

SIMULAÇÃO DAS MUDANÇAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS NAS CARACTERÍSTICAS HIDROSSEDIMENTOLÓGICAS EM UMA BACIA DO BIOMA CAATINGA

Richarde Marques da Silva¹, Irla Gabriele Nunes Henrique², Jorge Flávio Cazé³

¹Doutor em Geografia, Bolsista de Produtividade do CNPq, Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, UFPB. richarde@geociencias.ufpb.br;

²Estudante de Graduação em Geografia, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq, Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, UFPB. irlageo10@gmail.com;

³Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPB. Centro de Ciências Exatas e da Natureza, UFPB. jorgekzbra@gmail.com

Artigo recebido em 29/12/2016 e aceito em 09/01/2018

RESUMO

Este trabalho aplicou o modelo *Soiland WaterAssessment Tool*(SWAT) para analisar a influência das mudanças do uso do solo no escoamento superficial e na produção de sedimentos, em uma bacia hidrográfica do bioma caatinga no Nordeste do Brasil. Este estudo consistiu em:(a) mapeamento do uso do solo para 1984 e 2015, (b) calibração do escoamento superficial; e (c) simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos a partir do cenário de uso do solo no ano de 2015. O modelo SWAT foi calibrado usando dados diários de precipitação e escoamento superficial de 1977 a 1978. Os dados de precipitação também foram utilizados na simulação dos processos hidrossedimentológicos para o cenário de 2015. Os resultados indicam um bom ajuste na calibração, com valor de Nash-Sutcliffe = 0,85 e $R^2 = 0,89$. Para o escoamento superficial, o valor médio observado foi de 0,360 m³/s (com uso do solo de 1984), e 0,854 m³/s para 2015. Para a produção de sedimentos, o valor estimado para o período de calibração foi de 0,34ton/ha.ano, e para 2015 foi de 1,34ton/ha.ano. Esses resultados mostram que mudanças futuras podem ter um significativo impacto no escoamento superficial e na produção de sedimentos.

Palavras-chave: Modelagem Hidrossedimentológica, modelo SWAT, Bacia Representativa de Sumé.

**SIMULATION OF LAND USE/LAND COVER CHANGE AND ITS EFFECTS
ON THE RUNOFF-EROSION CHARACTERISTICS IN THE CATCHMENT OF
CAATINGA BIOME**

ABSTRACT

This paper applied the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to analyze the influence of land use and cover changes on surface runoff and sediment yield in a catchment of the Caatingabiome, located in Northeastern of Brazil. This study consisted of: (a) land use mapping for 1984 and 2015, (b) surface runoff calibration; and (c) simulation of surface runoff and sediment yield using land use scenario for year 2015. SWAT model was calibrated using daily precipitation and surface runoff data for the period from 1977 to 1978. The precipitation data of this period were also used in the simulation of the runoff-erosion processes for the year 2015. The results indicated a good adjustment in the model calibration (Nash-Sutcliffe = 0.85 and $R^2 = 0.89$). For surface runoff, the observed mean value was 0.360 m³/s (1984 land use scenario), while surfacerunoff for 2015 was 0.854 m³/s. For sediment yield, the estimated value for the calibration period was 0.34 ton/ha.year, while the estimate based on land use in 2015 was 1.34 ton/ha.year. These results demonstrate that future changes in land use/cover change may have significant impacts on surface runoff and sediment yield prediction results.

Keywords: runoff-erosion modelling, SWAT model, SuméRepresentative Basin.

INTRODUÇÃO

O escoamento superficial episódico é o principal componente do ciclo hidrológico responsável pela desagregação e o transporte de sedimentos, sobretudo em regiões de clima semiárido. Existem várias regiões semiáridas no planeta, entretanto, nenhuma destas possui a pluviosidade, a extensão e a densidade populacional do semiárido do nordeste brasileiro (SANTOS et al.,2007). Essas características potencializam a problemática das mudanças no uso do solo nessa área. Assim, a fim de analisar e quantificar os processos hidrossedimentológicos, diversos modelos matemáticos vêm sendo aplicados com a finalidade de representar os processos de chuva-vazão-erosão e demais fenômenos do ciclo hidrológico em diversas escalas: parcelas, microbacias (MEDEIROS e SILVA, 2014) e em bacias hidrográficas médias e grandes (SILVA et al., 2013; SILVA e MEDEIROS, 2014).

Um desses modelos hidrossedimentológicos é o SWAT, que foi utilizado para se estudar a influência do uso do solo nos processos hidrossedimentológicos. Esse modelo oferece ferramentas para prever o efeito das ações de uso, manejo e perdas do solo, produção de nutrientes e uso de pesticidas, sobre os recursos hídricos. Podendo ser aplicado na representação da distribuição espacial do uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade, além de possuir diversidade de parâmetros responsáveis pelo controle dos processos do ciclo hidrológico, o que o torna um dos modelos mais utilizados no mundo (SILVA et al., 2016). Esse modelo vem sendo aplicado em diversos estudos no semiárido, mas geralmente em escala mensal (DANTAS et al., 2015; ARAGÃO et al., 2013; TAVEIRA et al., 2012). Neste estudo foi analisada a modelagem com o SWAT em escala diária.

A vegetação típica no semiárido é do tipo savana estépica, conhecida no Brasil como caatinga (CUNHA et al., 2015). Essa formação vegetal apresenta estrato arbustivo dominante e alguns indivíduos arbóreos esparsos, além de concentração de cactáceas (SOUZA et al., 2004). Este domínio natural é portador de uma singularidade marcante no contexto climático e hidrológico, dando origem a plantas extremamente adaptadas às condições climáticas rigorosas da região. (AB'SÁBER, 2003) O bioma Caatinga apresenta como características marcantes, a irregularidade pluviométrica e a existências de duas estações bem definidas, a estação chuvosa (inverno) e a estação seca (verão) (SRINIVASAN e PAIVA, 2009).

No entanto, atualmente, as taxas de erosão e sedimentação no semiárido têm sido muito alteradas no decorrer dos anos, como consequência das atividades econômicas tradicionais na região, que favorecem a produção de sedimento de granulometria grosseira que são depositados na calha fluvial (MENEZES et al., 2007).

Para se estudar processos hidrossedimentológicos em tais condições, diversas bacias representativas foram criadas a fim de permitir o monitoramento desses processos (SILVA et al., 2008). Dentre essas bacias está a BRS, localizada no Cariri Paraibano e segundo Cadier e Freitas (1982) a região estudada está localizada em uma depressão pluviométrica, devido estar localizada a Oeste do maciço da Borborema causando um efeito natural de bloqueio das massas de ar úmida que vem do Oceano Atlântico, fazendo com que a chuva média anual do Cariri paraibano seja inferior a 400 mm e na bacia seja entre 550 mm e 600 mm por estar localizada no limite ocidental dessa depressão. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a influência do uso e ocupação do solo no escoamento superficial e na produção de sedimentos na Bacia Representativa de Sumé (BRS).

