

APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO NA BACIA DO RIO TAPACURÁ, ESTADO DE PERNAMBUCO

José Yure Gomes dos Santos^{1}; José Guimarães de Carvalho Neto²; Richarde Marques da Silva³; Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁴; Celso Augusto Guimarães Santos⁵*

Resumo – Esse estudo apresenta a aplicação do modelo SWAT para análise do escoamento superficial da Bacia do Rio Tapacurá, para o período de 1997 a 2004. Essa aplicação do SWAT buscou analisar a distribuição do escoamento superficial mediante a calibração da vazão calculada com a observada. A delimitação automatizada de sub-bacias da Bacia do Rio Tapacurá foi realizada pelo modelo SWAT mediante imagem interpolada do SRTM. Os mapas de tipos de solo e uso e ocupação do solo, obtidos a partir de estudos anteriores realizados na bacia, foram associados aos solos e usos do solo existentes no banco de dados do modelo SWAT. Também foram utilizados dados observados de precipitação de quatro postos pluviométricos, uma estação fluviométrica e uma climatológica. Os resultados obtidos apresentaram uma excelente calibração da vazão, com um coeficiente de determinação igual a 0,9. A espacialização dos resultados apresentou maiores valores de escoamento superficial nas sub-bacias que possuem uma maior concentração da precipitação e na sub-bacia 8, que apresenta uma forte impermeabilização do solo. As áreas que apresentaram um menor escoamento superficial estão localizadas nas sub-bacias que apresentam uma menor concentração de chuvas e na sub-bacia 3, que apresenta cobertura de pastagem e mata.

Palavras-Chave – bacia representativa; modelo SWAT; escoamento superficial.

APPLICATION OF THE SWAT MODEL FOR RAINFALL-RUNOFF SIMULATION IN TAPACURÁ RIVER BASIN, PERNAMBUCO STATE

Abstract – This study presents the application of the SWAT model to analyze the surface runoff in the Tapacurá River basin for the period 1997-2004. This SWAT application sought to analyze the surface runoff distribution by fitting the observed and calculated runoff. The sub-basin automatic delineation of the Tapacurá River basin was done using the SWAT model with the SRTM interpolated image. The maps of soil types, and land use and occupation, obtained from previous studies, were associated with the soils and land uses existing in the SWAT model database. Observed rainfall data, from four rainfall gauges, one flow gauge and one climatologic station, were also used. The results showed an excellent runoff calibration, with a determination coefficient equal to 0.9. The result spatial distribution showed high runoff values in the sub-basins with high concentration of precipitation and in the sub-basin #8, which shows a strong soil sealing. The areas that had low surface runoff are located in the sub-basins that have a low concentration of rainfall and in the sub-basin #3, which presents grassland and forest cover.

Keywords – representative basin; SWAT model; surface runoff.

¹ Bolsista FACEPE e Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, Recife-PE. E-mail: joseyure@hotmail.com

² Bolsista CNPq e Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, Recife-PE. E-mail: ze.ambiental@gmail.com

³ Professor Adjunto do Departamento de Geociências – UFPB, João Pessoa-PB. E-mail: richarde@geociencias.ufpb.br

⁴ Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil – UFPE, Recife-PE. E-mail: suzanam@ufpe.br

⁵ Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UFPB, João Pessoa-PB. E-mail: celso@ct.ufpb.br

*Autor Correspondente

INTRODUÇÃO

A estimativa de variáveis representativas de processos hidrológicos é de fundamental importância para um eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, e o crescente interesse em estudos de impactos ambientais, causados pelas atividades humanas, fez com que pesquisadores estudassem novas ferramentas para simular mudanças no uso do solo e seus impactos nos recursos hídricos. Neste sentido, a utilização de modelos matemáticos busca prever de maneira mais realista a transformação da precipitação em escoamento superficial e evapotranspiração. Um modelo hidrológico apresenta a grande vantagem de possibilitar a análise de cenários, sejam realistas ou hipotéticos, sem alto custo e tornando possível o estudo das diferentes respostas dos processos hidrológicos diante de cada condição.

