

INVESTIGAÇÃO DE CENÁRIOS ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DO MODELO SWAT APLICADO A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DOS NAMORADOS NO CARIRI PARAIBANO

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

Resumo – A utilização de modelos hidrossedimentológicos para aquisição de informações pertinentes ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é fundamental. Modelos computacionais permitem a grande vantagem do estabelecimento de cenários, sejam realísticos ou não, que resultarão em diferentes respostas dos processos hidrológicos. O modelo hidrossedimentológico SWAT foi utilizado na simulação da bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados proporcionando a investigação de quatro diferentes cenários. Os cenários vislumbravam toda a área com a cobertura análoga a caatinga, algaroba, milho e solo exposto. Apresenta-se a simulação do quadro atual, com diversas coberturas do solo e a presença de quatro açudes. A simulação com o modelo SWAT ofereceu resultados coerentes nos processos de escoamento superficial e aporte de sedimentos, assegurando a sua eficiência e enaltecendo a importância do estudo de cenários nos processos decisórios.

Abstract – The use of hydrosedimentological models for the acquisition of relevant information for planning and management of water resources is of great practical value. Computational models permit the simulation of scenarios, that may be real or hypothetical, and generate responses of the hydrological processes. The hydrosedimentological model SWAT was used in the simulation of four different scenarios other than the one of actual use, in the “Riacho dos Namorados” watershed, located in the semi-arid region of Paraíba. The scenarios envisioned considering the entire basin area subject to different usages, namely, the native vegetation “Caatinga”, reforestation with “algaroba”(mesquite), cultivation of corn and bare soil. The results have been compared in terms of runoff generation and soil erosion among each other and with the actual situation in the basin of diverse soil uses and the presence of four storage dams. The simulation with the model SWAT provided consistent results in runoff and soil erosion, ensuring its utility for the simulation of scenarios to help in the decision making process.

Palavras-Chave – simulação hidrossedimentológica, investigação de cenários e SWAT (“*Soil and Water Assessment Tool*”)

INTRODUÇÃO

A utilização de modelos matemáticos capazes de representar os processos físicos de um sistema, gerando informações não comumente disponíveis, é de grande importância nos processos da tomada de decisão. Um sistema pode ser entendido como “qualquer engenho que responde, através de uma saída, a uma entrada” (Tucci, 2005). Diante disto, existem os modelos matemáticos capazes de simular os processos hidrossedimentológicos através da formulação de diversas equações que configuram o fluxo de água e dos sedimentos em um bacia hidrográfica.

¹ Mestrado pela UFCG no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, área de Recursos Hídricos, ze.ambiental@gmail.com

² Professor Visitante Nacional Sênior, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental Centro Acadêmico do Agreste da Universidade de 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, iana_alex@uol.com.br

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. Tais informações perpassam a estimativa de escoamento superficial ou a vazão líquida do canal principal, bem como o resultado do processo erosivo – visando o planejamento conservacionista (preventivo) para seu controle (James & Gurges, 1982). A simulação de diferentes cenários do uso e ocupação da terra torna possível o estudo da influência da cobertura do solo sobre os processos hidrossedimentológicos e verificar qual a melhor medida que possa ser tomada para um dado problema. Estudos destes tipos podem ser realizados de forma rápida e sem elevado custo, conquanto existam os dados básicos de entrada, tornando esta uma das principais vantagens do modelo enquanto ferramenta de trabalho na hidrologia (Machado, 2003).

A cobertura do solo possui grande influência nos processos hidrológicos (Tucci, 1997), de tal modo que o conhecimento sobre o efeito de sua variação sobre movimento da água e do transporte de sedimentos é fundamental no manejo de uma bacia hidrográfica (Kuhnle et al, 1996). O que se observa é que o escoamento superficial é atenuado pela vegetação (Tucci, 1997; Refosco, 1999; Srinivasan, 2003), que também promove uma maior proteção do solo contra a erosão. A proteção do solo contra erosão é reflexo do retardamento do fluxo superficial, devido a obstáculos como raízes e caules, e do aumento da infiltração de água no solo - facilitada pela vegetação (Srinivasan, 2003). Neste sentido, modelos hidrológicos que trabalham de forma integrada a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) facilitam o estabelecimento de cenários alternativos, para qualquer tempo, em uma determinada bacia – ainda com baixo custo e de forma rápida (Grigg, 1996). Esta integração permite também a visualização espacial da distribuição dos resultados dos processos hidrológicos.

A integração entre modelos hidrológicos e SIG é vista como um avanço irreversível (Ferraz, 1999), sendo possível encontrar na literatura trabalhos de revisão que datam no início da década de 90 (DeVantier, 1993). Dentre os diversos modelos hidrossedimentológicos, o SWAT destaca-se com amplo uso no mundo (Gassman, 2007), e mesmo no Brasil (Neto, 2011), devido a sua integração eficiente com o SIG.

