provocar o aumento da erosão dos solos na região. Deve-se destacar ainda o importante papel que a cobertura vegetal do tipo Caatinga desempenha no controle das perdas de água por escoamento superficial na região semiárida no Nordeste do Brasil.

Analisando os dados obtidos de escoamento superficial e de sedimentos, apenas os eventos chuvosos com mais de 1,3 mm (760 m³) produziram perdas de água e solo. Isso mostra que apenas eventos com maior duração e intensidade são responsáveis pela geração de escoamento superficial e produção de sedimentos na região. De acordo com Silva e Santos (2009), as características físicas das chuvas determinam sua erosividade, o que constitui importante fator nas relações de causa e efeito do processo erosivo dos solos. Assim, as precipitações na região semiárida se caracterizam na maioria dos eventos de precipitação por concentrarem a maior quantidade de chuva em um pequeno intervalo de tempo, caracterizando desta forma, chuvas bastante erosivas do ponto de vista do impacto das gotas de chuva no solo (Silva et al., 2011).

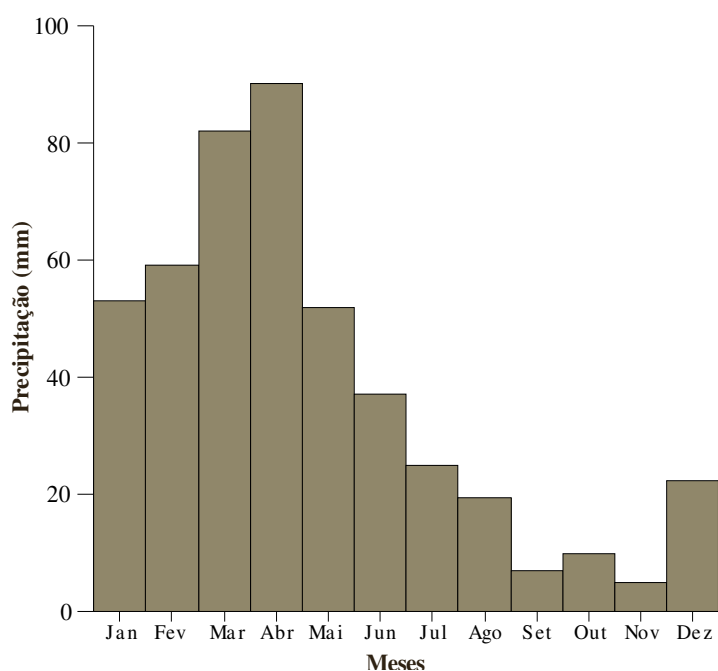


Figura 7. Distribuição da precipitação mensal média na BESJC.

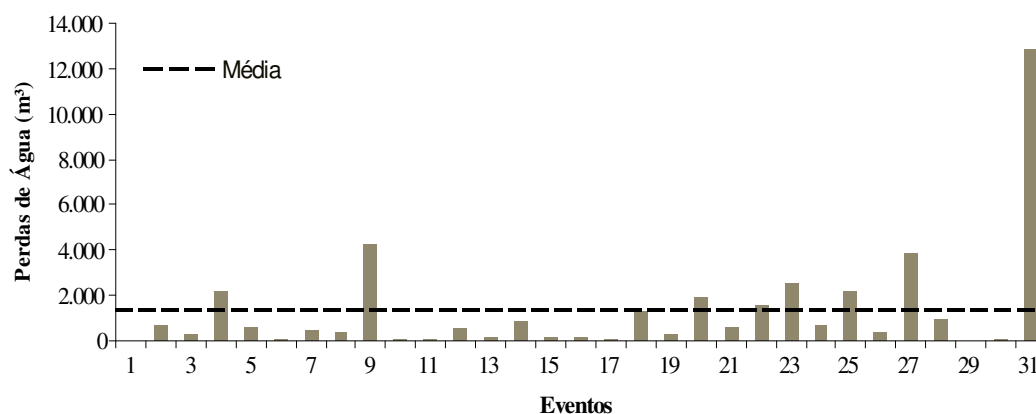


Figura 8. Análise da distribuição temporal das perdas de água na BESJC.