Modelos hidrológicos distribuídos apresentam a capacidade de auxiliar no entendimento de peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, e, tais observações são expressas nos dados de entrada e saída. Esta é uma característica bastante importante, uma vez que, quando o “onde” é a questão, o geoprocessamento tende a oferecer a resposta. A integração entre modelos hidrológicos e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) é observada como algo irreversível (Ferraz *et al.*, 1999), sendo possível encontrar na literatura trabalhos de revisão que datam no início da década de 90 (De Vantier e Feldman, 1993). Esta integração permite a visualização espacial da distribuição dos resultados dos processos hidrológicos, ou seja, a produção de mapas temáticos referente a um determinado processo hidrológico.

Atualmente, existem diversos modelos que tratam dos processos físicos em bacias e que possuem interface com o SIG. Geralmente esses modelos exigem grande volume de informações sobre parâmetros físicos da bacia e dos solos, cujos arquivos podem ser criados com o auxílio de técnicas de SIG. Dentre os modelos hidrológicos distribuídos, que são executados em ambiente SIG, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) destaca-se pela robustez, capacidade de análise e correlação de diferentes elementos físicos de uma bacia hidrográfica.

O modelo SWAT tem sido estudado e difundido mundialmente, com resultados satisfatórios (Gassman *et al.*, 2007; Carvalho Neto, 2011; Silva *et al.*, 2013), e diante da consistência dos resultados, este modelo foi utilizado neste trabalho para analisar o escoamento superficial da Bacia do Rio Tapacurá, para o período de 1997 a 2004. Essa é uma aplicação inicial do modelo SWAT para essa bacia, que buscou analisar a distribuição do escoamento superficial mediante a calibração da vazão calculada com a observada.

Estudos hidrológicos desse tipo, em especial para a Bacia do Rio Tapacurá, bacia representativa integrante da Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), são de suma importância para a gestão dos recursos hídricos da porção litorânea do Estado do Pernambuco, pois essa bacia é uma das responsáveis pelo abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife, uma das maiores concentrações populacionais do país, com aproximadamente 3,7 milhões de habitantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Representativa do Rio Tapacurá, que possui uma área de 472 km² e esta localizada em uma zona de transição entre o Agreste e a Zona da Mata do Estado de Pernambuco, entre as coordenadas 7°58'0" e 8°13'0" de latitude sul e 35°5'0" e 35°30'0" de longitude oeste (Figura 1).

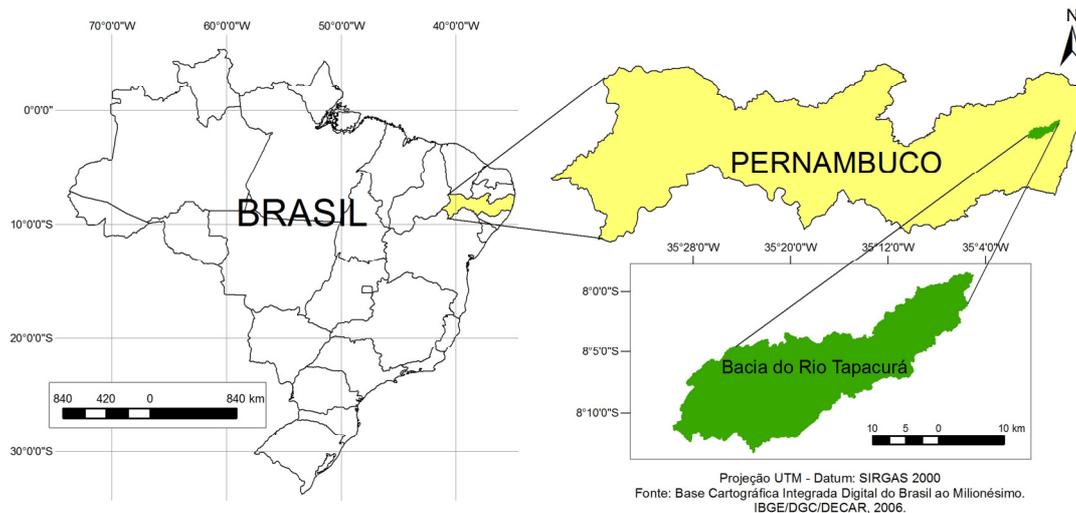


Figura 1 – Localização geográfica da Bacia do Rio Tapacurá.