Localização e caracterização da área de estudo

A BRS possui uma área de aproximadamente 160 km², e está localizada no Estado da Paraíba entre as coordenadas 7° 40' e 7° 51' de Latitude Sul e 36° 54' e 37° 30' de Longitude Oeste (Figura 1). Essa bacia possui precipitação média anual de 550 mm, com altitudes variando de 500 a 700 m, e embasamento predominantemente cristalino (SRINIVASAN e GALVÃO, 2003). Segundo a classificação de Koppen-Gaiger, essa bacia possui clima do tipo semiárido (BSh), devido a insuficiência das precipitações, das altas temperaturas e elevada evaporação (ALVARES et al., 2015). A BRS foi escolhida por ser bastante representativa quanto às características do semiárido brasileiro e por possuir um enorme acervo de dados hidrossedimentológicos.

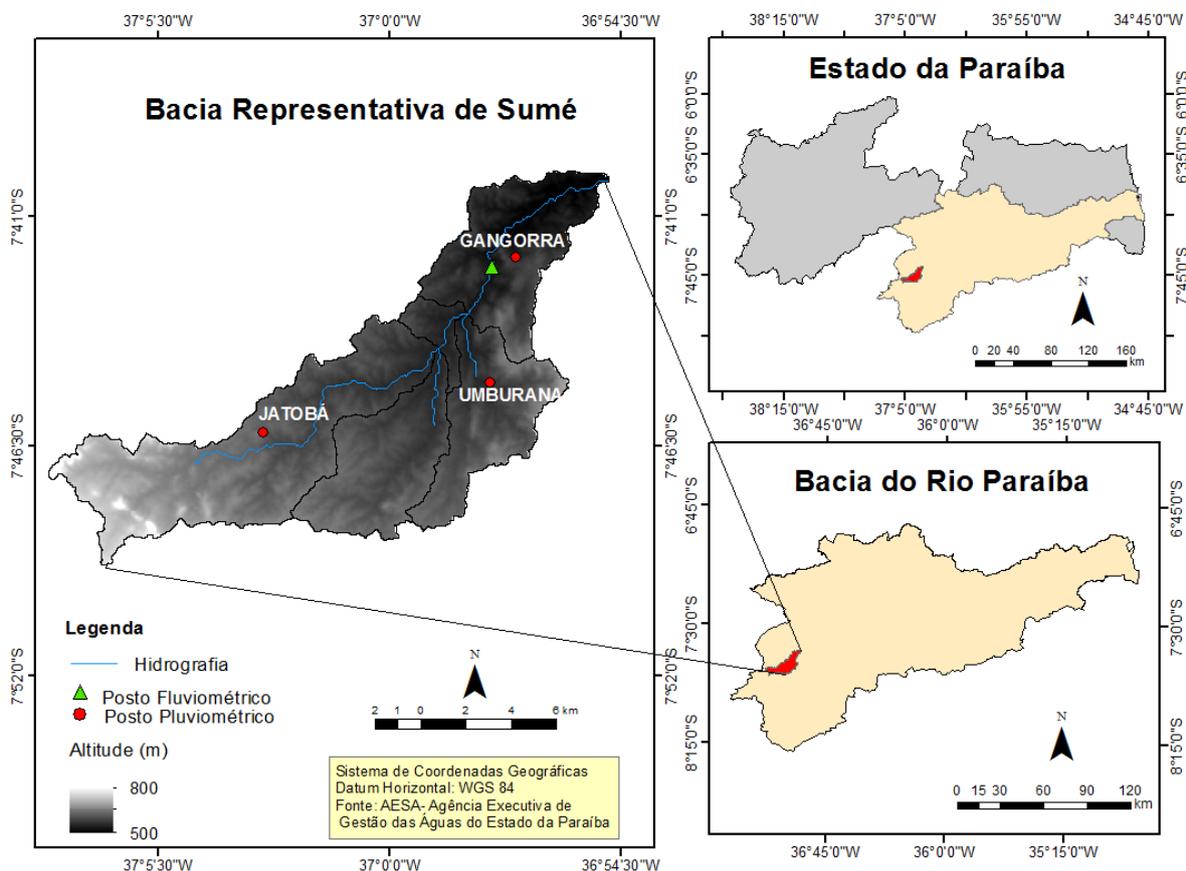


Figura 1 – Localização da Bacia Representativa de Sumé (BRS) no Estado da Paraíba.

Fonte: Os autores.

Breve descrição do modelo SWAT e dados de entrada

O *Soiland Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido nos EUA por Arnold e Allen (1996). O SWAT é um modelo de base física que simula cenários do uso e manejo do solo no ciclo hidrológico, o escoamento superficial e a produção de sedimentos, em diferentes escalas de bacias hidrográficas. O modelo divide a bacia hidrográfica em sub-bacias, agregadas com o mesmo tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo, que são as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).

O SWAT utiliza equações que descrevem o ciclo hidrológico e, portanto necessita de informações específicas do clima, propriedades hidrodinâmicas do solo, relevo, vegetação e uso e manejo do solo. O modelo utiliza equações com base no balanço hídrico, para estimar o escoamento superficial, sendo dado pela Eq.1:

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

Sendo SW_t a quantidade final de água no solo, t o tempo (dias), R_i a precipitação do dia (mm), Q_i o escoamento superficial no dia (mm), ET_i a evapotranspiração no dia (mm), P_i a percolação (mm), ou seja a quantidade de água presente na zona vadosa do solo no dia, e por fim o QR_i o fluxo de retorno (mm). Para estimar a produção de sedimentos, o modelo utiliza a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MUSLE) proposta por Williams (1975), sendo dada por:

$$P_{sed} = a \cdot (Q_{surf} \cdot Q_{peak} \cdot area_{hru})^b \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (2)$$

sendo, P_{sed} a produção de sedimentos (t), Q_{surf} o volume do escoamento superficial (mm/ha), Q_{peak} o pico de escoamento superficial (m^3/s), $area_{hru}$ a área da unidade de resposta hidrológica (ha), K_{USLE} o fator erodibilidade do solo, C_{USLE} o fator de uso e manejo do solo, P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas, LS_{USLE} o fator de topografia e $CFRG$ o fator que considera o afloramento de rocha na área.

Para a realização desse estudo foram utilizados dados cartográficos e tabulares para representar as características físicas (tipos de solo, uso do solo, climatologia, declividade) da BRS. No que tange os dados climatológicos, foram utilizados dados de temperaturas máximas e mínima, umidade do ar e radiação solar, da estação climatológica de Monteiro. Os dados de

precipitação foram coletados nos postos Gangorra, Umburana e Jatobá, do período 1976–1979, e de vazão no posto fluviométrico Gangorra. O período de simulação foi de cinco anos de 1974 a 1978, sendo que os três anos iniciais foram usados para o aquecimento do modelo, enquanto os demais foram usados para calibração.

De acordo com SUDENE (1982), a BRS possui três tipos de solos, sendo 11,15% de NeossoloFlúvico, 12,25 % de Argissolo Vermelho e Amarelo e 75,16 % de Luvisolo crômico, além de 1,44% de afloramento de rocha (Quadro1). A Figura 2 mostra a distribuição espacial dos tipos de solos na BRS. Os parâmetros para os tipos de solos existentes na bacia foram obtidos através do Sistema de Informação de Solos Brasileiros, disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html.