A Figura 9 mostra a comparação entre as perdas de água observadas e calculadas para a seção de monitoramento, no período entre 26/01/2004 a 31/12/2006. A relação entre as perdas de água observada e simulada apresenta uma coincidência entre a maioria dos eventos pequenos e extremos de escoamento superficial. Com relação ao ajuste entre as perdas de água observada e calculada, os valores médios obtidos foram muito próximos, sendo 0,04 m³/s para o observado e 0,05 m³/s para o calculado. Deve-se destacar também que os erros entre esses valores podem ser atribuídos a dificuldades de simulação desse modelo para pequenas bacias, e a irregular distribuição e escassez dos postos pluviométricos, mas, em termos gerais, a comparação entre as perdas de água tiveram um bom ajuste para as condições climáticas, geomorfológicas e de propriedades hidrodinâmicas dos solos da BESJC.

Estimativa e análise das perdas de solo

As Figuras 10a–10b apresentam as relações diretas entre os dados de precipitação, perdas de água e solo. Nota-se uma boa correlação para os dados obtidos, com $R^2 = 0,82$ entre precipitação e as perdas de solo, e $R^2 = 0,85$ entre as perdas de água e solo observadas para cada evento chuvoso na bacia. A produção de sedimentos média para cada evento observado foi de 18 kg. No que tange a influência das chuvas no processo erosivo, as precipitações na BESJC se caracterizam, na maioria dos eventos, por concentrarem a maior quantidade de chuva em um pequeno intervalo de tempo, caracterizando, desta forma, chuvas bastante erosivas (Cantalice et al., 2009).

A Figura 10b mostra um bom ajuste entre os valores de perdas de solo e água medidos diretamente, mesmo após ter havido uma grande faixa de variação, tanto do escoamento

como de sedimentos. Para Bezerra & Cantalice (2009), os processos de escoamento superficial e erosão em bacias típicas do semiárido sofrem influências pela presença do pavimento desértico, que é uma característica dos solos do tipo Vertissolos, constituídos de calhaus e matacões de quartzo, que servem como agente protetor, interceptando o impacto das gotas de

chuva sobre o solo. Devido ao transporte de sedimentos em bacias de regiões de clima árido e semiárido ser episódico, ocorrem mais comumente durante eventos extremos, assim, é essencial que eventos chuvosos pequenos e extremos sejam coletados, para uma melhor caracterização dos processos hidrossedimentológicos nas diversas coberturas do solo na bacia.