O clima da região é do tipo As', clima quente e úmido do tipo tropical, na classificação climática de Köppen. A temperatura mensal média oscila entre 23 e 27°C, enquanto a umidade relativa do ar, durante os meses de março a julho, é superior a 70%. A bacia se estende de Oeste, no começo da região agreste, com precipitação anual de 800 mm, até a zona da mata, a Leste, com valores de precipitação anual até 1.650 mm (Silva *et al.*, 2010).

O Modelo SWAT

O SWAT é um modelo hidrológico, contínuo no tempo, distribuído e integrado ao SIG, que foi desenvolvido com o objetivo de prever os efeitos de diferentes usos do solo e cenários de ocupação, para o escoamento superficial, qualidade de água, produção de sedimentos e carga poluente em bacias hidrográficas (Arnold *et al.*, 2012). A bacia é dividida em unidades de resposta hidrológica (URH), com base no tipo de solo, uso e ocupação do solo e declividade. O modelo SWAT prevê a hidrologia em cada URH usando a equação do balanço hídrico, que inclui precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e componentes de retorno de fluxo (Betrie *et al.*, 2011).

Para a modelagem, o SWAT divide a bacia em sub-bacias e gera a rede de drenagem com base nas características topográficas do terreno. Cada sub-bacia é parametrizada usando uma série de URH, as quais correspondem a uma única combinação de cobertura da terra, classes de solo e declividade dentro da sub-bacia. Uma ou mais combinações de uso da terra, classes de solo e declividade podem ser criadas para cada sub-bacia.

A versão do modelo SWAT utilizada neste trabalho foi o ArcSWAT 2012.10_1.6 de 11/02/2013.

A delimitação automatizada de sub-bacias da Bacia do Rio Tapacurá foi realizada pelo modelo SWAT mediante imagem interpolada do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Os mapas de tipos de solo e uso e ocupação do solo foram obtidos a partir de estudos anteriores realizados na bacia (Braga, 2001; Montenegro e Ragab, 2012). Os tipos de solos existentes na bacia foram associados aos solos do banco de dados do modelo SWAT. A Tabela 1 apresenta os tipos e classe de solos existentes na bacia, de acordo com a nova classificação de solos proposta pela EMBRAPA (2006).

Tabela 1 – Tipos e classes de solo existentes na bacia e sua associação com o SWAT

Tipos de solos	Classe dos solos	Solos no SWAT	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo	Argissolos	Argissolo	323,85	68,64
Gleissolo	Gleissolos	Vertissolo	44,06	9,34
Latossolo vermelho	Latossolos	Latossolo vermelho-amarelo	3,74	0,79
Luvissolo crômico	Luvissolos	Luvissolo crômico	6,29	1,33
Neossolo flúvico	Neossolos	Neossolo flúvico	20,46	4,34
Neossolo litólico	Neossolos	Neossolo litólico	43,04	9,12
Neossolo regolítico	Neossolos	Neossolo regolítico	5,1	1,06
Planossolo	Planossolo	Planossolo Solodico	25,38	5,38

Assim como nos tipos de solo, os usos do solo existentes na bacia foram associados a usos do solo correspondentes existentes no banco de dados do modelo SWAT. A Tabela 2 apresenta o uso e ocupação do solo e sua distribuição na bacia e a Figura 2 apresenta a espacialização dos usos do solo na área da bacia.

Tabela 2 – Uso e ocupação do solo existente na bacia e sua associação com o SWAT

Uso e ocupação do solo	Usos do solo no SWAT	Área (km ²)	Área (%)
Água	Water	10,74	2,28
Área Urbana	Residential - Medium Density	10,51	2,23
Caatinga	Range-Brush	5,22	1,11
Cana-de-açúcar	Sugarcane	52,50	11,13
Capoeira	Forest-Mixed	4,99	1,06
Mata e reflorestamento	Forest-Evergreen	21,17	4,49
Outras agriculturas	Agricultural Land - Generic	181,90	38,54
Pecuária e granjas avícolas	Pasture	184,81	39,16

* Outras agriculturas compreendem produções de horticulturas e policulturas, cultivadas na maioria dos casos em pequenas propriedades agrícolas.