Neste contexto, o presente trabalho visa analisar o escoamento superficial e a produção de sedimentos para diferentes cenários de cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados, no sertão paraibano, com o modelo SWAT, identificando os aspectos mais significativos entre os cenários. Os cenários definidos tratam de situações alternativas possíveis de manejo, de toda área da bacia com vegetação nativa, reflorestada com uma espécie exótica, com o avanço na monocultura e total desmatamento.

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 considerando as características espaciais da bacia hidrográfica, de modo que seus resultados podem ser visualizados utilizando a ferramenta SIG (Neitsch, 2005).

Através do uso do Método de Curva Número (CN), 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 feita utilizando a 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.

Os dados de entrada para o modelo são mapas que tratem do tipo de solo, a cobertura do solo e a topografia do terreno. Um modelo digital de elevação (MDE) é o meio pelo qual a topografia do terreno é fornecido ao modelo. Este dado é de grande importância em todos os aspectos da simulação. Assim, a maior parte dos dados de entrada podem ser adquiridos diretamente por sensoriamento remoto, o que representa um grande avanço na modelagem hidrológica das grandes bacias.

É utilizada 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 condições homogêneas da combinação de cobertura e tipo de solo obedecendo ainda um intervalo de classe de declividade adotado pelo usuário, na qual o modelo SWAT promove a simulação dos processos na bacia.

Área de estudo e aplicação do modelo

A bacia do Riacho dos Namorados (BRN) possui uma área de cerca de 13,5 km², entre os quais 3,3 km² correspondem a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) operada pelas universidades federais da Paraíba e de Campina Grande. A BRN apresenta clima semi-árido, com chuvas concentradas em um quadrimestre, solos rasos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação de caatinga, relevo ondulado (Paiva, 2008) e altitude entre 480 a 540 m (Paes-Silva, 2002). Foi caracterizada como representativa da região de Cariri Paraibano e possui diversas unidades experimentais (Srinivasan et al, 2004). A figura 1 ilustra a área da BRN e as sub-bacias experimentais.