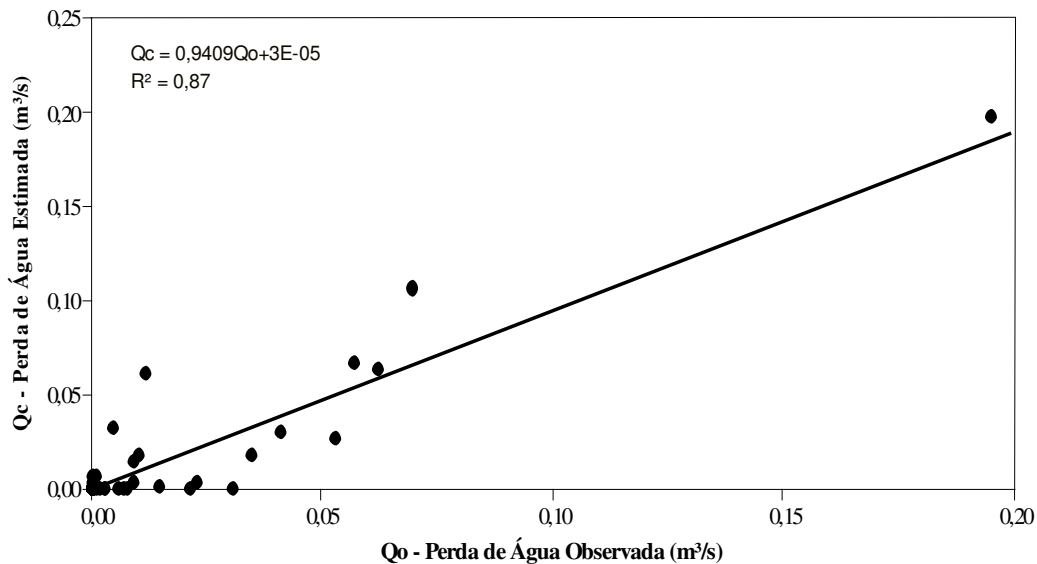


Figura 9. Relação entre as perdas de água observada e simulada para a BESJC.

Como a BESJC é em sua grande maioria preservada, exceto em pequenas áreas ocupadas com a caprinocultura e agricultura de subsistência, essa bacia não sofre com alterações drásticas no seu uso do solo. Mais especificamente, a sub-bacia 19 é mantida com vegetação arbustiva e a presença de pequenas manchas de vegetação arbustivo-arbórea, que influenciam diretamente os processos hidrossedimentológicos, uma vez que esses tipos de cobertura superficial interferem na

interceptação da água das chuvas pela vegetação e, conseqüentemente, há maior presença de água retida nas folhas e galhos da vegetação e, portanto, ocorre maior evapotranspiração. Assim, deve-se ressaltar o importante papel da cobertura vegetal no controle das perdas de água e sedimentos por escoamento superficial, principalmente quando se considera a irregularidade e a baixa precipitação pluvial da região semiárida no Nordeste do Brasil.

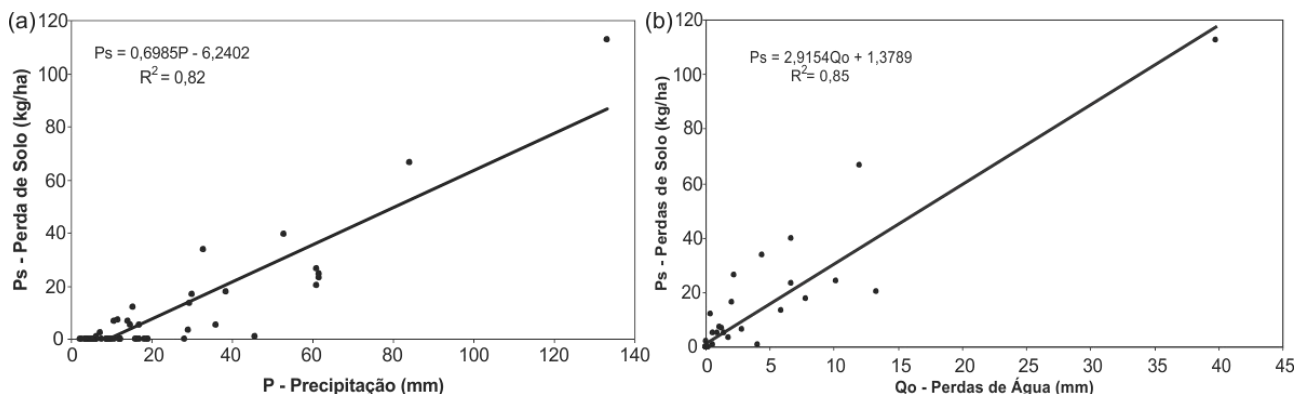


Figura 10. Correlação entre: (a) precipitação e as perdas de solo observadas, e (b) perdas de água e solo observadas na BESJC.

A Figura 11 mostra a comparação entre a produção de sedimentos diária observada e a calculada para a seção de monitoramento no mesmo período. Os resultados obtidos para a produção total de sedimentos foi de 430,44 kg para a calculada e 432,10 kg para a observada,

isto é, o modelo conseguiu representar satisfatoriamente a produção total de sedimentos no período estudado. A comparação diária entre as perdas de solo observada e a calculada é promissora, apresentando coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,66.