Quadro 1 - Tipos de solos da Bacia Representativa de Sumé

Tipo de Solo	Área (km²)	Área (%)	Descrição
Afloramento de Rocha	2,30	1,44	São tipos de terreno e não tipo de solo, são representados por exposição de rochas de diferentes tipos (gnaisse e granito). Tendo como principal característica o escoamento superficial máximo.
Argissolo Vermelho e Amarelo	19,60	12,25	Solo formado por material mineral, solos profundos, bem drenados e de alta permeabilidade. Com relevo ondulado a suave ondulado. O escoamento superficial geralmente é muito fraco.
Luvisolo Crômico	120,25	75,16	Solo Formado por material mineral, solos rasos, com textura argilosa, bem drenada, de permeabilidade moderada e de aptidão média ao escoamento superficial, sobretudo nas áreas com relevo ondulado.
NeossoloFlúvico	17,84	11,15	São bastante arenosos, são provenientes de deposições fluviais e ocupam normalmente as partes planas da bacia. São solos geralmente profundos, relevo plano, apresentando drenagem forte de acordo com a textura arenosa que possui. O escoamento superficial

			geralmente é fraco.
--	--	--	---------------------

Fonte: EMBRAPA (2006) e Cadier e Freitas (1982).

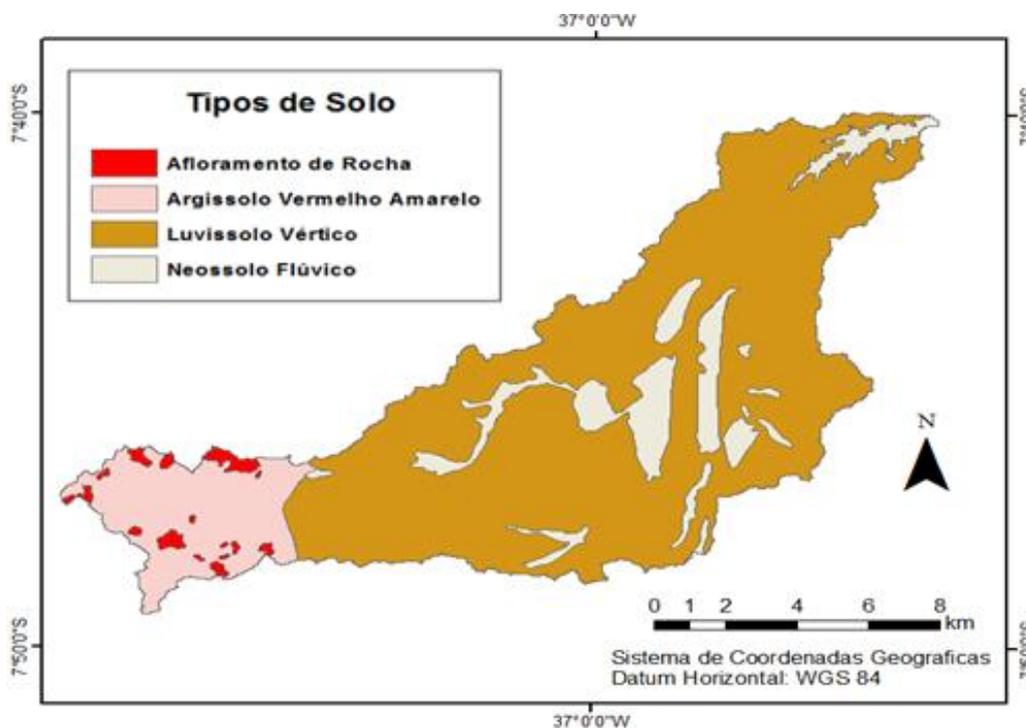


Figura 2 – Tipos de solos existentes na BRS.

Fonte: SUDENE (1982).

Para o mapeamento do solo foram utilizadas duas imagens do satélite: (a) 26 de maio de 1984 e (b) 15 de junho de 2015. A primeira imagem foi adquirida pelo TM/Landsat-5, e a segunda do OLI/Landsat-8, ambas obtidas junto ao site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens foram classificadas usando o método supervisionado a partir do classificador de Máxima Verossimilhança. As classes identificadas de uso e ocupação do solo para o ano de 1984 foram Água, Vegetação Arbustiva, Vegetação Herbácea, Solo Exposto/Agricultura e Estrada Pavimentada.

Para o ano de 2015 foram determinadas as classes Água, Vegetação Arbustiva, Vegetação Herbácea, Solo Exposto/Agricultura, Estrada Pavimentada e Estrada Carroçável. Como o modelo possui seu próprio banco de dados, então foi realizada uma associação das classes de uso do solo encontradas na BRS com as que existem no banco de dados do SWAT (Quadro 2).

Quadro 2 - Associação das classes de uso do solo da BRS com as classes existentes no banco de dados do SWAT

Uso do solo na Bacia	Uso do solo no SWAT
Água	Water– WATR
VegetaçãoArbustiva	Range Brush–RNGB
VegetaçãoHerbácea	Range Grass –RNGE
Solo exposto/Agricultura	Barren–BARR
Estrada Pavimentada	Transportation– UTRN
Estrada Carroçável	Transportation–UTRN

Fonte: Os autores.

Calibração do Modelo SWAT

Para a aplicação do modelo SWAT foi necessário seguir as seguintes etapas: (a) delimitação da bacia hidrográfica a partir do MDE (Modelo Digital de Elevação), (b) definição das HRUs, com base nos mapas de uso e ocupação do solo, tipo de solo e declividade, (c) caracterização da bacia com a inserção dos dados climáticos e (d) executar o modelo. Após essas etapas, o modelo dividiu a BRS em cinco sub-bacias, onde são controlados os processos de escoamento superficial e a produção de sedimentos na bacia.

Para a calibração do modelo, isto é, o ajuste entre os dados observados e os dados simulados de escoamento superficial, foi utilizado o *software* de domínio público, chamado *SWATCalibrationandUncertainty Procedures* (SWAT-CUP), desenvolvido por Abbaspouret al. (2007), que é usado para a autocalibração dos parâmetros que influenciam diretamente no escoamento superficial. O algoritmo utilizado para autocalibração foi o *SequentialUncertaintyFitting* (SUFI-2) (ABBASPOUR et al., 2004; 2007), sendo um dos mais utilizados no modelo SWAT (NARSIMLU et al., 2015).

A Quadro 3 mostra os valores otimizados dos 19 parâmetros de entrada do modelo utilizados na etapa de calibração, obtidos após 500 interações na fase de calibração usando o *software* SWAT-CUP. Adotou-se o valor de 500 interações por este ser o valor em que o SWAT-CUP já obtém um ajuste satisfatório para a série de dados utilizados, não necessitando aumentar ainda mais o número de interações. Neste estudo, o algoritmo SUFI-2 encontrou o melhor ajuste na interação 376, sendo esta a que apresentou os melhores valores dos parâmetros utilizados neste estudo.

