



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.ufrpe.br/jeap

<http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1446.239-248>



Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil

Hydrological modeling under vegetal cover changes of a watershed in the Brazilian Northeast

Carolyne Wanessa Lins de Andrade^a, Suzana Maria Gico Lima Montenegro^b, José Romualdo de Sousa Lima^c, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro^a, Adriana Guedes Magalhães^d

^a Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife/PE, Brasil. CEP: 52171-900. E-mail: carolyne.andrade@ufrpe.br; abelardo.montenegro@ufrpe.br.

^b Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Av. Prof. Moraes Rego, n. 1235, Cidade Universitária, Recife/PE, Brasil. CEP: 50670-901. E-mail: suzanam@ufpe.br.

^c UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns-UAG, Av. Bom Pastor, s/n, Boa Vista, Garanhuns/PE, Brasil. CEP: 55292-270. E-mail: romualdo.lima@ufrpe.br.

^d Faculdade Santa Helena-FSH, Av. Caxangá, n. 990, Madalena, Recife-PE, Brasil. CEP: 50711-000. E-mail: agmguedes@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 28 Jun 2017

Aceito 10 Jul 2017

Publicado 31 Jul 2017

ABSTRACT

Changes in soil cover in watersheds may cause changes in hydrological components. The objective of this study was to evaluate the hydrological processes under different vegetation cover conditions in the Mundaú River Basin (BHRM), Northeast Brazil, using the SWAT model. For the hydrological simulation, two scenarios (C1 - current use) and C2 (replacement of agricultural areas by Caatinga) were considered. Input data were used as a land use map, a digital elevation map and a soil type map, as well as a series of 17 years of data, in daily time step. Average annual rainfall at BHRM was 1,109.7 mm, average annual potential evapotranspiration was 1,247.7 mm and the average annual rise from the shallow aquifer was 24.94 mm, in part of the basin. The runoff for scenario C1 was 262.62 mm and for scenario C2 257.49 mm. The percolation and recharge values were 302.78 and 15.14 mm for the C1 scenario and 306.73 and 15.34 mm for the C2 scenario. The average annual actual evapotranspiration for scenario C1 resulted in 548.2 mm and for scenario C2 in 549.3 mm. Land use changes influenced the hydrological regime of the Mundaú watershed. The implantation of Caatinga in agricultural areas provided reduction in surface runoff. On the other hand, processes such as evapotranspiration, percolation to the shallow aquifer and recharge to the deep aquifer increased.

Keywords: SWAT model, surface runoff, water balance.

RESUMO

Modificações na cobertura vegetal do solo em bacias hidrográficas podem ocasionar alterações nas componentes hidrológicas. O objetivo do estudo foi avaliar os processos hidrológicos sob diferentes condições de cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM), Nordeste do Brasil, utilizando o modelo SWAT. Para a simulação hidrológica, foram considerados dois cenários (C1 – uso atual) e C2 (substituição de áreas agrícolas por Caatinga). Foram utilizados dados de entrada como mapa de uso e ocupação do solo, mapa digital de elevação e mapa dos tipos de solo, além de uma série de 17 anos de dados, em passo de tempo diário. A precipitação anual média da BHRM foi 1.109,7 mm, a evapotranspiração potencial anual foi 1.247,7 mm e a ascensão do aquífero raso foi de 24,94 mm por ano, em

parte da bacia. O escoamento superficial anual para o cenário C1 foi igual 262,62 mm e para o cenário C2 igual a 257,49 mm. Os valores de percolação e recarga anuais foram de 302,78 e 15,14 mm para o cenário C1 e de 306,73 e 15,34 mm para o cenário C2. A evapotranspiração real anual para o cenário C1 resultou em 548,2 mm e para o cenário C2 em 549,3 mm. A mudança de uso do solo exerceu influência no regime hidrológico da Bacia do Rio Mundaú. A implantação de vegetação Caatinga em áreas agrícolas proporcionou redução no escoamento superficial. Por outro lado, processos como evapotranspiração, percolação para o aquífero raso e recarga para o aquífero profundo aumentaram.

Palavras-Chave: modelo SWAT, escoamento superficial, balanço hídrico.

Introdução

A dinâmica dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é resultado de uma complexa interação entre fatores como vegetação, solo, clima e relevo (Viola, 2008). Havendo uma modificação dessa interação, o regime hidrológico também é modificado (Costa, Botta & Cardille, 2003). Segundo Kuhnle et al. (1996) a mudança desordenada de coberturas naturais por áreas agrícolas tem sido uma das principais causas da degradação dos recursos naturais, especialmente os recursos hídricos.

A alteração no uso do solo provoca variação do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, devido às modificações ocorridas na interceptação da precipitação, evapotranspiração e condutividade hidráulica (Munoz-Villers & McDonnell, 2013; Yan et al., 2013). No Brasil, a Caatinga representa um dos biomas mais modificados, estando entre os mais ameaçados do mundo, com elevados valores de substituição da vegetação nativa por áreas agrícolas (Menezes et al., 2012).

Dentro deste contexto, a compreensão dos efeitos da modificação da cobertura do solo sobre a dinâmica da água possui grande importância para auxiliar na tomada de decisão, visando o gerenciamento dos recursos hídricos (Kuhnle et al., 1996).