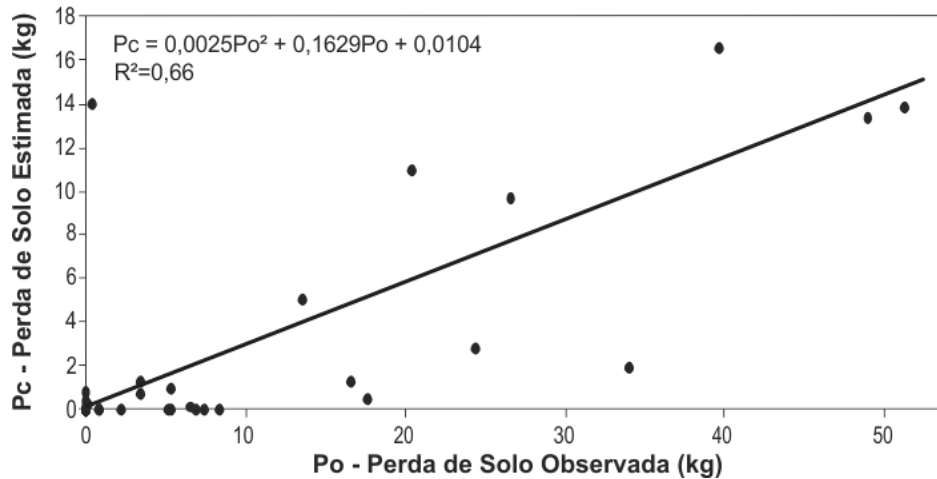


Figura 11. Relação entre a produção de sedimentos observada e a simulada para a BESJC.

Ao analisar graficamente os resultados da Figura 11, é possível identificar que os valores diários simulados seguem a tendência dos valores medidos, principalmente para a simulação das vazões. Considerando que os resultados estatísticos e gráficos apresentados se referem à execução inicial do modelo, foi considerado que o modelo apresentou boa aderência para os valores médios diários e tem grande potencial para ser usado em outras bacias da porção semiárida da Paraíba, e que dados de alta resolução espacial são importantes produtos para a modelagem hidrossedimentológica em bacias hidrográficas. Entretanto, percebe-se na relação entre a produção de sedimentos observada e calculada que os valores estão bem dispersos com relação à linha de tendência. Esse fato pode ser atribuído ao tamanho dos grãos de sedimentos da bacia e pelo fato da demora no tempo de umedecimento do solo, que influencia diretamente no transporte de sedimentos nos canais da bacia.

Após a calibração do modelo SWAT foi possível gerar a espacialização da distribuição

da produção de sedimentos na BESJC (Figura 12). Analisando o mapa gerado observa-se que as áreas que apresentaram maior produção de sedimentos foram as sub-bacias 21 e 25, ambas localizadas próximas ao exutório da BESJC, e recebem toda a produção de sedimentos de montante. As áreas que apresentaram os menores valores de produção de sedimentos se caracterizam pela presença de vegetação arbustiva e vegetação arbustivo-arbórea (sub-bacias 1, 2, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 19, 20 e 24), totalizando uma área de 4,5 km², o que representa 33% da área total da bacia. Os resultados sobre a influência da cobertura vegetal na proteção do solo contra a erosão comprovaram a importância da preservação da vegetação do tipo caatinga na proteção do solo, garantindo a interceptação das chuvas, redução da infiltração e do escoamento superficial (Silva et al., 2011). Vale destacar que as áreas onde ocorrem o plantio de Algaroba (sub-bacias 9 e 13), apresentaram uma quantidade de sedimentos variando entre 306 a 486 kg/ano, o que pode ser considerado uma bacia com produção de sedimentos média.