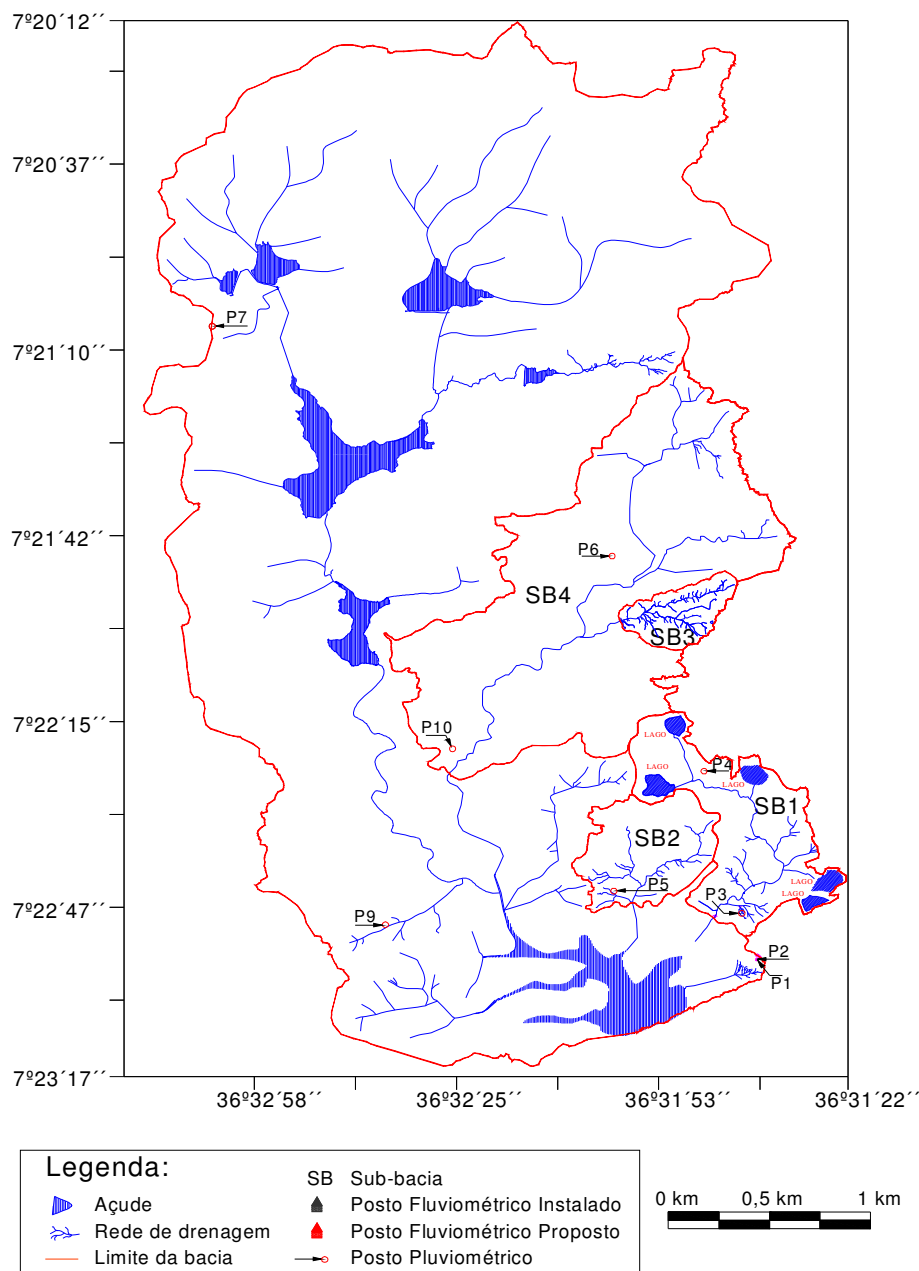


Figura 1 Localização e delimitação das Sub-Bacias 1 e 2 inseridas na BESJC

O solo na área da bacia é raso e o subsolo é derivado do embasamento cristalino (Chaves, 2002). Dentre as manchas de solos encontradas na área da bacia poderão ser citados as seguintes: Luvissole Crômico Vértico - TC (Bruno Não-Cálcico Vértico), o Vertissolo Cromado Órtico - VC (Vertisol) e o Neossolo Lítico - RL (Solo Litólico), ocorrendo em 55,6, 22,4 e 7,9% da área, respectivamente. Ocupando áreas menores, ocorrem os Cambissolo Háplico - CX (Cambisol), Neossolo Flúvico - RU (Solo Aluvial), Planossolo Háplico - SX (Planosol Solódico) e Afloramentos de rocha associados a Neossolo Lítico. Para a simulação, a mancha de Neossolo Flúvico foi associada ao Neossolo Lítico, enquanto que área do Planossolo Háplico foi aglutinada junto ao Luvissole Crômico Vértico.

O banco de dados do modelo requer informações quanto as características físico-hídricas do solo, tais quais textura, número de camadas e suas respectivas profundidades, capacidade de campo, condutividade hidráulica e o fator de erodibilidade. Uma única média de dados de textura do solo coletados em campo foi atribuída para o Luvissole e o Vertissolo. Enquanto que as texturas referentes ao Cambissolo

e ao Neossolo foram extraídos do Levantamento Exploratório de Solos do Estado da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972). A quantidade de água disponível foi estimada segundo Salter e Williams (1967/1969), enquanto que a condutividade hidráulica foi atribuída o valor adotado por Santos (2008). O fator de erodibilidade do solo foi calculado em função da textura, conforme método de Williams (1995)

A topografia do terreno foi representada pelo MDE originado pelo satélite Terra, através de seu sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), com resolução de 30 metros. Machado (2002) indica que o trabalho em pequenas bacias deve trabalhar com MDE com resolução entre 10 a 30 metros, de modo que, estima-se, a resolução de 10 metros é mais apropriada para a modelagem em questão.

Os cenários considerados além do uso atual do solo na bacia, tratam de quatro situações distintas tratando de toda a área da BRN:

- Cenário 1: cobertura vegetal sendo da caatinga, simulando uma situação sem ações antrópicas;
- Cenário 2: situação na qual haja o reflorestamento total da área com algaroba (*Prosopis juliflora*);
- Cenário 3: o avanço da monocultura de milho sobre toda a área da BRN, e
- Cenário 4: quadro de total desmatamento, com o solo exposto.

Pela inexistência da vegetação caatinga e a algaroba no banco de dados da interface ArcSWAT, considerou-se como equivalentes a "*range brush*" e a "*honey mesquite*" respectivamente. Isto foi realizado uma vez que diversos os parâmetros são necessário para caracterizar uma cultura, de tal modo que realizar uma pesquisa detalhada para destes levaria bastante tempo e, pode ser considerado, como um trabalho a parte. A "*range brush*" trata de uma vegetação nativa do estado do Texas, nos Estados Unidos, bastante semelhante a caatinga. Por outro lado, "*honey mesquite*" trata da espécie "*Prosopis glandulosa*", inserida no mesmo gênero da algaroba. Assim, realizou-se a parametrização das variáveis que mais influenciam nos processos de escoamento superficial e erosão de sedimentos, apontadas no trabalho de Lenhart (2002), ajustando seus valores para maior verossimilhança com a vegetação local.

Lenhart (2002) verificou através de uma análise de sensibilidade, utilizando o modelo SWAT, os parâmetros referentes ao banco de dados dos vegetais o índice de área foliar (BLAI), altura da copa (CHTMX) e profundidade da raiz (SOL_ZMX) como sendo bastante influentes no escoamento superficial e no aporte de sedimentos. Com isto, buscou-se definir tais parâmetros na analogia realizada. As raízes das espécies foram estipuladas para a profundidade da última camada do solo. Neto (2009) indicou o índice de área foliar média da catingueira como sendo de 3,5 m²/m². A altura máxima que esta espécie pode chegar é de 6 m. Por outro lado, o índice de área foliar para a algaroba foi encontrado no trabalho de Fleming (2003) com o valor de 1,04 m²/m². A altura máxima atribuída para esta espécie foi de 12 m.

