



**Simulação Hidrossedimentológica da Bacia  
Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brasil)**

Hydrossedimentological Simulation of the Quatorze River Watershed, Francisco Beltrão (Paraná, Brazil)

Jakcemara Caprario; Aline Schuck Rech; Guillermo Ney Caprario & Alexandra Rodrigues Finotti

*Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, Trindade. 88040-900 Florianópolis, Santa Catarina - Brasil  
E-mails: jakcemara@hotmail.com; aline.schuck@unc.br; gnc2001@gmail.com; alexandra.finotti@ufsc.br*

Recebido em: 25/11/2016      Aprovado em: 24/01/2017

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_1\\_102\\_114](http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_102_114)

## Resumo

O processo de erosão hídrica e o arraste dos sedimentos para os cursos d'água é um fenômeno natural que vem sendo agravado pelas práticas inadequadas de uso, ocupação e manejo do solo, favorecendo o desenvolvimento de graves impactos ambientais, sociais e econômicos. Dentro desta perspectiva, o objetivo deste estudo foi avaliar os processos hidrossedimentológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, utilizando o modelo hidrológico computacional SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*). Para atingir este objetivo utilizaram-se as seguintes metodologias: a) pesquisa de dados em referencial teórico específico da bacia; b) geração de banco de dados espaciais e tabulares e c) aplicação do Modelo SWAT para simulação da produção de sedimentos e do escoamento superficial. Os resultados obtidos a partir da simulação demonstraram a influência do uso e ocupação do solo sobre o processo erosivo, sendo geradas pequenas quantidades de sedimentos em áreas cobertas por floresta e grandes quantidades em áreas cobertas pela agricultura. A topografia também influenciou na produção de sedimentos, sendo que em bacias planas a perda de solo foi inferior comparada a relevos acidentados ou áreas íngremes. De uma forma geral, apesar das restrições dos dados e da não calibração, o modelo demonstrou ser relativamente eficaz, fornecendo informações de apoio para gestão ambiental de uso, ocupação e manejo do solo, reduzindo os impactos sobre os recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Produção de sedimentos; modelo hidrológico computacional; Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze

## Abstract

The process of water erosion and the sediment drag to watercourses is a natural phenomenon that has been compounded by inappropriate practices of use, occupation and soil management, favoring the development of serious environmental, social and economic impacts. From this perspective, the aim of this study was to evaluate the processes of hydrossedimentological Quatorze River Watershed using computational hydrological model SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*). To achieve this goal the following methodologies were used: a) research data on specific theoretical reference of the basin; b) generation of spatial and tabular database c) application of the SWAT model to simulate the sediment yield and runoff. The results from the simulation showed the influence of the use and occupation of the soil about the erosion process, it is generated small amounts of sediment in areas covered by forest and large quantities in areas covered by agriculture. The topography also influence the sediment yield, which in flat watershed soil loss was lower compared to rugged terrain or steep areas. In general, although the restrictions of data and no calibration, the model proved to be relatively effective, providing supporting information for environmental management of the use, occupation and management soil, reducing the impacts on water resources.

**Keywords:** Sediment yield; computational hydrological model; Quatorze River Watershed

## 1 Introdução

Em virtude do atual crescimento econômico e consequente desenvolvimento urbano das cidades brasileiras, vêm sendo observadas modificações constantes no uso e ocupação do solo, o que possivelmente poderá contribuir com a ocorrência de desastres naturais como inundações e deslizamento de encostas.

Segundo Tucci (2007) o processo de urbanização afeta o funcionamento do sistema natural da área a ser ocupada, alterando principalmente o regime hídrico pré-existente. Schueler (1987 *apud* Araujo *et al.*, 2013) menciona que as alterações no regime hídrico ocorrem principalmente em decorrência da limpeza de terrenos, de terraplanagens e de impermeabilizações da superfície do solo.

Após a instalação da cidade, os problemas no regime hídrico tendem a se expandir. As constantes impermeabilizações providas da construção de telhados, ruas, calçadas dentre outras, reduzem a área superficial destinada à infiltração, canalizando o fluxo hídrico em redes concentradas que facilitam a ocorrência de processos erosivos, principalmente nas margens dos rios (Araujo *et al.*, 2013; Misra, 2011).