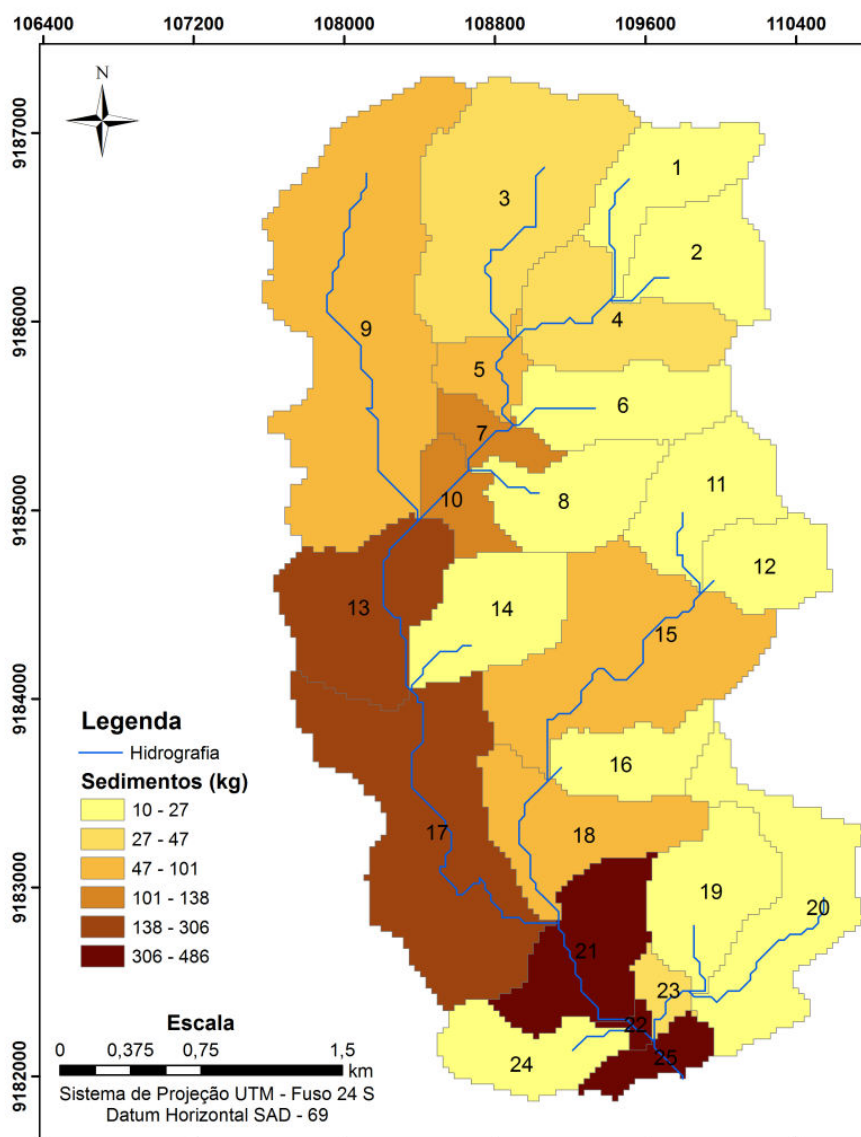


Figura 12. Espacialização da produção de sedimentos para cada sub-bacia da BESJC.

CONCLUSÕES

A aplicação do modelo SWAT para a avaliação do escoamento superficial mostrou-se satisfatória, visto que o resultado simulado aproximou-se do observado. Por outro lado, verifica-se uma discrepância na produção de sedimentos observada e a calculada, principalmente nos picos. Conclui-se também que, o uso de produtos cartográficos de alta resolução espacial como dados de entrada em modelos hidossedimentológicos acoplados a um SIG, são de extrema valia para uma melhor

representação do uso e ocupação do solo e da topografia de uma bacia hidrográfica e, conseqüentemente, para a modelagem dos processos de chuva-vazão-erosão.