Para o cultivo de milho foram utilizados diretamente os valores já encontrados no banco de dados. A simulação com solo exposto foi realizado através do recurso já oferecido pela interface, que possibilita editar práticas de manejo da cultura e no presente caso, executou-se esta alternativa no caso de milho.

O modelo SWAT considera que há três caminhos possíveis quando a água percola através da última camada do solo: recarregar o aquífero raso ou o 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 do solo (Neitsch, 2005).

Os dados de precipitação, evapotranspiração potencial, lâmina escoada e produção de sedimentos foram coletados durante a execução de diversos projetos como IBESA (Srinivasan et al., 2004) e BEER – Bacias Experimentais e Representativas (www.hidro.ufcg.edu.br/beerufcg) desenvolvidos na BESJC. Dados climáticos obtidas na estação climatológica foram fornecidos ao gerador climático WXGEN (Sharpley & Williams, 1990) visando a geração de dados diários para a simulação.

O modelo SWAT necessita de um período de aquecimento inicial para estabilizar as condições na bacia para simulação. Em alguns trabalhos foi adotado a prática de duplicação dos três primeiros anos de simulação e assim, visando o aquecimento do modelo nos primeiros três anos (Peterson, 1998; White, 2005; Olivera, 2006; Cibir, 2010). O mesmo procedimento foi adotado nas simulações deste trabalho. No período de dados disponíveis, entre 1988 a 2006, seus três primeiros anos foram sequencialmente duplicados e os resultados obtidos nos primeiros três anos descartados nos cálculos das médias. O período de aquecimento do modelo visa estabilizar as condições iniciais da umidade do solo.

No processo de delimitação da bacia foi definida a área de contribuição mínima para formação do canal em 10 ha. E para uma melhor definição das URH, foram utilizados cinco intervalos de declividade: de 0 a 4%, de 4% a 6%, de 6% a 8%, de 8% a 12% e acima de 12%. A presença dos açudes na BRN foi considerada na simulação pelo uso atual do solo. Maiores detalhes sobre a alimentação de dados para o modelo SWAT podem ser encontradas na dissertação de Carvalho Neto (2011).

Pelo exposto, o presente trabalho consistiu na execução do modelo, simulando todo o período disponível de dados climáticos para a situação atual e os quatro diferentes cenários já mencionados. A geração dos resultados com valores médios para todo o período pode desvirtuar a análise de alguns anos atípicos. Por este motivo, assim selecionaram-se dois anos específicos, o de 1994 e de 2004, visando

vislumbrar um ano típico e outro atípico, respectivamente, pelo registro pluviométrico do período. A análise dos resultados buscou identificar as diferenças entre os cenários na geração do escoamento superficial e produção de sedimentos, através de mapas temáticos e tabelas comparativas para verificar de maneira qualitativa e quantitativa a influência do uso e manejo do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo dos resultados de simulações com o uso atual e os 4 cenários está apresentada na Tabela 1. A coluna de título “uso atual” trata do quadro real da bacia, que conta com a existência de várias coberturas do solo e de quatro açudes. A influência dos açudes reside principalmente como obstáculo para o fluxo do escoamento superficial e transporte de sedimentos, de tal modo que a carga de sedimentos que alcança o exutório é bem inferior aos demais cenários. A área do espelho d’água promove uma redução na geração do escoamento superficial e erosão do solo, haja vista que parte da precipitação incide diretamente sobre o reservatório, que promove a evaporação na taxa potencial o ano todo.

O cenário 2, de reflorestamento com algaroba, apresenta a situação da maior proteção contra erosão do solo, enquanto que o cultivo do milho, o cenário 3, é apenas melhor do que o solo exposto. Desde já, este resultado é bastante interessante, pois a conservação da vegetação nativa em toda a bacia (cenário 1) não resultou efetivamente como a melhor alternativa da conservação do solo. Em consonância temos a geração de escoamento superficial consistente com a cobertura do solo em que o cenário 4 apresentou a maior geração, seguido dos cenários 3, 1 e 2. Os valores médios anuais da geração de escoamento superficial, da erosão de sedimentos e da produção de sedimentos (que alcança o exutório da bacia) apresentados na tabela 1.

Tabela 1 Valores das médias anuais dos resultados da simulação entre o período de 1988 a 2006

Média Anual	Uso atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Escoamento Superficial (mm)	32,69	33,17	31,49	52,39	58,86
Erosão de Sedimentos (ton/ha)	5,482	5,966	3,167	10,183	18,889
Produção de Sedimentos (ton)	32,86	45,18	42,44	76,3	82,44

Os resultados expostos na tabela 1 evidenciam que o cenário 1 promoveu uma perda de solo de aproximadamente o dobro frente ao cenário 2. Esta proporção não se encontra na geração do escoamento superficial, cuja diferença nos resultados é bastante sutil (de cerca de 5%). Enquanto que a carga de sedimentos apresenta uma redução de 6% na média anual do cenário 1 para o 2, de tal modo que, ao longo de todo o período, 54 toneladas de sedimentos a mais alcançariam o exutório pelo cenário 1.