Ferramentas de suporte ao estudo dos impactos advindos das modificações da cobertura do solo sobre a quantidade e a qualidade da água são imprescindíveis para subsidiar a implementação de políticas e auxiliar no manejo dos recursos hídricos. Pesquisadores e profissionais de diversas áreas têm buscado melhorar e pôr em prática múltiplos instrumentos relacionados com os recursos hídricos, incluindo os modelos hidrológicos, como o SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) (Bressiani et al., 2015). O SWAT é um modelo hidrossedimentológico, desenvolvido para analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento da água, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas (Arnold et al., 1998). Blainski et al. (2011) destacam a importância do desenvolvimento de ferramentas como o SWAT,

devido à expansão das atividades agrícolas, associada à degradação e à contaminação dos recursos hídricos, visando o uso sustentável dos recursos naturais.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os processos hidrológicos sob diferentes condições de vegetação Caatinga na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil, utilizando o modelo SWAT.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (4.126 km²) (BHRM), Brasil, localizada entre as coordenadas 08°41'34" e 09°14'00" de latitude sul, e 36°03'36" e 36°37'27" de longitude oeste (Figura 1). A região apresenta clima, segundo a classificação de Köppen, Aw (Tropical, com estação seca no inverno), sendo uma pequena porção a noroeste da bacia composta pelo clima BSh (clima das estepes quentes com baixas latitudes e altitudes) (Pauwels, 2002). A maior parte da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú é classificada em relação a umidade como semiúmida (4 a 5 meses de seca), e uma pequena porção classificada como semiárida (7 a 8 meses de seca), caracterizada também por temperaturas quentes (médias acima de 18°C todos os meses) (Quadro et al., 1996). A precipitação média anual na BHRM é de 900 mm. Na faixa litorânea encontram-se os valores pluviométricos máximos, com médias anuais em torno de 2.000 mm. À medida que se adentra no continente, há uma diminuição pluviométrica devido à aproximação da região do polígono das secas.

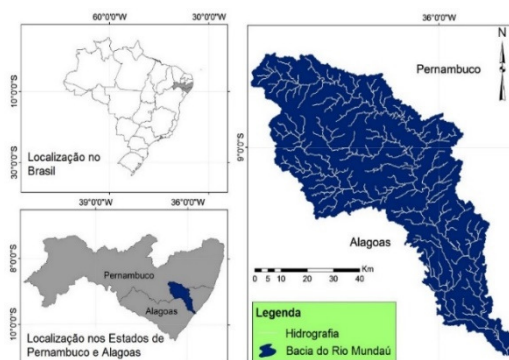


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

Modelo SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), disponibilizado livremente em (<http://swat.tamu.edu/>), é um modelo semiconceitual, semidistribuído, de base física e contínuo no tempo, o que permite que diferentes processos físicos sejam simulados na área de estudo. Os principais componentes do modelo são: clima, hidrologia (escoamento superficial, percolação, interceptação, infiltração, escoamento subsuperficial, escoamento de base e evapotranspiração), temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos, e manejo do solo (Arnold et al., 2012).

O ciclo hidrológico no SWAT é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P - Q_s - ET - W_s - Q_{gw}) \quad (1)$$

onde SW_t e SW_0 são armazenamento de água no solo nos tempos final e inicial, respectivamente (mm), t é tempo (dias), P é precipitação (mm), Q_s é escoamento superficial (mm), ET é evapotranspiração (mm), W_s é percolação (mm) e Q_{gw} é o escoamento de base (mm) (Neitsch et al., 2005).

O escoamento superficial é simulado com o modelo empírico da curva-número (método padrão) do *Soil Conservation Service* (SCS), que se constitui em uma base única para estimar o escoamento sob diferentes condições de uso e ocupação do solo (Rallison & Miller, 1981).

$$Q_s = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

onde P é precipitação (mm), I_a é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) comumente aproximada para 0,2 no numerador e 0,8 no denominador; e S é o parâmetro de retenção da água (mm), que varia espacialmente de acordo com o tipo solo, cobertura vegetal, manejo e declividade, e CN é a curva número (Eq. 3).

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

A vazão de pico, ou seja, a vazão máxima de escoamento superficial que ocorre em determinado evento de chuva, é calculada pelo modelo SWAT a partir do método racional. O método racional considera que uma determinada

chuva com intensidade i começando no tempo t , terá a sua taxa de escoamento aumentada até atingir o tempo de concentração t_{conc} . O método é dado pela Equação 4 (Neitsch et al., 2005).

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (4)$$

onde q_{peak} é a vazão de pico ($m^3 s^{-1}$), C é o coeficiente de escoamento superficial, i é a intensidade de precipitação ($mm h^{-1}$) e A é a área da bacia (km^2).

O modelo SWAT disponibiliza três opções para a estimativa da componente evapotranspiração potencial (ET_0): Penman-Monteith-FAO, Hargreaves & Samani (1985) e Priestley-Taylor. O método padrão do modelo é o Penman-Monteith-FAO, que requer variáveis meteorológicas como radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento para a estimativa da ET_0 (Neitsch et al., 2005). No presente trabalho foi utilizado o método de Penman-Monteith-FAO devido a disponibilidade de dados agroclimatológicos na parte alta da bacia. A equação é dada por:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} v_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 v_2)} \quad (5)$$

Em que: ET_0 é evapotranspiração potencial ($mm dia^{-1}$), Δ declividade da curva da pressão de saturação de vapor com a temperatura ($kPa ^\circ C^{-1}$), R_n saldo de radiação ($MJ m^{-2} dia^{-1}$), G densidade de fluxo de calor do solo ($MJ m^{-2} dia^{-1}$), γ constante psicrométrica ($kPa ^\circ C^{-1}$), v_2 velocidade do vento ($m s^{-1}$), e_s pressão de saturação do vapor d'água (kPa), e_a pressão atual de vapor d'água (kPa) e T temperatura média do ar ($^\circ C$).