Dados observados de precipitação de quatro postos pluviométricos, uma estação fluviométrica e uma climatológica também foram utilizados (Figura 2).

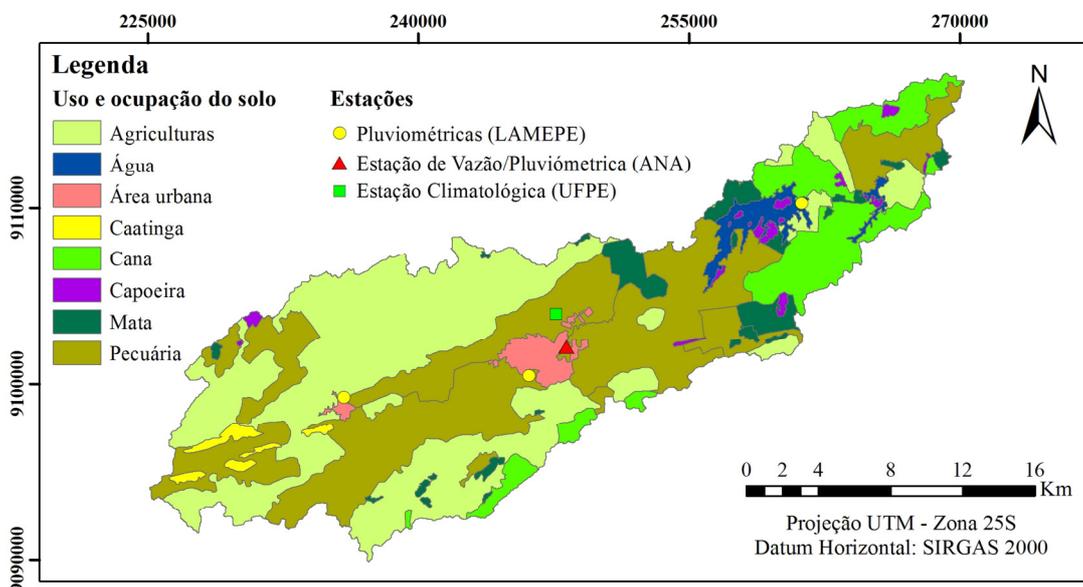


Figura 2 – Uso do solo da Bacia do Rio Tapacurá e localização das estações utilizadas.

Os dados climáticos da estação da UFPE foram utilizados para alimentar o gerador climático (WXGEN) do modelo SWAT. Mais detalhes sobre o gerador climático do SWAT e seus parâmetros podem ser consultados em Carvalho Neto (2011).

O posto fluviométrico utilizado como referência para a calibração do modelo está localizado na parte central da bacia, no Rio Tapacurá, à montante do Reservatório de Tapacurá, sendo de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) (Figura 2).

A calibração do modelo foi realizada com frequência de saída mensal. O período analisado no estudo foi de 1994 a 2004. Os três primeiros anos (1994–1996) serviram para o aquecimento do modelo e o período de 1997 a 2004 para a calibração.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados de entrada, descritos anteriormente, o modelo SWAT foi utilizado inicialmente para a simulação da vazão, sem nenhuma alteração de parâmetros. A partir desta simulação, iniciou-se a fase de calibração, em que alguns parâmetros foram modificados, de forma manual, para melhor ajustar a vazão calculada com a observada. A Tabela 3 apresenta os parâmetros que influenciaram na calibração do escoamento superficial na bacia. Esses parâmetros foram ajustados para que o volume escoado calculado ficasse mais próximo do observado e seus respectivos valores. A análise de sensibilidade foi realizada de forma manual a partir do ajuste do hidrograma e do coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 3 – Parâmetros modificados na calibração manual

Parâmetro do SWAT	Valor inicial	Valor ajustado
ALPHA_BF	0,048	0,3
GWQMN	0	2,5
GW_REVAP	0,02	0,2
REVAPMN	1	0
RCHRG_DP	0,05	0,2
SURLAG	4	1,0
CH_N(1)	0,014	0,028
ESCO	0,95	0,75

A Figura 3 apresenta o resultado gráfico entre o escoamento calculado e o observado, para o período de 1997 a 2004. Como no modelo SWAT não é possível controlar as variáveis de entrada para a análise de sensibilidade, sendo estas em número de 27, definidas por *default* pelo modelo (Green e Griensven, 2008), observa-se que na simulação inicial, o modelo estava superestimando a vazão. Após a fase de calibração houve um ajuste considerável da vazão calculada pelo modelo e a vazão observada.