Quadro 3 – Parâmetros utilizados para a calibração do SWAT

Parâmetros	Descrição	Valores
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	0,903
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo *	0,151
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	4,937
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido *	1,065
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	4,755
Ch_N2	Coeficiente de Manning do canal *	0,228
Epc0	Coeficiente de compensação da absorção de água pelas plantas *	0,075
Esco	Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo*	0,956
Gw_delay	Tempo de recarga do aquífero (dias)	44,43 0
Gw_revap	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada*	0,138
Gw_qmn	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm)	393,0 0
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)	1,011
Revapmn	Limite de água no solo que ocorre ascensão capilar na zona saturada (mm)	0,570
Ssubbsn	Comprimento da declividade média (m)	1,072
Sol_Alb	Albedo do solo *	0,806
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm)	0,795
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	1,117
Sol_Z	Profundidade da camada de solo (mm)	1,071
Surlag	Tempo de retardo de escoamento superficial (dias)	21,33 6

*Adimensional.

Fonte: Os autores.

Avaliação do desempenho do modelo SWAT

Para avaliar o desempenho do modelo quanto ao ajuste entre os dados observados e calculados de escoamento superficial, foram usados os seguintes testes estatísticos:(a) coeficiente de eficiência- COE (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e (b) coeficiente de determinação de Pearson (R^2). O COE faz uma análise entre os dados estimados e os

observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, quanto mais próximo de 1 for o resultado, melhor será o desempenho do modelo. Já o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2) calcula a relação linear entre duas variáveis, que nesse trabalho foram os estimados e os observados do escoamento superficial (SILVA et al., 2013).

Análise das mudanças do uso do solo na bacia do Bacia Representativa de Sumé

Para se estudar as modificações na paisagem na BRS, dois anos foram escolhidos dentro de um intervalo superior a 30 anos. Assim, foi estudado o uso do solo dos anos de 1984 e 2015. A Tabela 1 mostra as classes de uso e ocupação do solo nos dois anos analisados, como também a área em quilômetros quadrados e sua porcentagem, bem como a variação que ocorreu nesses trinta anos para cada classe. As Figuras 3a–b apresentam os mapas com a distribuição espacial do uso solo de 1984 e 2015 respectivamente.

Tabela 1 – Variação do uso do solo da BRS para os anos de 1984 e 2015

Classes	1984		2015		Variação	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Água	3,43	2,14	2,58	1,61	-0,85	-0,53
Vegetação Arbustiva	82,39	51,49	17,41	10,88	-64,98	-40,61
Vegetação Herbácea	55,31	34,57	67,27	42,04	11,96	7,48
Solo Exposto/Agricultura	18,23	11,39	71,29	44,56	53,06	33,16
Estrada Pavimentada	0,64	0,40	1,15	0,72	0,51	0,32
Estrada Carroçável	–	–	0,30	0,19	–	–
TOTAL	160	100	160	100	–	–

Fonte: Os autores.

Analisando a Figura 3a, percebe-se uma predominância das classes vegetação arbustiva e herbácea (86,06% da área total da bacia), enquanto em 2015 (Figura 3b) essas classes diminuíram para (52%). O maior recuo ocorreu na classe de vegetação arbustiva, que teve uma diminuição de (40,61%). Já na classe de Solo exposto/Agricultura aconteceu o inverso, pois, notou-se um crescimento de 33,16% nessa classe no período estudado, principalmente em áreas próximas a rede de drenagem. Isso pode ser devido à influência antrópica, pois, deve-se ressaltar que essa região teve como principal fonte econômica o

binômio Gado-Algodão até o fim da primeira metade do século XX, segundo o MDA (2011). Essas atividades contribuíram para o desmatamento da região. Após a decadência da cultura do algodão na década de 80, principalmente pela praga do bicudo, houve segundo Souza (2008) incentivo a pecuária por meio de políticas públicas.

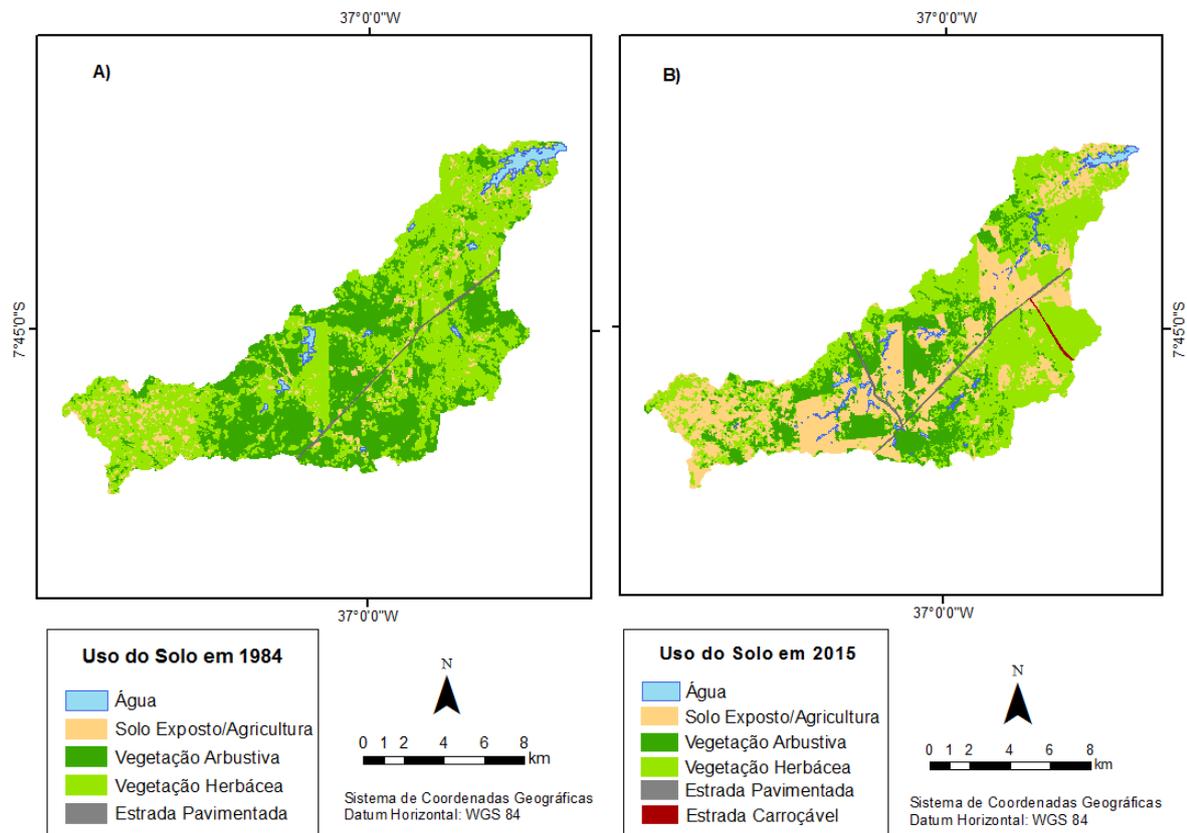


Figura 3– Classes de uso do solo da BRS em: (A) 1984 e (B) 2015.

Fonte: Os autores.

Na região do Cariri a criação de caprinos permaneceu como principal fonte econômica da região. Desde esse período, como pode-se observar na Figura 3b, as áreas com o maior aumento da classe de solo exposto/agricultura ocorreram próximas a corpos hídricos na bacia. Segundo Paiva et al. (2009) as formas de uso do solo que mais impactam negativamente a região são: a caprinocultura extensiva, a exploração de vários tipos de minérios e a extração de lenha para a transformação em carvão.