Modelagem hidrológica com o modelo SWAT na sub-bacia da BHRM

A simulação hidrológica com o modelo SWAT é realizada a partir da inserção de diferentes dados requeridos como entrada, além da adoção de uma sequência de procedimentos recomendada pelo modelo.

O SWAT requer quatro tipos principais de dados de entrada, três tipos são considerados dados espaciais e um tipo representa os dados tabulares. Os dados espaciais incluem o mapa de uso e ocupação do solo, o mapa de tipos de solo e o modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo. Os dados tabulares utilizados pelo modelo SWAT para a modelagem hidrológica devem ser diários e de variáveis meteorológicas como: precipitação (mm) (variável que mais influencia a modelagem com o SWAT), temperaturas máximas

e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e radiação solar (MJ m^{-2}). A Tabela 1 apresenta as fontes de dados

hidrológicos e meteorológicos utilizados para a modelagem hidrológica com o SWAT.

Tabela 1. Fontes dos dados hidrológicos e meteorológicos utilizados na modelagem hidrológica.

Descrição	Tipo de dado	Instituição/ Agência
Mapa de uso e ocupação do solo	Espacial	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Ministério do Meio Ambiente (MMA); Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
Mapa de tipos de solos	Espacial	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); Artigos científicos
Modelo de Elevação Digital (MDE)	Espacial	EMBRAPA Monitoramento por Satélite
Dados pluviométricos	Série de dados diários	Agência Nacional de Águas (ANA); Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC)
Dados meteorológicos	Série de dados diários	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)
Dados fluviométricos	Série de dados diários	Agência Nacional de Águas (ANA)

O uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Mundaú são marcados por pastagem, principalmente na porção do Agreste pernambucano, sendo considerada uma bacia leiteira, com grande atividade na pecuária leiteira e de corte; por exploração agrícola, com destaque ao cultivo da cana-de-açúcar na região alagoana, além de outras culturas como milho, feijão, mandioca, soja, laranja, banana, algodão, café, tomate, palma; por áreas urbanas, com trinta municípios inseridos ao longo de toda a bacia; vegetação nativa composta por uma pequena área de Caatinga e por floresta de Mata Atlântica; e por corpos hídricos, como a Lagoa do Rio Mundaú.

Para analisar os processos hidrológicos no exutório da BHRM a modificações na porcentagem de Caatinga através da modelagem hidrológica com o SWAT, foram considerados dois tipos de cenários de uso e ocupação do solo, os quais foram: Cenário atual (C1): considera sete tipos de uso e

ocupação do solo atual: i) pastagem, ii) agricultura, iii) caatinga, iv) mata atlântica, v) cana-de-açúcar, vi) área urbana e vii) água. Cenário de reflorestamento (C2): considera que uma área de 262,14 km^2 (6,35%) composta de agricultura (na nascente da BHRM) será convertida (reflorestada) em área de Caatinga.

Definidas as diferentes classes de uso do solo existentes na área em estudo, as mesmas foram reclassificadas de acordo com as classes disponíveis no banco de dados do SWAT. O modelo possui, dentre outras informações, um extenso banco de dados com múltiplos usos de solo e cobertura vegetal, com suas respectivas propriedades, que podem ser adotados em diferentes bacias hidrográficas. A associação do uso do solo com as classes existentes no banco de dados do SWAT, além da porcentagem de ocupação das classes na BHRM nos dois cenários (C1 e C2) são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Associação dos usos de solo existentes no estudo com os usos existentes no banco de dados do SWAT.

Classe	Cenário C1	Área (%)	Cenário C2	Área (%)	Classe do banco de dados do SWAT
i	Pastagem	67,04	Pastagem	67,04	<i>Pasture (PAST)</i>
ii	Agricultura	6,35	Agricultura	0	<i>Agricultural Land-Generic (AGRL)</i>
iii	Caatinga	2,92	Caatinga	9,27	<i>Range Brushes (RNGB)</i>
iv	Mata Atlântica	10,91	Mata Atlântica	10,91	<i>Forest-Evergreen (FRSE)</i>
v	Cana-de-açúcar	11,21	Cana-de-açúcar	11,21	<i>Sugarcane (SUGC)</i>
vi	Área urbana	1,23	Área urbana	1,23	<i>Residential (URBN)</i>
vii	Água	0,35	Água	0,35	<i>Water (WATR)</i>

Os mapas de uso e ocupação dos cenários C1 e C2 são apresentados na Figura 2. Os demais

dados espaciais utilizados na modelagem hidrológica com o SWAT são apresentados na Figura 3.