A Figura 4 apresenta o resultado da correlação da vazão simulada e observada, na fase de simulação e após a calibração. A calibração do modelo SWAT para a vazão da Bacia do Rio Tapacurá apresentou um excelente resultado, com $R^2 = 0,9$. Este excelente resultado é compatível aos encontrados por Montenegro e Ragab (2012), que realizaram simulações com o modelo hidroecológico DiCaSM, para a Bacia do Rio Tapacurá.

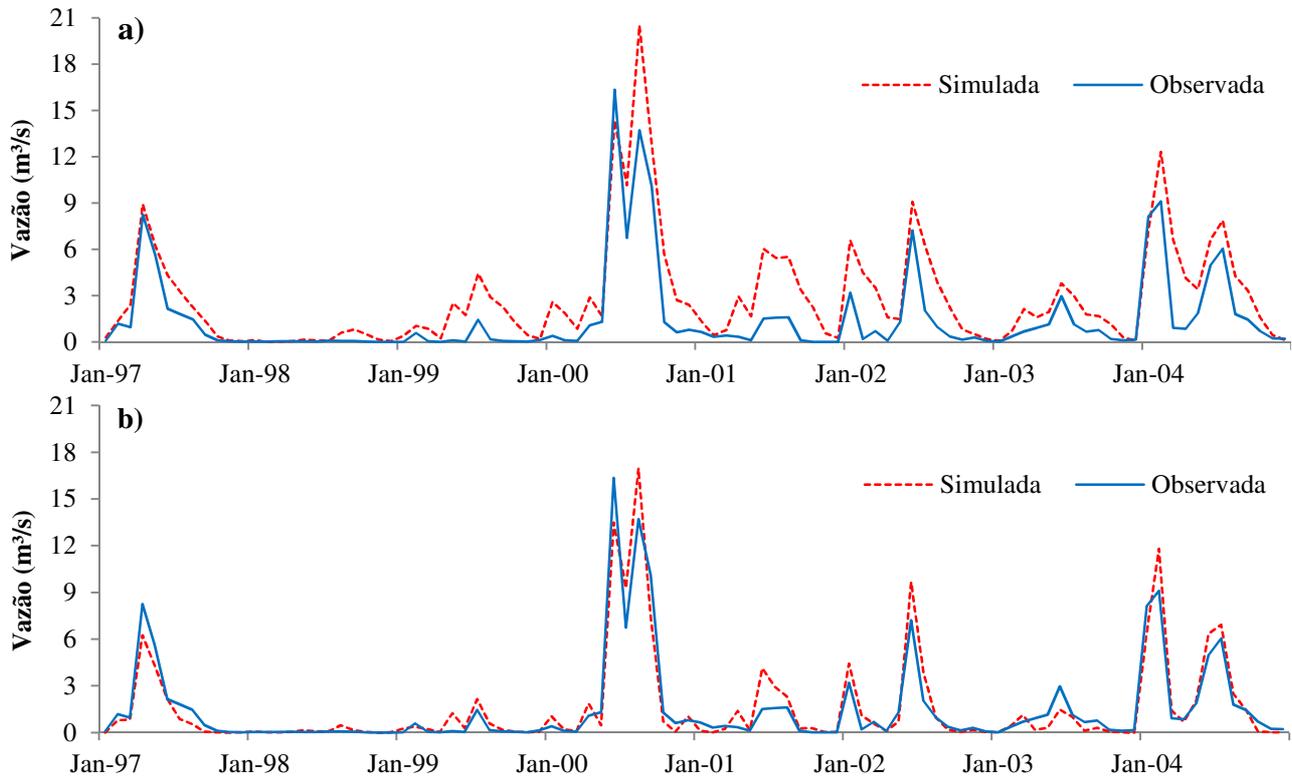


Figura 3 – Resultado da simulação e calibração da vazão: (a) simulação; e (b) calibração.