Klein (1985 *apud* Araujo *et al.*, 2013) e Misra (2011) mencionam o aumento do volume e da vazão do escoamento superficial, a frequente ocorrência de enchentes de elevada magnitude, a erosão e assoreamento dos canais hídricos e a variação no regime de temperatura, como consequências geradas ao sistema aquático pelo processo de urbanização.

Araujo *et al.* (2013) destacam ainda a importância dos fatores intensidade e duração da precipitação, rugosidade do solo, comprimento e declividade da encosta, erodibilidade natural do solo e tipo de cobertura vegetal, para o controle dos processos erosivos, sejam eles de origem hídrica ou eólica.

A cobertura do solo é o fator de maior importância no controle da erosão, pois amortece o impacto da gota d'água na superfície do solo, evitando o início do processo erosivo (Silva *et al.*, 2007).

Lepsch (2010) afirma que a forma como o solo é manejado durante sua preparação para o cultivo influencia diretamente a sua capacidade erosiva,

aumentando ou diminuindo sua resistência a erosão conforme a presença de cobertura vegetal.

Segundo Galetti (1987), Bertoni & Neto (2008), Lepsch (2010) e Ozsoy & Aksoy (2015), a erosão do tipo hídrica é considerada a erosão mais comum e de maior importância. Guerra *et al.* (2009) afirmam que o processo de erosão hídrica tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, destacando-se em áreas com clima tropical, onde ocorre o agravamento do processo devido seus elevados índices pluviométricos em determinadas estações do ano.

A erosão hídrica pode ocorrer de quatro formas distintas: pelo impacto da gota da chuva (efeito *splash/ splash effect*), pela remoção da camada superficial do solo (erosão laminar/ *sheet erosion*), pela remoção de solo por canais superficiais bem definidos (erosão em sulcos ou ravinamento/ *rill erosion*) e pela remoção de solo em canais profundos (voçorocas/ *gully erosion*) (Bertoni & Neto, 2008; Araujo *et al.*, 2013 e Brandy & Well, 1996).

O início do processo erosivo do solo segundo Bertoni & Neto (2008) e Guerra *et al.* (2009) é dado pela ação do efeito *splash*. Segundo Araujo *et al.* (2013), esse efeito consiste no desprendimento de partículas do solo devido o impacto direto da gota de chuva com o solo exposto ou coberto por uma fina lâmina de água. Carvalho (2008) complementa mencionando que o impacto gerado pela gota da chuva afeta inicialmente, a estrutura superficial do solo exposto, facilitando o desprendimento das partículas que serão transportadas pelo escoamento superficial.

Para Guerra *et al.* (2009), o efeito *splash* prepara as partículas do solo para o transporte superficial, rompendo os agregados em tamanhos menores e salpicando estes em diferentes direções e distâncias. O salpicamento dessas partículas finas ocasionará o preenchimento dos poros superficiais, compactando a superfície do terreno, reduzindo a capacidade de infiltração da água e consequentemente promovendo um escoamento superficial difuso (Guerra *et al.*, 2009).

Segundo Lepsch (2010); Silva *et al.* (2007) e Brady & Well (1996), a erosão laminar é caracterizada pela remoção lenta e uniforme da camada fina da superfície irregular do solo pelo

escoamento superficial difuso. Este processo erosivo é de difícil percepção, sendo identificado apenas pela exposição das raízes das culturas, o que normalmente é considerado um processo natural por muitos agricultores e pecuaristas (Lepsch, 2010 e Bertoni & Neto, 2008). Segundo Guerra *et al.* (2009), quando identificado esse processo erosivo, as possibilidades de recuperação da área degradada são elevadas, pois o processo ainda se encontra em estágio inicial.

Quando o escoamento superficial difuso (*sheetflow*) sofrer intensificação, seja pela compactação do solo ou pela própria intensidade e duração da chuva, este convergirá para canais preferenciais resultantes das irregularidades existentes no terreno, concentrando-se e dando origem ao escoamento linear (*flowline*), fato este que resultará na formação dos primeiros sulcos (Guerra *et al.*, 2009; Brady & Well, 1996 e Lepsch, 2010).

Silva *et al.* (2007) e Araujo *et al.* (2013) mencionam que a erosão em sulco é caracterizada pelo transporte de partículas com diferentes tamanhos granulométricos, principalmente os mais grosseiros, sendo considerada mais preocupante que a erosão superficial laminar devido seu elevado grau de magnitude.