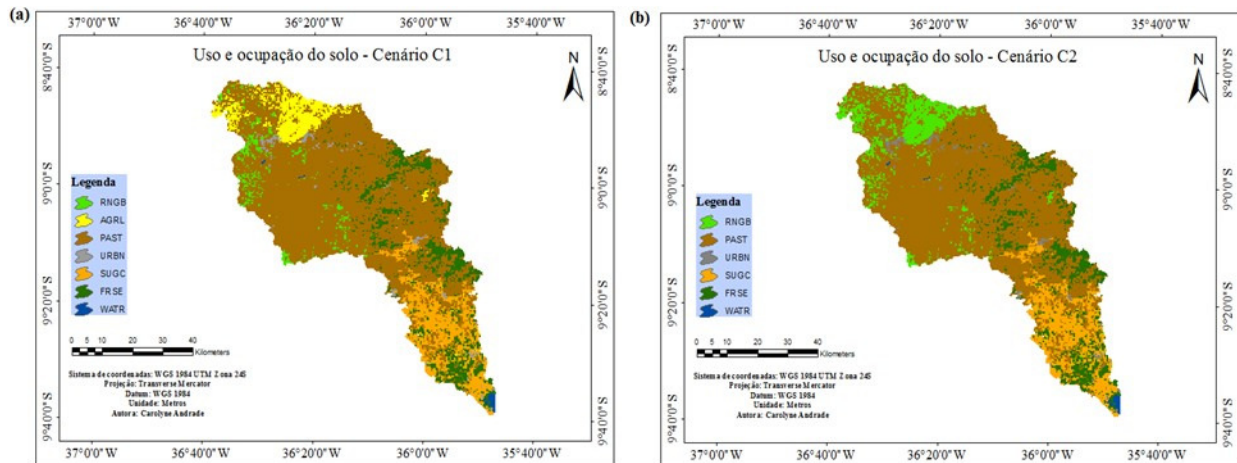


Figura 2. Mapas de uso e ocupação da sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM para os cenários C1 (a) e C2 (b).

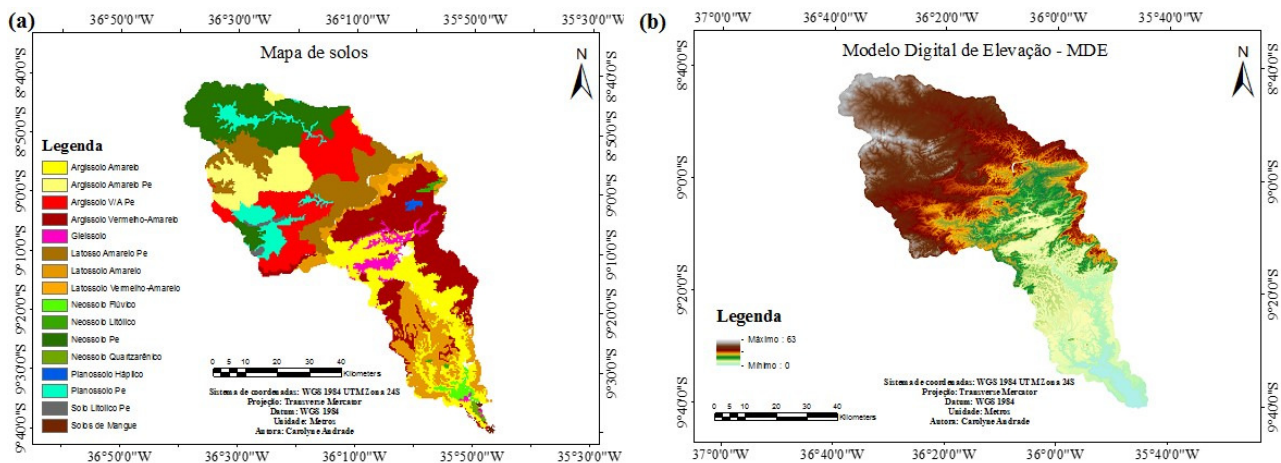


Figura 3. Mapas de tipos de solos (a) e elevação digital (MDE) (b) da sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM.

A série de dados tabulares considerada para a simulação hidrológica foi do período de 2000 a 2016 (17 anos), operando em passo de tempo diário, em que os dois primeiros anos (2000 e 2001) foram utilizados para o aquecimento do modelo SWAT, não sendo considerados na modelagem. Os valores simulados de vazão da sub-bacia de número 221, correspondente ao exutório da área de estudo, foram comparados aos dados fluviométricos observados da estação Rio Largo-AL.

Resultados

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú foi dividida pelo modelo SWAT em 221 sub-bacias (o exutório corresponde à sub-Bacia 221), com áreas variando entre 0,09 e 90,24 km².

A partir dos dados de entrada MDE (Figura 3b), que possui um valor máximo de 63 m (porção

norte da bacia) e um valor mínimo de 0 m (porção sul da bacia), o modelo SWAT gerou o mapa de declividade da bacia, sendo que a maior parte, cerca de 96%, apresenta declividade de 0 a 2% e pequenas áreas, principalmente na porção sul, apresentam declividades acima de 2%.

No relatório sobre as HRU's, onde são gerados o número total de microbacias, o número de HRU's resultou em 1.024. Essas HRU's correspondem a áreas com combinações de uso do solo, tipos de solos e classes de declividade semelhantes.

Na modelagem com o SWAT, são gerados diversos resultados que simulam o comportamento das variáveis hidrossedimentológicas ao longo do tempo. As informações incluem precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, fluxo de base, ascensão capilar, percolação para o aquífero raso, recarga para o aquífero profundo,

informações sobre uso do solo, manejo, pesticidas, nutrientes, sedimentos, entre outros. Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT para os dois cenários (C1 e C2) de uso e ocupação do solo. A ilustração desses processos é apresentada na Figura 4.

A precipitação média da BHRM foi igual a 1.109,7 mm, a evapotranspiração potencial ou de referência foi igual a 1.247,7 mm e a ascensão para o aquífero raso foi de 24,94 mm.

O escoamento superficial para o cenário C1 foi igual 262,62 mm e para o cenário C2 igual a 257,49 mm.

Os valores de percolação e recarga foram de 302,78 e 15,14 mm para o cenário C1 e de 306,73 e 15,34 mm para o cenário C2.

A evapotranspiração real para o cenário C1 resultou em 548,2 mm e para o cenário C2 em 549,3 mm, com uma evapotranspiração potencial ou de referência de 1.247,7 mm.