No que diz respeito aos cenários 3 e 4 a fragilidade do solo, propensa a erosão, é marcante. O cultivo de milho em muito pouco promove proteção contra a perda de solo. Isto é evidenciado por uma comparação direta com a “*range brush*”, do cenário 1. Como era de se esperar, o cenário 4, de solo exposto, promoveu uma intensa taxa de perda do solo. A geração de escoamento superficial no cenário 3 sendo apenas 11 % inferior do que no cenário 4, enfatiza a baixa influência desta cobertura vegetal sobre o processo de geração do escoamento superficial. Entretanto, o processo da erosão do solo demonstrou grande sensibilidade com o uso do solo nos diferentes cenários.

Tais diferenças nestes processos, de geração de escoamento superficial e produção de sedimentos, são uma reflexão dos valores dos parâmetros Curva Número e o Fator de Cobertura do Solo (Fator C – da EUPS-M) – obtidos no banco de dados para as culturas. O parâmetro CN busca agregar informações quanto às características físicas do solo e da sua cobertura, e seu valor entre 1 e 100 é determinado diariamente pelo modelo SWAT (considerando as condições de umidade antecedentes). O limite inferior representa um solo totalmente permeável, e o limite superior, um solo totalmente impermeável (Neitsch, 2005). Por outro lado, a EUPS-M trata da influência direta de seis fatores: fator do escoamento superficial, da susceptibilidade à erosão do solo, das condições topográficas da área, da proteção do solo estimada pela sua cobertura, da existência de práticas de manejo de culturas e que considera a existência de afloramentos rochosos. Sendo assim, o que se observa é que quatro destes fatores são comuns entre os cenários, e diferenças ocorrem com a geração de escoamento superficial e no fator de cobertura do solo (Fator C). O Fator C varia de zero, para um solo totalmente protegido, a 1, para um solo desprotegido.

A proximidade da geração de escoamento superficial entre os cenários 1 e 2 se dá, principalmente, pelo valor de CN de 77 para ambos. Há ainda outros parâmetros de menor influência na geração do escoamento superficial, pois tratam do suprimento de água para a planta a partir do crescimento vegetal ou mesmo da perda de água por transpiração. Por outro lado, o Fator C para “*honey mesquite*”, correspondendo a algaroba, é de 0,001 enquanto que a “*range brush*” é de 0,003, o que corresponde a

caatinga. Esta superioridade da cobertura proporcionada pela algaroba é o que proporcionou a melhor proteção do solo no cenário 2 em comparação com o cenário 1. Este resultado porém, não deve ser visto como uma justificativa para promover o reflorestamento do semi-árido com a algaroba, pois além da preservação do solo contra erosão, outros fatores ambientais e sócio-econômicos devem ser levado em conta na adoção das práticas do manejo do uso do solo em bacias hidrográficas.

Para o cultivo de milho, CN e o Fator C, têm valores de 83 e 0,2, respectivamente. O que significa uma maior propensão a geração do escoamento superficial bem como a superfície de um solo menos protegido. Devido a esta combinação, a erosão do solo foi intensa no cenário 3, sendo apenas inferior ao cenário no qual o solo estava totalmente exposto. O cenário 4, utilizando diretamente como uma opção no cenário 3, serve para ilustrar as conseqüências serias da perda de solo devido ao desmatamento da vegetação nativa na referida bacia.

A carga de sedimentos que alcança o exutório depende do escoamento superficial, pois este é a única fonte de alimentação da calha fluvial. Sendo assim, os cenários que promovem maiores escoamentos superficiais, irão, em via de regra, promover uma maior carga de sedimentos transportados..

Os anos de 1994 e 2004 diferenciam-se entre si pela distribuição da chuva, pois o total precipitado anual foi bastante próximo – em torno de 500 mm. Contudo o ano de 1994 tem a precipitação bem distribuída ao longo de vários meses, enquanto o ano 2004 apresenta 84% de sua precipitação concentrada nos meses de Janeiro e Fevereiro. Diante disto foi realizada uma simulação destes dois anos individualmente para uma análise comparativa. A tabela 2 apresenta os resultados das médias anuais dos resultados dos processos de escoamento e erosão do solo.