Estimativa do escoamento superficial

A Figura 4 mostra o resultado da calibração entre os escoamentos superficiais observado e simulado após a calibração do SWAT. Os resultados obtidos mostram que os valores médios dos escoamentos superficiais observado e simulado foram de $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$, o que demonstra um excelente ajuste do modelo. No que tange os valores dos picos de escoamento superficial foram de $34 \text{ m}^3/\text{s}$ para o observado, e de $28,87 \text{ m}^3/\text{s}$ para o simulado.

Esses resultados demonstram que esse é um típico comportamento hidrológico de uma bacia da região do semiárido, com a maioria das vazões próximas a zero e alguns eventos extremos que geraram escoamento superficial. Com relação ao desempenho do modelo SWAT na fase de calibração, os resultados foram considerados, segundo Morias et al. (2007), como aceitáveis, apresentando valor de $R^2 = 0,89$ e $\text{COE} = 0,85$, mostrando que o modelo foi eficiente na calibração do escoamento superficial.

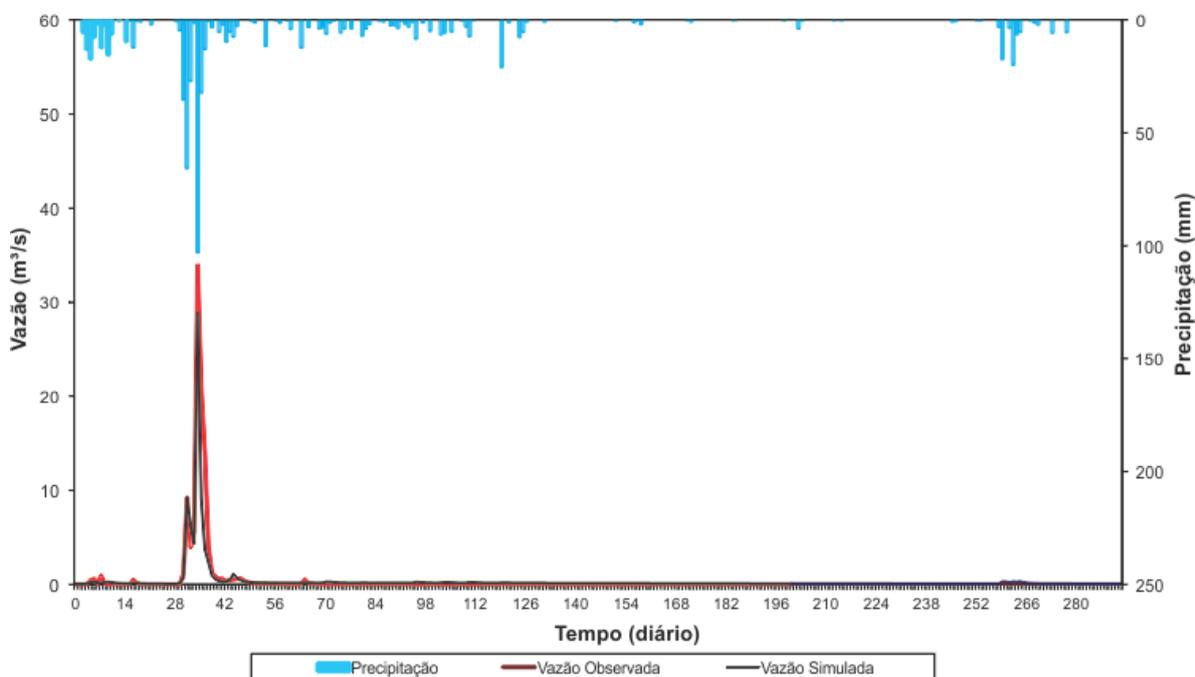


Figura 4—Comparação das vazões observada e simulada no posto Gangorra na BRS, para o período de 1977 a 1978.

Fonte: Os autores.

A Figura 5 mostra a comparação entre os hidrogramas estimados a partir dos cenários de uso do solo nos anos de 1984 e 2015 no posto Gangorra na BRS. O escoamento superficial médio para 1984 foi de $0,360 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto na simulação para 2015 foi de $0,854 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, um aumento de $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ (137%). Os valores de pico foram de $27,03 \text{ m}^3/\text{s}$ e $65,44 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, apresentando um acréscimo de 142%. Esse fato pode ser atribuído a menor

proteção do solo devido às mudanças de uso e coberturas do solo na bacia, que afetam processos de escoamento superficial e infiltração de água no solo em função do tipo de sistema radicular e o manejo do solo. Esses resultados em ambiente semiárido chamam a atenção quando comparados com regiões de clima úmido. Mello et al. (2007), por exemplo, obtiveram um aumento no escoamento superficial de 4,5% com a simulação de um cenário composto por 100% pastagem para uma micro bacia hidrográfica na cidade de Lavras (MG).

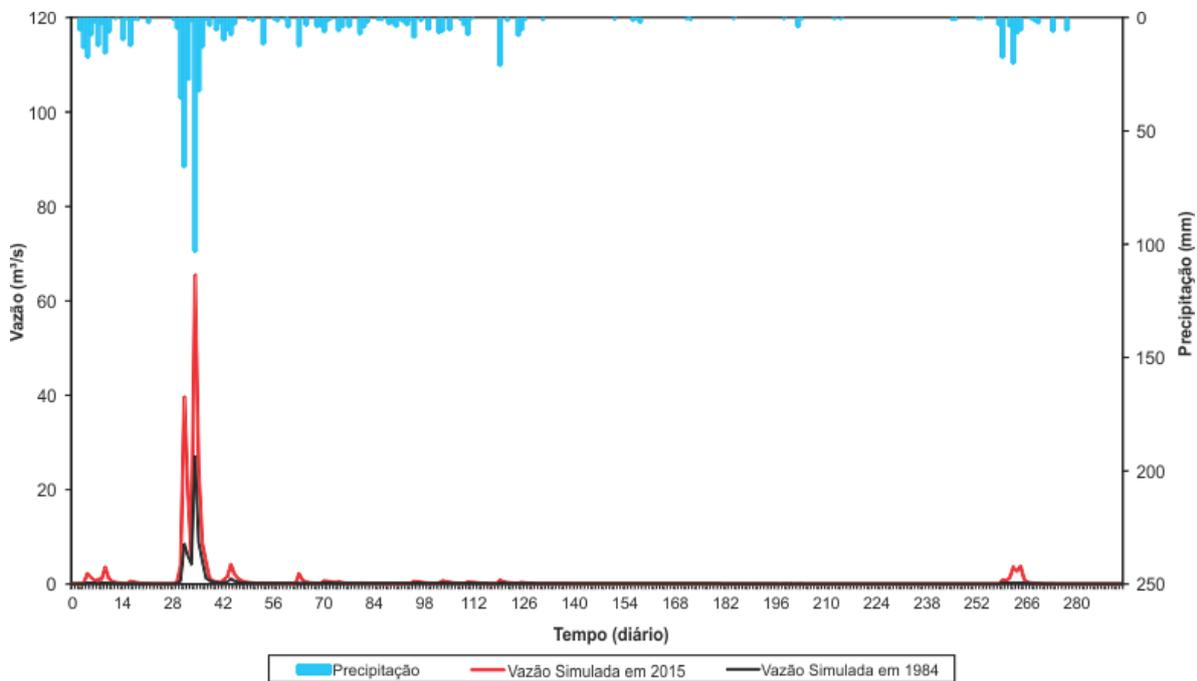


Figura 5–Hidrogramas com a vazão simulada e a vazão usando o uso do solo de 2015 na BRS.