Tabela 3. Processos hidrológicos simulados pelo SWAT para os cenários C1 e C2.

Processo hidrológico	Cenário atual – C1	Cenário Reflorestamento – C2
Escoamento superficial	262,62	257,49
Precipitação	1.109,7	1.109,7
Evapotranspiração	548,2	549,3
Evapotranspiração potencial	1.247,7	1.247,7
Percolação para o aquífero raso	302,78	306,73
Ascensão do aquífero raso	24,94	24,94
Fluxo lateral	0,98	0,98
Curva-Número	77,74	76,76
Recarga para o aquífero profundo	15,14	15,34

* Todas as unidades em mm.

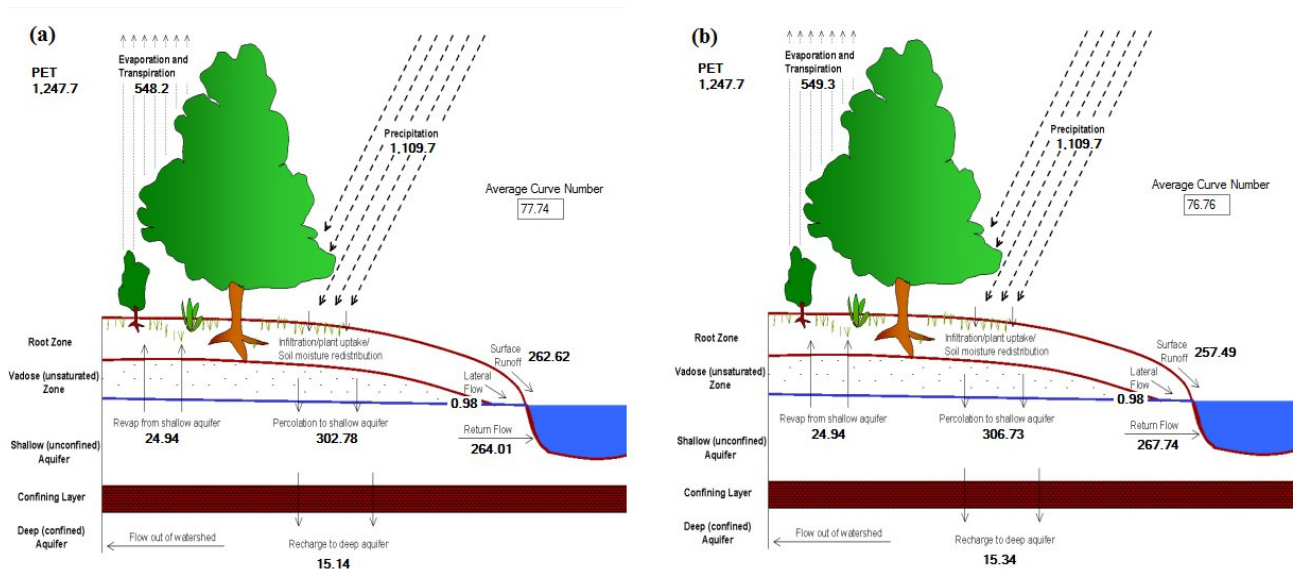


Figura 4. Representação dos processos simulados pelo modelo SWAT considerando o cenário C1 (a) e C2 (b).

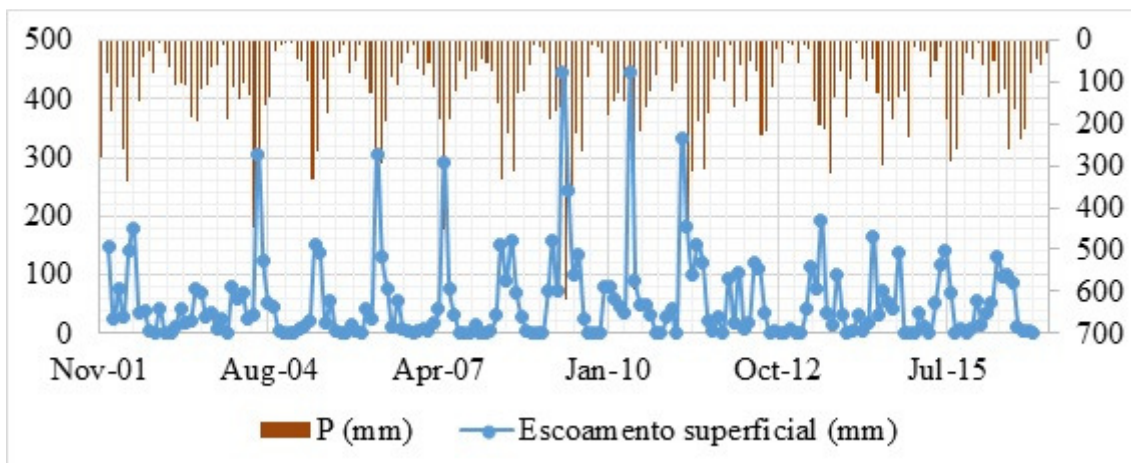


Figura 5. Escoamento superficial mensal simulado para a sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM no período de 2002 a 2016 e hietograma de precipitação na bacia, considerando o cenário C1.