Tabela 2 Valores das médias anuais dos resultados da simulação para os anos de 1994 e 2004

Média Anual	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	1994	2004	1994	2004	1994	2004	1994	2004
Escoamento Superficial (mm)	17,01	93,94	15,92	84,95	30,71	133,63	34,01	144,03
Erosão de Sedimentos (ton/ha)	3,135	19,481	2,132	11,061	6,113	29,787	8,748	36,476
Produção de Sedimentos (ton)	23,28	111,48	23,52	96,12	35,04	179,64	43,8	216,0

Ao se comparar em um mesmo cenário para os dois anos simulados, verifica-se, na tabela 2, que o clima semi-árido bem representado pelo ano de 2004, com a concentração da precipitação em um curto espaço de tempo, promove uma maior erosão do solo. Esta é uma constatação bastante alarmante, pois se trata da característica da região. Tratando da comparação entre cenários, percebe-se o ano de 1994 representando uma boa distribuição da precipitação anual durante vários meses, apresenta uma diminuição significativa de tanto do escoamento superficial, quanto a erosão do solo. Enquanto a menor erosão do solo é bem vinda, a diminuição do escoamento pode agravar ainda mais os problemas com o escassez de água no semi-árido no período de estiagem. Contudo, constata-se no ano de 2004 que os resultados apresentam uma maior disparidade. Estes resultados servem como indicativo da importância da seleção do período bem representativo para simulação e como conclusões equivocadas podem resultar com simulações de curtos períodos não representando condições médias de longo prazo. Observa-se que no período de 1988 a 2006, seis anos apresentaram a precipitação total anual inferior a 300 mm.

A integração com o SIG favorece a confecção de mapas temáticos. Tais mapas servem de apoio para visualização da distribuição espacial dos efeitos das práticas adotadas na bacia. As figuras 2 e 3 apresentam a distribuição espacial dentro da bacia da erosão do solo nos meses de janeiro e março de 2004 respectivamente.

A figura 2 apresenta um quadro de maior perda do solo em janeiro de 2004 comparado com a de março de 2004 na figura 3. Pela figura 2 percebe-se que em quatro sub-bacias bem definidas houve perda de solo entre 12,1 a 16 ton/ha no cenário 1, enquanto o máximo de perda no cenário 2, em apenas duas sub-bacias, foi de entre 8,1 e 12 ton/ha. Os cenários 3 e 4 confirmam os resultados alarmantes, com diversas sub-bacias apresentando perdas de solo superior a 16,1 ton/ha. Por outro lado, na figura 3, a baixa precipitação resultou em processos erosivos significativos apenas nos cenários 3 e 4, com os cenários 1 e 2 apresentando erosão do solo inferior a 2 ton/ha. Com estas visualizações dos resultados, é possível identificar logo as sub-bacias mais suscetíveis aos processos de erosão e, assim, buscar as medidas corretivas necessárias. Verificou-se que as quatro sub-bacias que possuem a maior susceptibilidade a perda de solo (Figura 3 D) apresentam declividades altas, superior a 12%, em mais de 30% de sua área, bem como da presença do Neossolo – solo que apresentou o maior Fator de Erodibilidade entre os existentes na área. Em suma, a Tabela 3 apresenta a espessura média da superfície do solo perdido no período entre 1988 a 2006.

Tabela 3 Perda de solo por erosão nos diferentes cenários no período de 1988 a 2006