Fonte: Os autores.

Em outras palavras, os impactos das mudanças no uso e ocupação do solo em regiões semiáridas, como é o caso de grande parte do Nordeste do Brasil, são influenciados ainda mais pela tênue cobertura superficial do solo existente nessa região, mesmo a cobertura da vegetação do tipo caatinga tendo papel importante para reduzir as taxas de erosão do solo, quando comparadas com o solo descoberto (SANTOS et al., 2007).

As Figuras 6a–b mostram as distribuições espaciais do escoamento superficial em cada sub-bacia, com base nas simulações realizadas com os cenários de uso do solo de 1984 e 2015. Como esperado, os maiores valores de escoamento superficial ocorreram na parte leste

da bacia (sub-bacias 1 e 2), no ano de 2015, em virtude desta porção da bacia possuir área mais preservada e algumas áreas com declividade bastante acentuadas.

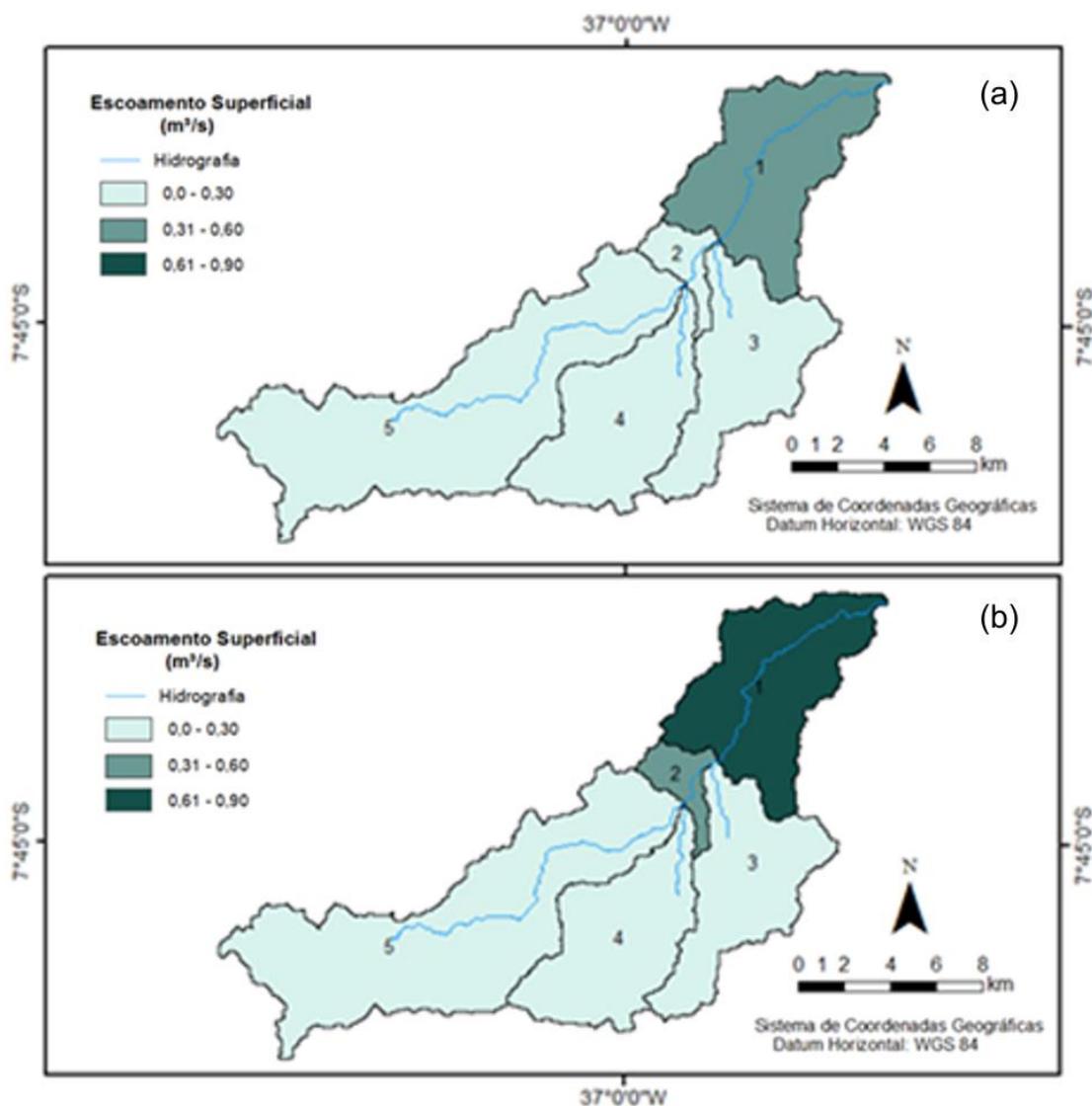


Figura 6– Distribuição espacial do escoamento superficial na BRS: (a)calibração, e (b) simulado com base no uso do solo de 2015.

Fonte: Os autores.

Outro fator que contribui para os maiores valores de escoamento nessas sub-bacias são os tipos de solo. Os solos predominantes nessas sub-bacias são o Luvissole Crômico e o Argissolo Vermelho e Amarelo, que possuem permeabilidade moderada e de média a lenta, respectivamente, o que proporciona um forte escoamento superficial (SRINIVASAN e PAIVA, 2009). Analisando os resultados, percebeu-se que houve um aumento entre o escoamento médio entre 1984 e 2015. Isso pode ser devido à diminuição da vegetação, pois a

vegetação ajuda a água a infiltrar e se for retirada essa vegetação a água vai escoar, como confirma Aragão et al. (2011) quando afirma que as vegetações nativas/renascidas e até mesmo as culturas contribuem para a redução do escoamento superficial e no impacto das gotas de chuva, prevenindo o solo da erosão e incrementando a infiltração

Estimativa de produção de sedimentos para a BRS

A produção de sedimentos pode ocorrer por diversos fatores associados, como a região ter classes do solo mais suscetíveis à erosão ou mesmo o uso do solo que tenha como consequência uma menor proteção ao solo (ARAGÃO et al., 2013). Com base nisso, a bacia em estudo teve uso dos solos que geraram e geram uma menor proteção do solo, como a pecuária extensiva, o que acelera o processo de erosão que causa diversos impactos, como maior produção de sedimentos, assoreamento dos rios e consequentemente diminuição do escoamento superficial.

Ter uma baixa vazão nos rios é algo característico da região, só acontece de possuir uma vazão elevada em caso de eventos de chuvas extremas. Mas o que não é normal é o escoamento em áreas em que seriam de “produção de água”, ou seja, infiltração, como ocorre em áreas que tiveram sua camada de vegetação natural retirada, pois a vegetação serve como filtro para a água seguir para os reservatórios e como proteção para o solo, que já é raso não desagregar.