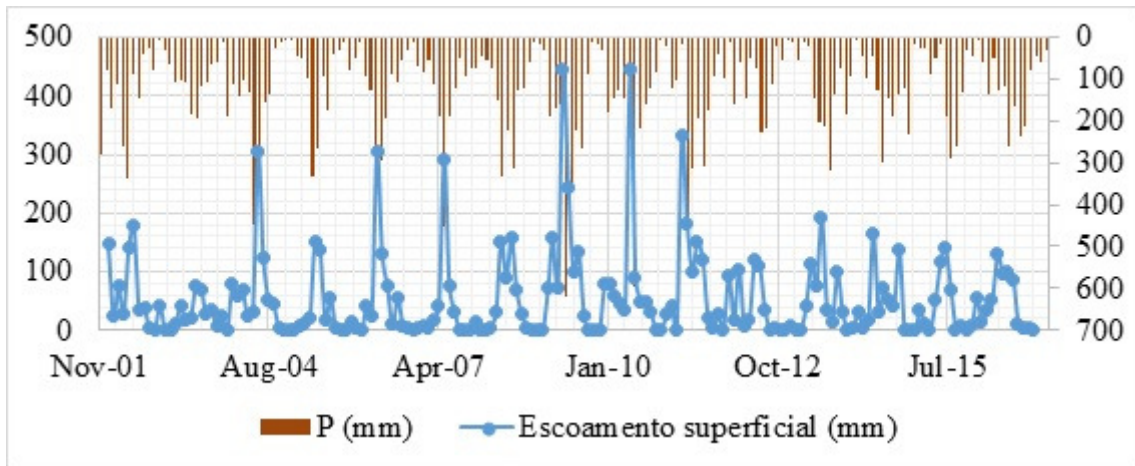


Figura 6. Escoamento superficial mensal simulado para a sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM no período de 2002 a 2016 e hietograma de precipitação na bacia, considerando o cenário C2.

As Figuras 5 e 6 apresentam o comportamento do escoamento superficial (valores médios mensais, em mm) durante o período estudado para os cenários C1 e C2, respectivamente.

As Figuras 7 e 8 apresentam os hidrograma de vazão mensal observado e simulado pelo modelo SWAT no período de 2002 a 2016 para os cenários C1 e C2, respectivamente.

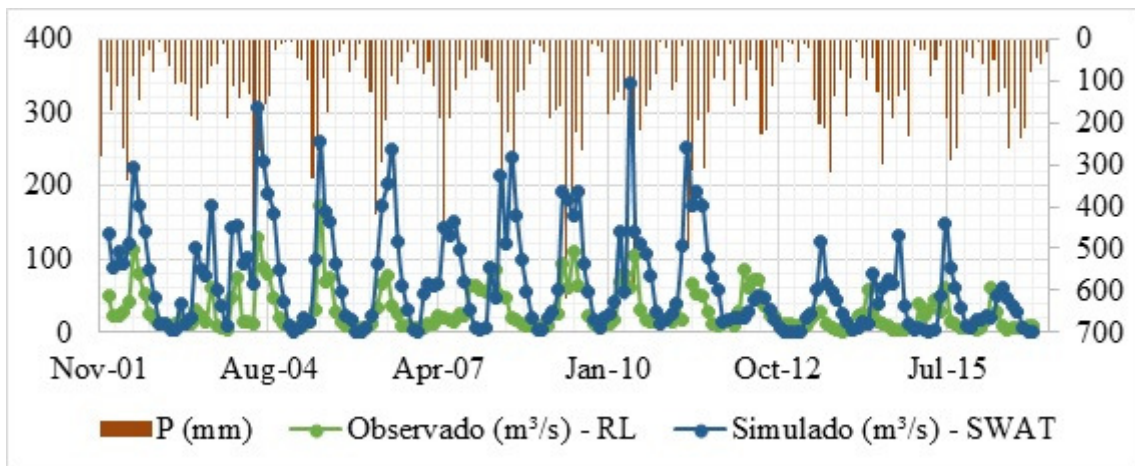


Figura 7. Hidrogramas observado e simulado mensais para a sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM no período de 2002 a 2016 e hietograma de precipitação na bacia, considerando o cenário C1.

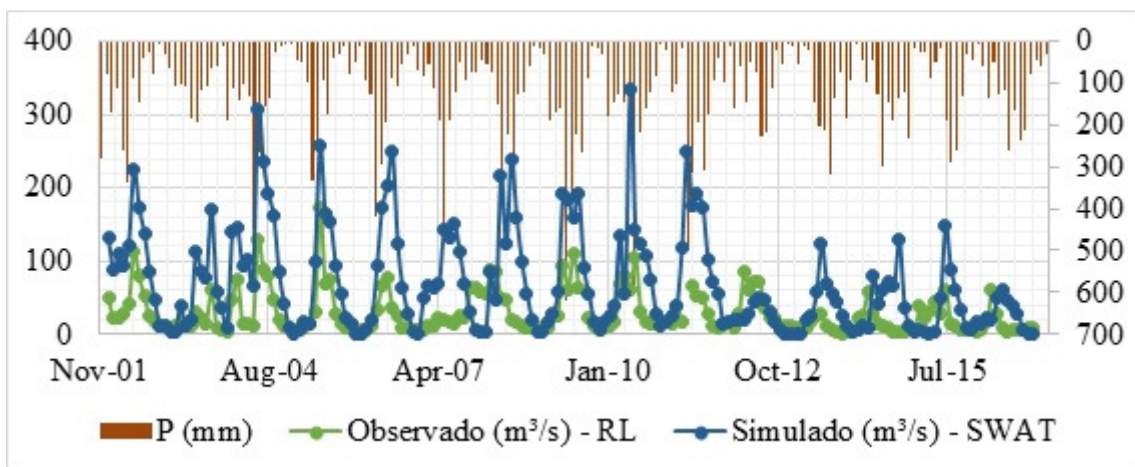


Figura 8. Hidrogramas observado e simulado para a sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-BHRM no período de 2002 a 2016 e hietograma de precipitação anual na bacia, considerando o cenário C2.