Segundo Bertoni & Neto (2008), Lepsch (2010) e Araujo *et al.* (2013), os sulcos quando em fase inicial, denominados sulcos rasos, podem ser desfeitos através da passagem de máquinas agrícolas, o que não acontece com sulcos em estado avançado, denominados sulcos profundos, que interrompem a atividade agrícola e interferem na produtividade do solo, sendo recuperados apenas por técnicas de nivelamento.

De acordo com Lepsch (2010), se os sulcos não forem recuperados desde o início de sua formação, estes irão se aprofundar, podendo dar origem a gigantescos rasgos nas encostas, denominados voçorocas, os quais segundo Brady & Well (1996), não podem ser removidos por práticas agrícolas convencionais.

Araujo *et al.* (2013) mencionam que a erosão formada de voçoroca possui tendência de se desenvolver onde há solo exposto e elevada concentração do escoamento superficial, ocorrendo principalmente em bacias hidrográficas agrícolas.

Para entender os processos erosivos, bem como os fenômenos envolvidos nestes, surgiu o estudo hidrossedimentológico que, segundo Lopes (2008 *apud* Bortolotto, 2011), nada mais é do que a interação entre o estudo da hidrologia e da sedimentologia. Tucci *et al.* (1997 *apud* Bortolotto, 2011) menciona que a hidrossedimentologia é caracterizada pelos processos de segregação, erosão, transporte, sedimentação e consolidação das partículas dentro de uma bacia hidrográfica.

A hidrossedimentologia é o estudo da relação água-sedimento, analisando desde o desprendimento e arraste das partículas pelo escoamento superficial (*runoff*), até sua deposição e assoreamento em rios, lagos e reservatórios (Carvalho, 2008).

Segundo Carvalho (2008), o estudo da sedimentologia no Brasil tem sido impulsionado nos últimos anos, devido os graves problemas oriundos do uso e manejo inadequado do solo, que vem sendo observados principalmente nas regiões Centro e Sul do País, onde há maior concentração populacional. Silva *et al.* (2007) e Müller (1995 *apud* Lino, 2009), complementam mencionando que os problemas hidrossedimentológicos se agravam devido à crescente e agressiva ocupação do solo, ignorando os possíveis impactos oriundos de projetos mal planejados e/ou executados.

Vestena *et al.* (2007 *apud* Rodrigues, 2011) e Uzeika *et al.* (2012) asseguram a importância do estudo hidrossedimentológico de bacias hidrográficas, a fim de caracterizar a relação entre as ações antrópicas e os recursos naturais, quantificando os impactos do manejo inadequado do solo em pequenos intervalos de tempo.

Carvalho (2008) menciona a complexidade desse estudo, sendo necessário considerar apenas algumas das variáveis influenciadoras do processo, a fim de obter uma previsão extrapolada da erosão e deposição das partículas. Carvalho (2008) ainda cita a inexistência de métodos auxiliares confiáveis, sendo necessária a aplicação de modelagens matemáticas baseadas em poucas variáveis, dificultando o completo entendimento do estudo.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar a hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (PR), por meio de um modelo hidrológico SWAT,

analisando a influência dos fatores uso e manejo do solo, topografia e índices pluviométricos sobre o processo erosivo laminar.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo e Dados de Entrada

A Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze possui uma área de 104,02 km<sup>2</sup> e perímetro de 67,14 km, situada entre as coordenadas 53°04'08" e 53°16'15"W e 26°04'67" e 26°09'56"S, no município de Francisco Beltrão no Sudoeste do Estado do Paraná, conforme apresentado na Figura 1.

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo foi utilizado uma composição RGB das bandas 2, 3 e 4 da imagem do satélite LANDSAT\_5\_TM, com resolução de 30 m (metros), datada em 07 de agosto de 2011. Para este estudo foram consideradas

cinco classes de uso e ocupação do solo, sendo estas: vegetação, água, pastagem, urbanização e solo exposto (incluindo estradas vicinais). O número de amostras coletadas de cada classe foi variável, sendo proporcional a sua representação na imagem. Após a coleta de amostras a imagem foi classificada utilizando o método de Máxima Verossimilhança (MAXVER).

Os tipos de solos encontrados na bacia foram LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, NITOSSOLO VERMELHO Distroférico, NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico e NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico, sendo o mapa de tipos de solo construído a partir da importação de dados matriciais e vetoriais gerados por Tomazoni (2010) no programa Spring, baseados na classificação feita pela EMBRAPA.

A Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze é caracterizada por um clima mesotérmico temperado, com chuvas bem distribuídas durante todo o ano e

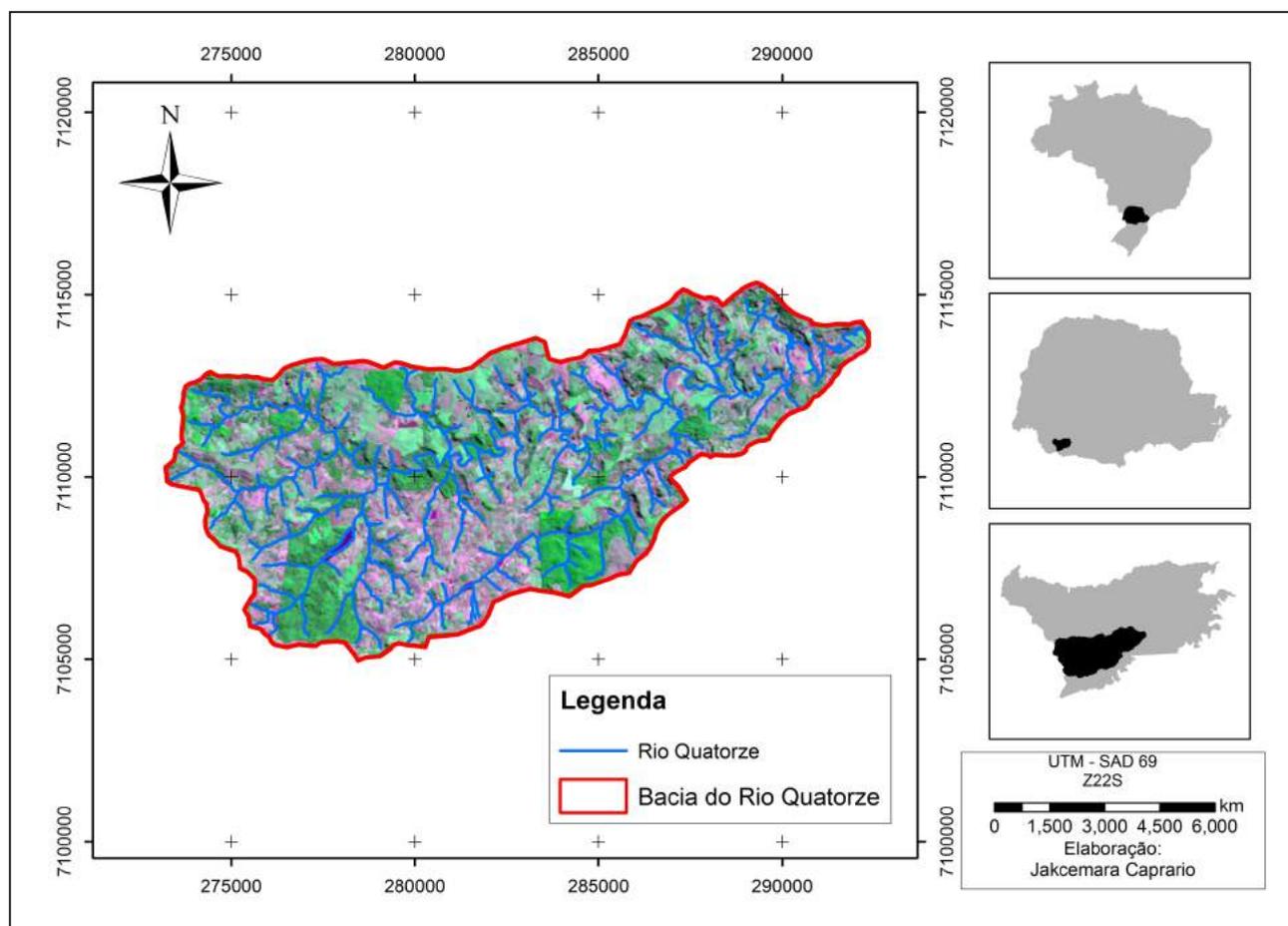


Figura 1 Localização da Bacia do Rio Quatorze no cenário municipal, estadual e nacional.

verões quentes, sendo classificada como clima Cfa segundo Köppen (Maack, 1981 *apud* Aguiar, 2012). A pluviosidade na Bacia, assim como em toda a região de Francisco Beltrão, oscila entre 2000 e 2500 mm, e a temperatura média varia de 13,9°C a 26°C (IAPAR, 2012a e IAPAR, 2012b). Os dados climáticos requeridos para a simulação são de ordem diária e foram obtidos da estação meteorológica do IAPAR instalada em Francisco Beltrão. A importação dos dados climáticos foi realizada por meio da ferramenta “*Weather Station*”, sendo que os dados inseridos foram: precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. O período de abrangência dos dados climáticos utilizados foi de 01/01/2011 a 31/12/2011, totalizando um ano.