Neste contexto, é primordial que estudos mais detalhados sobre os parâmetros físico-químicos dos solos possam ser utilizados na calibração do modelo. Conclui-se ainda que o método de calibração manual mostrou-se eficaz, apesar de ser um trabalho mais delicado e complexo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. (2005). Determinação de fatores da Equação Universal de Perda de

Solo nas condições de Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 180-188.
2. ALCOFORADO-FILHO, F. G.; SAMPAIO, E.V.S.B.; RODAL, M. J. N. (2003). Florística e fitossociologia

- de um remanescente de vegetação caducifólia espinhosa arbórea em Caruaru, Pernambuco. **Acta Botânica Brasilica**, v. 17, n. 2, p. 287-303.
3. BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. (2009). Influência da cobertura do solo nas perdas de água e desagregação do solo em entressulcos. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 18-28.
 4. BRAGA, A. C. F. M.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O.; NOBRE, P. (2013). Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: a case study of Pirapama Basin, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 498, n. 1, p. 46-58.
 5. CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; FIGUEIRA, S. B.; INÁCIO, E. S.; SILVA, M. D. (2009). Linhas isoerosivas do Estado de Pernambuco – 1ª aproximação. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 75-80.
 6. CARVALHO NETO, J. G. (2011). **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.
 7. CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; VASCONCELOS, A. C. F. (2002). **Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados**. Campina Grande: BNB/UFPA (Boletim Técnico), 54p.
 8. EZZ-ALDEEN, M.; AL-ANSARI, N. (2013). Application of SWAT model to estimate the sediment load from the left bank of Mosul Dam. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 3, n. 1, p. 47-61.
 9. FREITAS, F. J.; CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; SILVA, M. D. R. O.; SANTOS, P. M.; CORREA, R. M.; LIMA, P. A.; FIGUEIRA, S. B. (2008). Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1743-1751.
 10. GUERRA, A. J. T. (2006). Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 32-37.
 11. MEDEIROS, I. C.; XAVIER, A. P. C.; SILVA, A. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. (2013). **Simulação da produção de sedimentos utilizando dados de entrada de alta resolução espacial no modelo SWAT**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS, Anais.
 12. OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. (2009). Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 417-424.
 13. PAES-SILVA, A. P. (2002). **Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Namorado no Cariri paraibano**. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba.
 14. RAWLS, W. J.; SAXTON, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. **Journal of Irrigation and Drainage**, v. 25, n. 5, p. 1316-1320.
 15. SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. (2007). Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. **OKARA: Geografia em debate**, v. 1, n. 1, p. 16-32.
 16. SANTOS, L. L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R. (2012). Modelagem hidrossedimentológica no semi-árido paraibano utilizando o modelo WEPP e o efeito de escala sobre os seus parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 1, p. 53-63.
 17. SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. (2012). Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. **Natural Hazards**, v. 62, n. 6, p. 953-970.
 18. SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. (2013a). Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and Remote Sensing. **Revista Brasileira de Cartografia**, 65(2), 125-136.
 19. SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P. (2013b). Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, n. 8, p. 8977-8990.
 20. SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S. (2011). Perdas de água e sedimento em diferentes sistemas de manejo no semiárido da Paraíba, **Mercator**, v. 10, n. 21, p. 161-170.
 21. SILVA, R. M.; SANTOS, C.A.G. (2009). Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do nordeste, Brasil. **Perspectiva Geográfica**, v. 5, n. 2, p. 113-125.
 22. SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. (2011). **Delimitação automatizada e aplicação do modelo AVSWAT para a Bacia do Rio Mamuaba**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió-AL, Anais.
 23. SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. (2011). Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. **Science in China. Series E, Technological Sciences**, v. 52, p. 3348-3356.
 24. 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. 57-73.
 25. VALERIANO, M. M. (2005) **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o Projeto TOPODATA**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia-GO, INPE, Anais.
 26. VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. (2009) **Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal-RN, INPE, Anais.
 27. XAVIER, A. P. C.; SILVA, A. M.; MEDEIROS, I. C.; MARANHÃO, K. U. A.; SILVA, R. M. (2013). **Análise multitemporal e atualização do mapa de uso e ocupação do solo do município de Monteiro-PB**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu-PR, Anais.
 28. ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R. (2009). Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. **Land Degradation and Development**, v. 20, n. 1, p. 84-91.

*Manuscrito recebido em: 03 de Janeiro de 2014
Revisado e Aceito em: 30 de Junho de 2014*