Analisando os dados medidos de vazão, o valor médio mensal observado da seção de monitoramento Rio Largo-AL, para o período entre 01/01/2002 e 31/12/2016, foi igual a $28,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto o valor médio dos dados simulados pelo modelo SWAT foi igual a $69,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o cenário C1. Para o cenário C2, o valor médio dos dados simulados pelo modelo SWAT foi igual a $69,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

É possível notar ainda que os picos de vazão observados são acompanhados pela simulação com o SWAT. A composição do comportamento da vazão é um indicativo de que o modelo provavelmente poderá ser calibrado em estudos futuros, uma vez que não foram observadas discrepâncias elevadas.

Discussão

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú encontra-se em um nível de vulnerabilidade alto, causado por diferentes aspectos, com destaque para o acentuado índice de desmatamento das matas e florestas, o que representa uma importante questão de dimensão ambiental (Araújo et al., 2015). A maior parte da bacia é desprovida de florestas e com expressiva extensão de atividades agropecuárias.

Cada área subdividida pelo modelo não deve ultrapassar 100 km^2 , uma vez que áreas maiores do que esse valor podem sofrer efeitos de escala, ou seja, diferentes usos e tipos de solo, alterações atmosféricas, diferenças na rede de drenagem, resultando em processos hidrológicos com comportamentos distintos (Krysanova et al., 1998).

Os mapas de tipos e uso do solo juntamente com o mapa de declividade, gerado anteriormente, fornecem as informações necessárias para que o modelo delimite as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's) (Winchell et al., 2010).

Os resultados de precipitação média da BHRM, evapotranspiração potencial e ascensão para o aquífero raso foram iguais para os dois cenários estudados, uma vez que os mesmos dependem de dados que não se alteram com a mudança da cobertura vegetal, como a precipitação e os dados meteorológicos. Como a ET potencial é calculada a partir de dados meteorológicos, a componente também não sofreu alterações com a modificação do uso do solo.

Percebe-se pelos diferentes valores de escoamento entre os cenários simulados, que o modelo SWAT apresentou sensibilidade ao simular o escoamento superficial na BHRM. Pode-se inferir que o reflorestamento nas nascentes da bacia, com a substituição de $6,35\%$ de área de agricultura por Caatinga Arbustiva, resultou em

uma diminuição de $1,95\%$ do escoamento gerado. As características consideradas para a vegetação Caatinga foram aquelas relacionadas com a classe Range Brush existente no banco de dados do SWAT, devido a sua proximidade em termos de características físicas, como por exemplo o índice de área foliar (IAF) de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, a relação biomassa/taxa de energia de $34 \text{ (kg/ha)/(MJ} \cdot \text{m}^{-2})$, temperatura ótima para o crescimento da planta de 25°C , altura máxima do dossel de 1 m , profundidade radicular máxima de 2 m , entre outros. De acordo com Munoz-Villers & McDonnell (2013) e Yan et al. (2013) a mudança no uso do solo é uma das principais causas da variação do escoamento superficial e vazão de uma bacia hidrográfica, devido às alterações provocadas na interceptação da precipitação, evapotranspiração e condutividade hidráulica do solo.

Outros autores também verificaram influência da modificação da cobertura vegetal do solo sobre o escoamento superficial e vazão em bacias hidrográficas: Blainski et al. (2011), aplicando o modelo SWAT à Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá para avaliar a influência das atividades agrícolas sobre a disponibilidade hídrica da bacia, verificaram que a vazão média foi maior no cenário com solo exposto, sendo esse aumento atribuído à redução da infiltração de água no solo e ao aumento do escoamento superficial. Lin et al. (2015) analisando os impactos das mudanças do uso do solo no escoamento da Bacia Hidrográfica do Rio Jinjiang na China, utilizando o modelo SWAT, encontraram alterações no escoamento da bacia, em decorrência do uso e cobertura do solo. Rodrigues et al. (2015) utilizando o SWAT para analisar a vazão na Bacia do Rio Pará, em Minas Gerais, Brasil, e avaliando o impacto provocado pelas alterações de uso do solo na disponibilidade hídrica da bacia, verificaram um incremento de cerca de 10% na vazão em função das alterações no uso do solo, contemplando basicamente a supressão da vegetação original para implantação de pastagem em 38% da bacia.

Com a diminuição do escoamento superficial na BHRM, era de se esperar que processos como percolação para o aquífero raso e recarga para o aquífero profundo aumentassem, devido a maior quantidade de água disponível para infiltração proporcionada pelo aumento da vegetação Caatinga. De fato, todos esses processos citados sofreram aumento com a mudança de cenário (de C1 para C2).

Houve um aumento da ET real com o aumento da vegetação Caatinga. De acordo com Tucci & Clarke (1997) e Bruijnzeel (1996) a maior quantidade de absorção da radiação solar e

consequentemente, a maior energia disponível para a evapotranspiração vem das florestas, o que explica a maior ET no cenário C2. Ainda segundo Viola (2008) a supressão da cobertura vegetal resulta na diminuição da evapotranspiração, uma vez que ocorre menor absorção da radiação e menor capacidade de retirar água do solo e interceptar a precipitação; isto conduz à diminuição do fluxo de água vertical e aumento do fluxo horizontal. A partir desses resultados, também se pode inferir que de toda a precipitação média da bacia, aproximadamente 50% retorna para a atmosfera por evaporação do solo e transpiração da superfície vegetal. Em relação a evapotranspiração real (ET) os resultados do modelo SWAT concordam com os de Gondim et al. (2015), que mediram a ET em área de pastagem na mesma bacia hidrográfica e encontraram um valor anual de 543,8 mm.