## 2.2 O Modelo SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) é um modelo hidrológico computacional desenvolvido para prever impactos das práticas de manejo do solo sobre o balanço hídrico, a produção de sedimentos e o carreamento de produtos químicos agrícolas em bacias hidrográficas (Arnold *et al.*, 1998 e Neitsch *et al.*, 2002).

Segundo Lino (2009) a simulação hidrológica realizada pelo modelo SWAT é dividida em duas grandes fases: a fase terrestre e a fase de propagação do ciclo hidrológico.

A fase terrestre pode ser subdividida segundo Lino (2009) em sete componentes: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas. Já a fase de propagação do ciclo hidrológico é subdividida segundo o mesmo em duas componentes: propagação do canal principal e propagação no reservatório. Como o intuito deste estudo foi simular a hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, abordou-se apenas às componentes hidrologia e sedimentos da fase terrestre.

### 2.2.1 Hidrologia

A componente hidrologia é a base para a simulação da produção de água superficial, sendo sua modelagem hidrológica regida pela equação do balanço hídrico (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*,

2002; Marchioro, 2008; Bonumá *et al.*, 2009; Lino, 2009; Bortolotto, 2011; Castro, 2013), representada pela equação abaixo:

$$SW_t - SW_0 = \sum_{i=1}^t (R_i - Qs_i - ET_i - w_i - Qgw_i) \quad (1)$$

Onde:  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo (mm);  $SW_0$  é a quantidade inicial de água no solo (mm);  $R_i$  é o total diário precipitado (mm);  $Qs_i$  é o total diário de escoamento superficial (mm);  $ET_i$  é o total diário de evapotranspiração (mm);  $w_i$  é o total diário percolado (mm) e  $Qgw_i$  é a vazão de retorno diária (mm).

O escoamento superficial é calculado por meio do método da Curva Número (CN - *Curve Number*). Segundo Rallison & Miller (1982 *apud* Neitsch *et al.*, 2002) este método foi desenvolvido na década de 1950, visando estimar o escoamento superficial de pequenas bacias rurais nos EUA, a partir dos mais variados tipos e usos do solo. A equação que rege o método da Curva Número mencionada por Arnold *et al.* (1998), Neitsch *et al.* (2002), Lino (2009), Bortolotto (2011) e Castro (2013) é dada por:

$$Q = \frac{(R-0,2S)^2}{R+0,8S} \quad (2)$$

Onde:  $Q$  é o escoamento superficial diário (mm);  $R$  é a precipitação diária (mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção de hidráulica que varia de acordo com a declividade, tipos, usos e manejo do solo. Segundo Arnold *et al.* (1998), Neitsch *et al.* (2002) e Bortolotto (2011) o parâmetro de retenção hidráulica é obtido por meio da relação com o número de deflúvio (CN), sendo expresso pela relação abaixo:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$

Onde: CN (número de deflúvio) é um valor adimensional que variar entre 1 (cobertura muito permeável) e 100 (cobertura completamente impermeável), dependendo da umidade, tipos e usos do solo.

Para cálculo da vazão de pico o modelo utiliza o Método Racional Modificado, que segundo Neitsch *et al.* (2002) é amplamente utilizado na construção de valas, canais e sistemas de controle

de águas pluviais. O mesmo ainda descreve vazão de pico como um indicador da capacidade erosiva, sendo muito usado para prever perdas de sedimento. A equação que rege o Método Racional Modificado é apresentada a seguir:

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot A}{3.6} \quad (4)$$

Onde:  $q_{peak}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial;  $i$  é a intensidade de chuva ( $mm/h$ );  $A$  é a área das sub-bacias ( $km^2$ ) e 3,6 é um fator de conversão de unidades.