Segundo Aragão et al. (2013), a erosão dos solos resulta da ação conjunta dos processos de desagregação por impacto, transporte e deposição de partículas sólidas, provocados pelas forças erosivas das gotas de chuva e do fluxo superficial. Quando acelerada, principalmente pelo desmatamento, a erosão causa impactos ambientais, econômicos e sociais (BERTOL et al., 2007; PUGLIESI et al., 2011). O desmatamento também contribui para o aumento do escoamento superficial e da produção de sedimentos, com perda de nutrientes e redução da capacidade produtiva dos solos (ARAÚJO e KNIGHT, 2005), além de acarretar o assoreamento de reservatórios e rios (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2005).

A Figura 7 mostra os sedigramas estimados para os anos de 1984 e 2015, na BRS utilizando os mesmos dados pluviométricos. Comparando os resultados das simulações nos dois períodos analisados, a produção de sedimentos na bacia no ano de 2015 foi maior quando comparada com o da simulação, em virtude do aumento de área de solo exposto. Como esperado, o resultado de produção de sedimento houve um crescimento de 290% comparando

o ano de 2015 com o uso da primeira simulação. No cenário em 2015, a produção de sedimentos simulada foi de 1,34 ton/ha.ano, enquanto no primeiro uso foi de 0,34 ton/ha.ano.

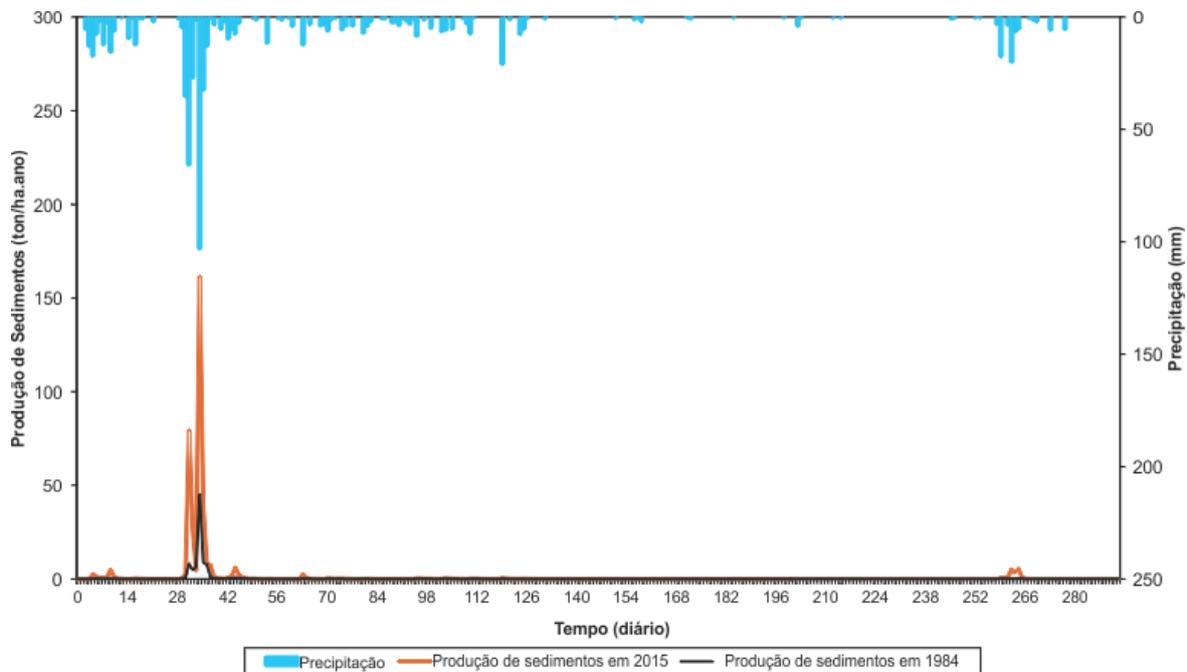


Figura 7–Produção de sedimentos estimada para 1984 e 2015 na BRS.

Fonte: Os autores.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Aragão et al. (2013) e Dantas (2016), que aplicaram o modelo SWAT para condições similares a BRS. Esses resultados mostram que com uma cobertura vegetal mais densa, ocorre maior interceptação da precipitação pluvial e menos água chega diretamente ao solo. Esse resultado obtido corrobora com o trabalho desenvolvido por Machado et al. (2003) na bacia do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba (SP), onde foi observado que o maior impacto na redução do escoamento superficial foi obtido pela substituição do uso e cobertura atual do solo por mata nativa.

Com base na Figura 8 é possível observar que as sub-bacias que mais produziram sedimento nos dois anos estão localizadas ao sul da Bacia. A sub-bacia 3 no ano de 1984 e as sub-bacias 5, 4 e a 3 novamente, só que produzindo praticamente o dobro em 2015. No ano de 2015, o aumento na produção de sedimentos foi decorrente dos diferentes valores do fator C (da USLE) associado com o tipo de cobertura atual. Nesse cenário, a produção de sedimentos ficou acima do tolerável para todos os tipos de solo. A mudança do uso da terra nas áreas ocupadas por Solo exposto.

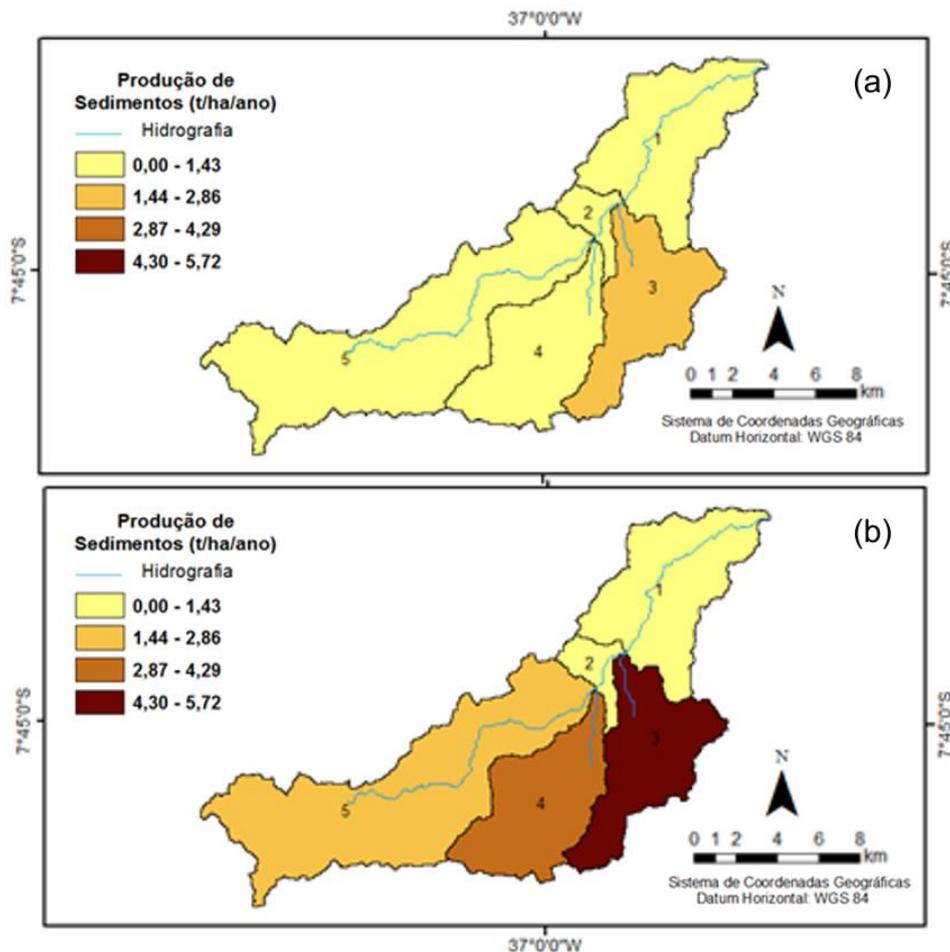


Figura 8– Distribuição espacial da produção de sedimentos na BRS: (a)calibração, e (b) com base no uso do solo de 2015.