Mesmo havendo uma diferença muito pequena, percebe-se que com o aumento da porcentagem de vegetação Caatinga arbustiva-arbórea na BHRM (modificando o cenário C1 para o cenário C2), houve redução no valor médio de vazão simulado pelo modelo SWAT, corroborando com os resultados encontrados pelos estudos citados anteriormente (Blainski et al., 2011; Lin et al., 2015 e Rodrigues et al., 2015). De acordo com Tucci & Clarke (1997) e Bruijnzeel (1996) o reflorestamento pode provocar diminuição da vazão média de uma bacia hidrográfica. Segundo Blainski et al. (2011) em áreas com menor quantidade de vegetação há a tendência de aumento da vazão, devido à diminuição da infiltração da água no solo, causada pelo selamento da superfície terrestre devido ao impacto da gota de chuva sobre o solo descoberto.

Conclusão

Foi possível realizar adequada modelagem hidrológica com o modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, obtendo-se resultados para diferentes variáveis que regem os processos hidrológicos. As principais conclusões obtidas a partir deste estudo foram as seguintes:

1. De toda a precipitação média da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, aproximadamente 50% retorna para a atmosfera por evaporação do solo e transpiração da superfície vegetal;
2. Os processos hidrológicos associados ao uso do solo exercem influência no regime hidrológico da bacia hidrográfica;
3. A implantação de vegetação Caatinga em áreas agrícolas (6,35%) proporcionaram redução no escoamento superficial (1,95%). Por outro lado, processos como evapotranspiração, percolação para o aquífero raso e recarga para o aquífero profundo aumentaram; e

4. Estudos futuros podem ser aplicados a fim de realizar a calibração e validação do modelo SWAT na Bacia do Rio Mundaú, uma vez o modelo representa adequadamente os processos hidrológicos na bacia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE pela Bolsa de doutorado do primeiro autor (IBPG-0231-5.03/14 e BCT-0176-5.03/14 - Convênio APAC), ao CNPq pela Bolsa PQ do segundo, terceiro e quarto autores, aos Projetos PVE – CAPES (PVE aupex 2792/2013 proc 23038007733/2013-76, CNPq (Processo N. 446254/2015-0), ao Projeto REHIDRO/FINEP, CNPq (Processo N. 446254/2015-0) e ao projeto do Edital Universal do CNPq (448236/2014-1).

Referências

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Disponível em: www.apac.pe.gov.br.

ARAÚJO, M. S.; ARAÚJO, H. M.; SILVA JUNIOR, C. G. 2015. Indicadores socioambientais e aplicabilidade no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú-PE. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 1, p. 1-10.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. 2012. Input/Output Documentation version 2012. Texas Water Resources Institute-TR-439. 650p.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1.

BLAINSKI, E.; SILVEIRA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. 2011. Simulação de cenários de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. Agropecuária Catarinense, v. 24, n. 1.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 8 n. 3 p. 9-35.

- BRUIJNZEEL, L. A. 1996. Predicting the hydrological impacts of land cover transformation in the humid tropics: the need for integrated research. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. Amazonian deforestation and climate. Chichester, Inglaterra: J. Wiley, Cap.2.
- COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, v. 283, p. 206-217.
- GONDIM, P. S. S.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C.; SILVA, R. A. B.; GOMES, C. A. 2015. Environmental control on water vapour and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 3-8.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture*, v. 1, n. 1, p. 96-99.
- KRYSAKOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D. I.; BECKER, A. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological modelling*, v. 106, n. 2, p. 261-289.
- KUHNLE, R. A.; BINGER, R. L.; FOSTER, G. R.; GRISSINGER, E. H. 1996. Effect of land use changes on sediment transport. *Water Resources Research*, v. 32, p. 3189-3196.
- LIN, B.; CHEN, X.; YAO, H.; CHEN, Y.; LIU, M.; GAO, L.; JAMES, A. 2015. Analyses of land use change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators*, v. 58, p. 55-63.
- MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology*, v. 72, n. 3, p. 643-53.
- MUNOZ-VILLERS, L. E.; MCDONNELL, J. J. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrological Earth System Science*, v. 17, p. 3543-3560.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2005. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation version 2005. Temple: Blackland Research Center. 541p.
- PAUWELS, G. J. 2002. Atlas Geográfico Melhoramentos, 5ª Ed., Editora Melhoramentos, São Paulo.
- QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; SAMPAIO, G. 1996. Climatologia, precipitação e temperatura no período de 1986 a 1996. *Revista Climática*, Edição comemorativa de 10 anos, CPTEC/INPE.
- RALLISON, R. E.; MILLER, N. 1981. Past, present and future SCS runoff procedure. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Rainfall runoff relationship*. Littleton, USA: Water Resources Publication, pp. 353-364.
- RODRIGUES, E. L.; ELMIRO, M. A. T.; BRAGA, F. A.; JACOBI, C. M.; ROSSI, R. D. 2015. Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 1, p. 70-76.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. 1997. Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento: Revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, p. 135-152.
- VIOLA, M. R. 2008. Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2008. 120p.
- WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. 2010. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas. 431p.
- YAN, B.; FANG, N. F.; ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. 2013. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, v. 484, p. 26-37.