Cenário	Perda de Solo (mm)
1	0,362
2	0,192
3	0,617
4	1,145

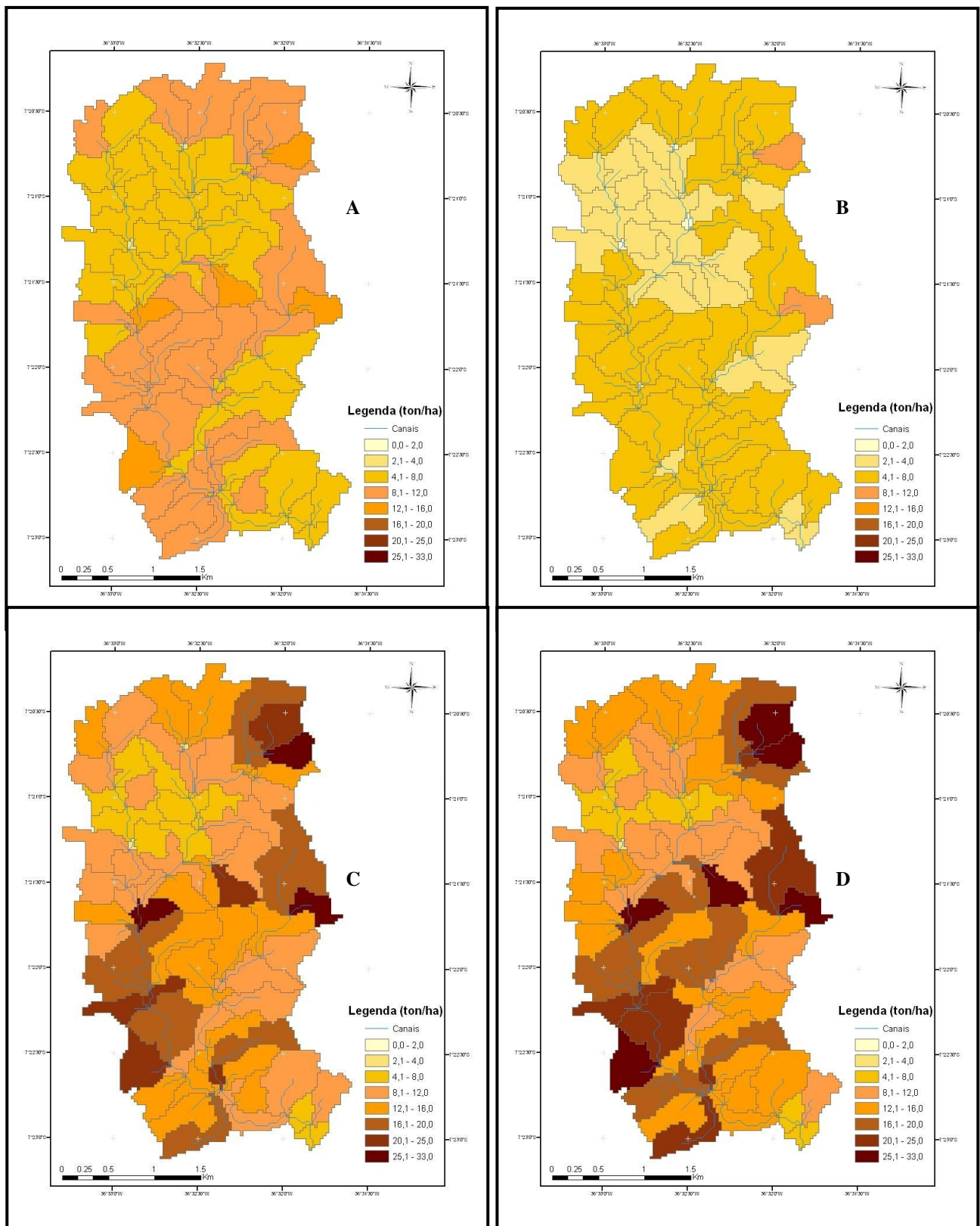


Figura 2 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004, com precipitação acumulada de 273 mm, no cenário 1 (A), no cenário 2 (B), no cenário 3 (C) e no cenário 4 (D).