Fonte: Os autores.

Já a produção de sedimentos na simulação da bacia teve uma média de 0,87 t/ha.ano para o ano de 1984 e com base no cenário de uso do solo de 2015, teve uma produção média de 2,27 t/ha.ano, ocorrendo um aumento de 1,40 t/ha.ano. Esse aumento pode ter relação com o aumento do escoamento superficial.

A mudança do uso do solo dessa região e o tipo de solo com predominância do litólico crômico pode ter contribuído para isso. Pois a maioria da vegetação arbustiva foi retirada e esse tipo de solo citado é característico do semiárido, e quando tem sua proteção vegetal retirada, pode gerar a erosão. Como afirma Castro et al. (2006) quando dizem que áreas com cobertura vegetal, como nos sistemas conservacionistas de preparo do solo, tem menos probabilidade de sofrer erosão hídrica, pois a cobertura vegetal ajuda a dissipar a energia da chuva, protegendo a superfície do solo de selamento, assim aumentando a infiltração e diminuindo o escoamento superficial e a erosão hídrica. Além de problemas

como assoreamento dos corpos hídricos, a perda de solo leva a perda de nutrientes do solo, podendo torná-lo improdutivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o que foi apresentado é possível concluir que a maior mudança de uso do solo nesta bacia foi à utilização e remoção da vegetação para a pecuária e outras atividades, o que provocou e provoca o aceleração do processo de erosão, acelerando o escoamento nas margens e dificultando o escoamento nos cursos devido ao assoreamento das calhas dos rios, que já é uma consequência da produção em excesso de sedimento, o que gera diversos problemas.

Quanto ao modelo hidrológico SWAT, se mostrou eficiente na modelagem diária de uma pequena bacia com um resultado de COE = 0,85 e R² = 0,89, o que é um resultado favorável. Através desta pesquisa foi percebida a importância do uso de SIG, para estudos dessa temática, além da importância de estudos climáticos no Semiárido Brasileiro, prezando sempre pelo o seu melhor desenvolvimento social, econômico e ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 3, p. 413-430, 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAGÃO, R. de.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A. de.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do

modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no Agreste Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, 2013.

ARAGÃO, R.; ALMEIDA, J.A.P.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Mapeamento do potencial de erosão laminar na bacia do rio Japarutuba - SE, via SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15:731-740, 2011.

ARAÚJO, J.C.; KNIGHT, D.W. A review of the measurement of sediment yield in different scales. **Revista Escola de Minas**, v. 53, n. 3, p. 257-265, 2005.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 176, p. 57-77, 1996.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J.C.; AMARAL, A.J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 133-142, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5.ed. São Paulo, Ícone, 2005. 355p.

CADIER, E; FREITAS, B. J. de. **Bacia Representativa do Sumé: primeira estimativa dos recursos de água**. Recife: SUDENE, 1982. 195p.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.3, p.339-352, 2006.

CUNHA, A.P.M.; ALVALÁ, R.C.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M.A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214-215, n. 3, p. 494-505, 2015.

DANTAS, J. C. **Processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Taperoá**. Monografia (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016, 80p.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. **Geociências**, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA, P. C. G. Erosão usando o modelo SWAT para uma simulação vazão grande bacia da região semiárida da Paraíba. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 4, p.816-827, 2015.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos (SNLCS, Miscelânea,1), Rio de Janeiro, RJ: 1979, 83p.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 727-733, 2003.

MDA – Ministério do Desenvolvimento Agrário. Plano Territorial De Desenvolvimento Rural Sustentável, 2011. Disponível em: <http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_territorio159.pdf>. Acessado em: 12 de dezembro de 2016

MEDEIROS, I. C.; SILVA, R. M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. **Geociências**, v. 33, n. 3, p. 457-471, 2014.

MELLO, R. C.; LIMA, M.J.; SILVA, M.A. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MENEZES, J. B; ARAÚJO, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CORRÊA, A. C. B. Índice de vulnerabilidade à erosão para uma bacia na mesorregião do São Francisco Pernambucano, a partir das relações entre morfogênese e pedogênese. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.2, p.45-56, 2007.

MORIASI, D. N; ARNOLD J. G; VAN LIEW M. W; BINGER R. L; HARMEL R. D; VEITH T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.

NARSIMLU, B.; GOSAIN, A.K.; CHAHAR, B.R.; SINGH, S.K.; SRIVASTAVA,P.K. SWAT Model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari River Basin, India, using Sequential Uncertainty Fitting. **Environmental Processes**, v. 2, n. 1, p. 79-95, 2015.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 1, p. 282-290, 1970.

PAIVA, L. A. N.; SILVA, F. M.; NASCIMENTO, P. S.R. Uso de imagens MODIS e TM para a detecção de áreas degradadas na sub-bacia do Taperoá-PB. **Anais...XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa: UFV, 2009.

PUGLIESI, A.C.V.; MARINHO, M.A.; MARQUES, J.F. & LUCARELLI, J.R.F. Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 113-121, 2011.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semiárido da Paraíba. **OKARA: Geografia em Debate**, v. 1, n. 1, 16-32, 2007.

SILVA, R. M.; MEDEIROS, I. C. de. Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT. **Geofocus**, v. 14, n. 2, p. 211-231, 2014.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; MEDEIROS, I. C.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. **Geociências**, v. 35, n. 4, p. 609-622, 2016.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P. Erosivity, surfacerunoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion modelin theMamuaba catchment, Brazil.**Environmental MonitoringandAssessment**, v. 185, n. 8, p. 8977-8990, 2013.

SOUZA, B. I. de. **Cariri Paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. 198f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUZA, B. I.; SILANS, A. M. B. P.; SANTOS, J. B. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8 n2/3, p.292-298, 2004.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. 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, n. 11, 2009, p. 3348-3356.

SRINIVASAN, V.S.; GALVÃO, C.O. **Bacia experimental de Sumé: Descrição e dados coletados. Campina Grande, PB:** Universidade Federal de Campina Grande/CNPq, 2003.

SUDENE. **Bacia Representativa de Sumé:** Primeira estimativa dos recursos de água – Campanhas de 1973 – 1980. Série Brasil. SUDENE. Hidrologia N. 14. Recife, 1982.

TAVEIRA, I. M. L. M.; SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O.; MORAIS, S. D. A.; SILVA, M. J. M. Simulação hidrossedimentológica da Bacia Representativa de Sumé com o modelo SWAT. **Anais...** XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa, 2012.

WILLIAMS, J. R. **Sediment yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor.** Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1975.