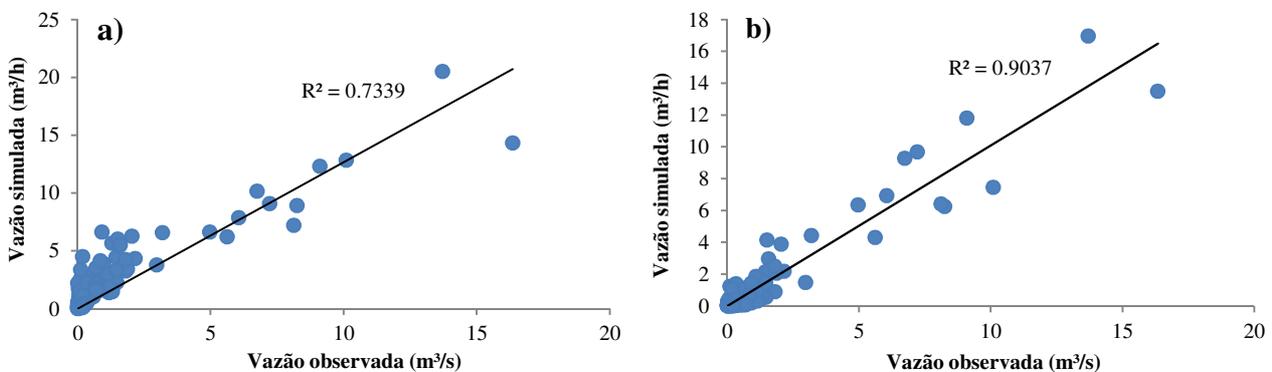


Figura 4 – Comparação entre a vazão observada e calculada: (a) simulação; e (b) calibração.

A Figura 5 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial na Bacia do Rio Tapacurá, para o período de 1997 a 2004. Nota-se que os maiores valores de escoamento superficial estão localizados na porção leste da bacia (sub-bacias 1, 2 e 4) e na sub-bacia 8. A porção leste da bacia apresentou valores de escoamento superficial que variaram de 174 a 218 mm. Essa porção da bacia se caracteriza pela presença de plantios de cana-de-açúcar e outros tipos de cultivos, além de atividades de pecuária. Outro fator importante é que essa porção da bacia recebe maior quantidade de precipitação quando comparado com a porção oeste, conforme estudo de Silva *et al.* (2010). A sub-bacia 8 apresentou os maiores valores de escoamento superficial de toda a bacia no período estudado, com valores variando de 219 a 258 mm. Isso pode ser explicado por essa sub-bacia ser composta em grande parte pela área urbana do Município de Vitória de Santo Antão, que possui um elevado grau de impermeabilização do solo, devido ao fato das construções e pavimentações urbanas.