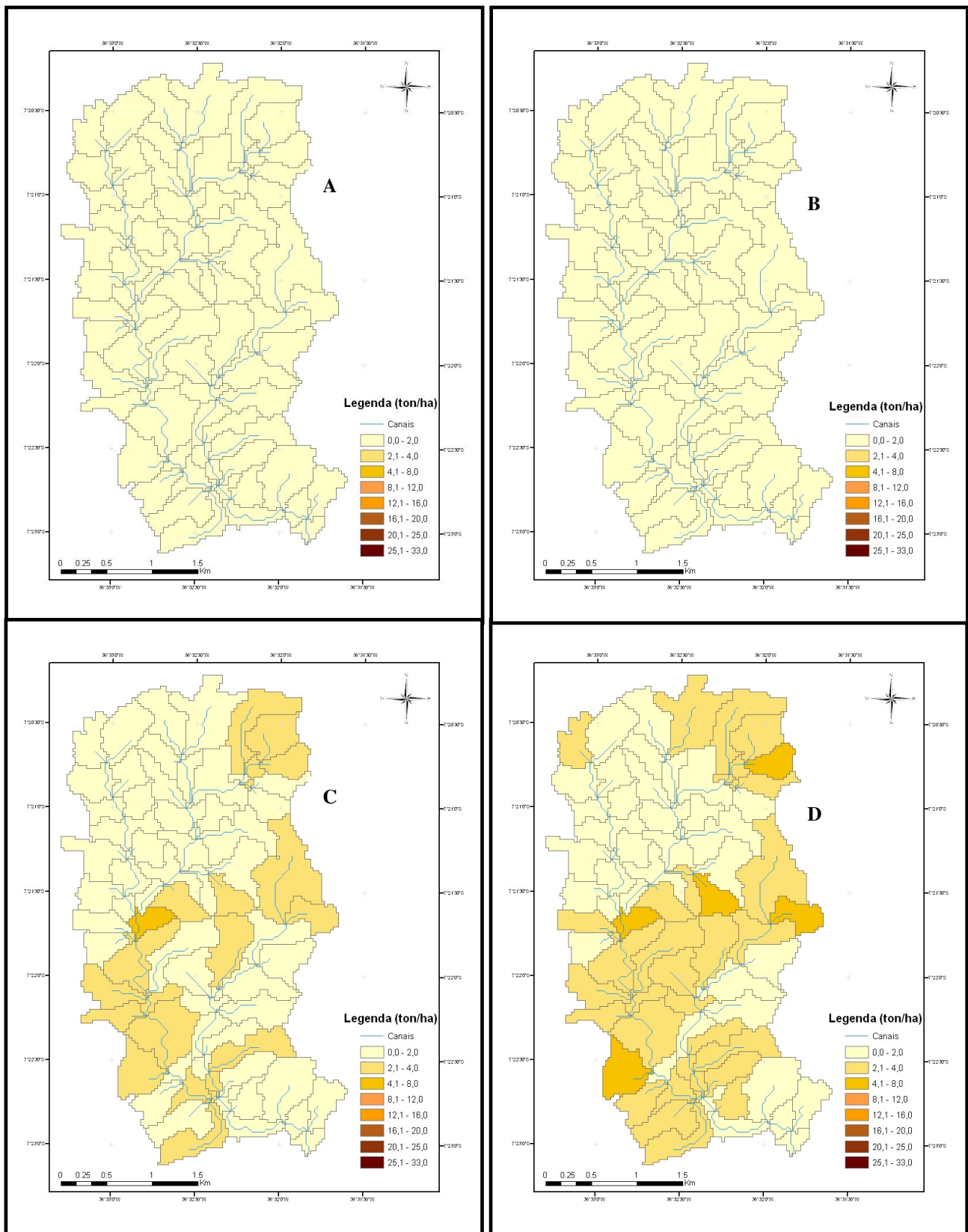


Figura 3 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004, com precipitação acumulada de 71 mm, no cenário 1 (A), no cenário 2 (B), no cenário 3 (C) e no cenário 4 (D).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo com o modelo SWAT levam às seguintes conclusões.:

1. A integração entre a ferramenta SIG e o modelo SWAT promove uma maior versatilidade na modelagem hidrológica das bacias hidrográficas;
2. A simulação dos cenários permite uma avaliação objetiva das conseqüências dos processos hidrossedimentológicos,, tornando possível a constatação da influência da cobertura vegetal, o tipo do solo e as práticas do manejo na geração do escoamento superficial e produção de sedimentos;
3. Foi verificado, através das simulações, que o reflorestamento com algaroba proporcionaria um maior grau de conservação do solo, superando inclusive a vegetação nativa -caatinga. Por outro lado, o cultivo do milho apresentou uma elevada degradação do solo, sendo melhor do que apenas o solo totalmente exposto, e
4. Os mapas gerados da saída dos resultados, pelo sistema, das simulações permite uma melhor visualização global e da distribuição espacial dos resultados. Assim, se torna possível identificar áreas com grandes riscos de erosão e tomar as medidas preventivas necessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGNOLD, R. A. (1977). Bedload transport in natural rivers. *Water Resources*, v13, 0 303 – 312.
- 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. BNB/UFPB. 114 p.
- 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.
- DEVANTIER, Bruce A., FELDMAN, Arlen D. (1993). Review of GIS Application in Hydrologic Modelling. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Volume 119, Nº 2.
- DHAR, Sujana; MAZUMDAR, Asis (2009). Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. *Hydrological Processes*, vol 23, 2394 – 2406 pp.
- FLEMING, P. M. et all (2003). Transpiração em Plantas de Algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) Dc.) Cultivadas no Semi-Árido Nordeste. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 8, nº 4, 25-30 pp.
- 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*. Vol. 50(4): 1211-1250.
- GRIGG, N.S. *Water resources management: principles, regulations, and cases*. New York, McGraw-Hill Book, 1996. 540p.
- JAMES, L.D. & GURGES, S.J. (1982). Selection, calibration and testing of hydrologic models. In: HAAN, C.T., ed. *Hydrologic modeling of small watersheds*. St. Joseph, ASAE, p.437-472.
- KLEMES, V (1986). Operational testing of hydrological simulation. *Hydrological Sciences*. Vol. 31, 13-24 pp.
- KUHNLE, R.A.; BINGER, R.L.; FOSTER, G.R. & GRISSINGER, E.H. (1996) Effect of land use changes on sediment transport. *Water Res. Res.*, vol. 32, 3189-3196 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.
- MACHADO, R. E (2002). Simulação de Escoamento e Produção de Sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 166p.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1972). Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro; Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (MA), 670p.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2005) *Soild And Water Assessment Tool – Theoretical Documentation*. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 494p.

- NETO, A. G. S. (2009). Avaliação da Área Foliar de Cinco Espécies Florestais Ocorrentes no Semi-Árido Paraibano. Monografia (graduação). Universidade Federal de Campina Grande. 37p.
- NETO, J.G. de C. (2011). Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o Modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, PB. 217p
- 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.
- PAIVA, F. M. de L. (2008). Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Micro-bacias na Região Semi-Árida Paraibana. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos, 208p.
- 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.
- REFOSCO, J. C.; PINHEIRO, A. (1999). Impacto do deflorestamento sobre o regime hídrico de uma bacia hidrográfica. Revista de Estudos Ambientais. Vol. 1, nº 2.
- 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.
- 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. Vol. 8, nº 2, pp 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. (2005) Modelos Hidrológicos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 678 p.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1997). Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 2, nº 1, 135-152pp.
- 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.