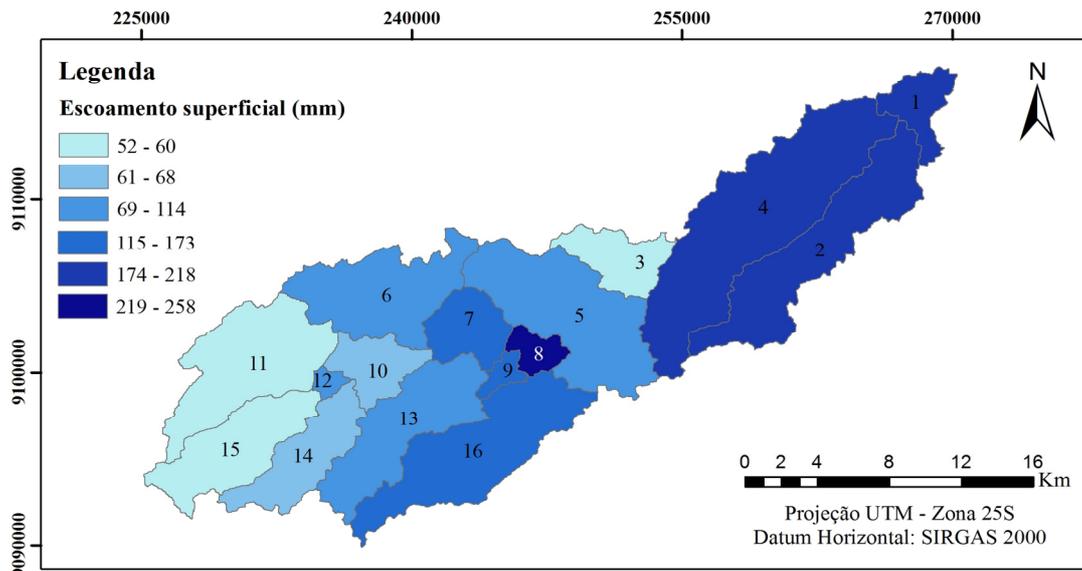


Figura 5 – Distribuição do escoamento superficial médio na Bacia do Rio Tapacurá para o período de 1997 a 2004.

As sub-bacias que apresentaram um menor escoamento superficial variaram de 52 a 60 mm. Essas áreas estão localizadas na porção oeste da bacia (sub-bacias 11 e 15), com exceção da sub-bacia 3. A porção oeste é a que apresenta uma menor concentração de chuvas na bacia (Silva et al., 2010), e se caracteriza pela presença de áreas de pastagem, diferentes tipos de cultivos e pequenas áreas de vegetação de caatinga. Já a sub-bacia 3 apresenta significativa área de pastagem e mata, que não favoreceram a geração de escoamento superficial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo apresenta a aplicação do modelo SWAT para a Bacia do Rio Tapacurá, localizada no Estado de Pernambuco. Os resultados obtidos apresentaram uma excelente calibração da vazão, com um coeficiente de determinação igual a 0,9, mostrando que esse modelo é uma ferramenta valiosa para a simulação chuva-vazão e, conseqüentemente, para o gerenciamento dos recursos hídricos dessa uma bacia.

A espacialização dos seus resultados apresentou maiores valores de escoamento superficial nas sub-bacias que possuem uma maior concentração da precipitação e na sub-bacia 8, que apresenta uma forte impermeabilização do solo pelas construções urbanas. As áreas que apresentaram um menor escoamento superficial estão localizadas nas sub-bacias que apresentam uma menor concentração de chuvas e na sub-bacia 3, que apresenta cobertura de pastagem e mata.

Outros estudos que visem à validação do modelo para a Bacia do Rio Tapacurá e a análise de outras variáveis, como a produção de sedimentos para a bacia, serão realizados posteriormente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FACEPE pela bolsa de Doutorado do primeiro autor, ao CNPq pela bolsa DTI-B do segundo autor e as bolsas de produtividade em pesquisa do quarto e quinto autor. Agradecem também a FINEP (convênio 1830/2010) pelo financiamento ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D.; GRIENSVEN, A.; LIEW, M.W.VAN; KANNAN, N.; JHA, M.K. (2012). Swat: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 55(4), pp. 1491-1508.
- BETRIE, G.D.; MOHAMED, Y.A.; GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. (2011). Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, pp. 807–818.
- BRAGA, R.A.P. (2001). *Gestão Ambiental da Bacia do Rio Tapacurá – Plano de ação*. Ed. Universitária – UFPE, Recife – PE, 101 p.
- CARVALHO NETO, J.G. (2011). *Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 194 p.
- DE VANTIER, B.A.; FELDMAN, A.D. (1993). Review of GIS applications in Hydrologic Modelling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119 (2), pp. 246-261.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Agropecuária (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- FERRAZ, F.F.B; MILDE, L.D.E; MORTATI, J. (1999). Modelos hidrológicos acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um estudo de caso. *Revista de Ciência & Tecnologia*, Piracicaba, v14, pp. 45-56.
- GASSMAN, P.W.; REYES, M.R.; GREEN, C.H.; ARNOLD, J.G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v. 50(4): pp. 1211-1250.
- GREEN, C.H.; GRIENSVEN, A. (2008). Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. *Environ. Model. Software*, 23:422-434.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. (2012). Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: a case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 434-435, p. 55-68.
- SILVA, R.M.; SILVA, L.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G. (2010). Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. *Sociedade & Natureza*, v. 22, pp. 357-372.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, V.C.L.; SILVA, L.P. (2013). Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff–erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. *Environment Monitoring and Assessment*, v. 185, pp. 953-970.