## 2.2.2 Sedimentos

A produção de sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze foi estimada por meio da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*). Esta equação segundo Lino (2009) é a versão modificada da Equação Universal de Perda de Solos (USLE – *Universal Soil Loss Equation*) desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), e tem como objetivo simular a erosão bruta e a produção de sedimentos a partir do escoamento superficial, representando assim a energia utilizada na desagregação e transporte de sedimentos. Segundo o mesmo autor, a modificação na equação trouxe alguns benefícios, como eliminação da taxa de transporte, uso em eventos isolados e maior precisão no modelo.

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada utilizada pelo modelo SWAT é apresentada pela equação a seguir:

$$sed = 11,8 \cdot (Q \cdot q_{peak} \cdot A)^{0,56} \cdot K \cdot C_{usle} \cdot P \cdot LS \cdot CRFG \quad (5)$$

Onde:  $sed$  é a produção de sedimentos na bacia ( $t/dia$ );  $Q$  é o escoamento superficial para a bacia ( $mm/ha$ );  $q_{peak}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $A$  é a área da bacia ( $ha$ );  $K$  é o fator de erodibilidade do solo;  $C_{usle}$  é o fator de cobertura e manejo do solo (adimensional);  $P$  é o fator de práticas conservacionistas (adimensional),  $LS$  é o fator de topografia (comprimento e inclinação da rampa) e  $CRFG$  é o fator de fragmento grosseiro (rochas).

O fator de erodibilidade do solo segundo Neitsch *et al.* (2002) é determinado pela equação

apresentada a seguir, desenvolvida por Wischmeier *et al.* (1971).

$$K = \frac{0,00021 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2,5 \cdot (C_{perm} - 3)}{100} \quad (6)$$

Onde:  $K$  é o fator de erodibilidade do solo;  $M$  é o parâmetro de tamanho das partículas;  $OM$  é a matéria orgânica (%);  $C_{soilstr}$  é o código da estrutura do solo e  $C_{perm}$  é a permeabilidade do perfil.

O código da estrutura do solo (Tabela 1) e a permeabilidade do perfil (Tabela 2) são características tabeladas presentes no banco de dados do modelo SWAT. O fator de cobertura e manejo do solo é definido segundo Lino (2009) como a taxa de perda de solo durante o ciclo de crescimento da planta, sendo determinado pela equação a seguir:

$$c_{usle} = \exp\{[\ln(0,8) - \ln(C_{uslemn})] \cdot \exp[-0,00115 \cdot rsd_{surf}] + \ln[C_{uslemn}]\} \quad (7)$$

Onde:  $C_{usle}$  é o fator de cobertura e manejo do solo;  $C_{uslemn}$  é o valor mínimo para o fator e  $rsd_{surf}$  é a quantidade de resíduo na superfície do solo ( $kg/ha$ ). O valor mínimo do fator de cobertura é obtido pela equação apresentada abaixo:

$$c_{uslemn} = 1,463 \cdot \ln(c_{usleaa}) + 0,1034 \quad (8)$$

Onde:  $C_{usleaa}$  é o fator médio anual de cobertura e manejo do solo.

Segundo Wischmeier & Smith (1978) o fator de práticas conservacionistas, expressa a relação entre a intensidade de perdas de solo quando uma prática conservacionista é empregada, e quando a cultura está plantada no sentido do declive. A Tabela 3 apresenta a relação entre as declividades do terreno e os valores do fator prática conservacionista utilizado pelo modelo.

O fator comprimento e inclinação da rampa (fator topografia) segundo Marchioro (2008) é calculado pelo modelo hidrológico SWAT utilizando a equação apresentada abaixo:

$$LS = \left(\frac{L}{22,1}\right)^m \cdot (65,41 \cdot \text{sen}^2(\alpha) + 4,56 \cdot \text{sen} \alpha = 0,065) \quad (10)$$

Onde:  $L$  é o comprimento da encosta ( $mm$ );  $m$  é o fator exponencial e  $\alpha$  é o ângulo da declividade da encosta ( $^\circ$ ).

Para finalizar, o modelo hidrológico SWAT calcula o fator de fragmento grosseiro do solo utilizando a equação a seguir:

$$CFRG = \exp(-0,053 \cdot rock) \quad (11)$$

Onde: rock é a quantidade de cascalho presente na primeira camada do solo (%).

| C <sub>soilstr</sub> | Definição para Cada Solo |
|----------------------|--------------------------|
| 1                    | Grãos muito finos        |
| 2                    | Grãos finos              |
| 3                    | Grãos médios ou grossos  |
| 4                    | Blocos, placas.          |

Tabela 1 Código da estrutura do solo (C<sub>soilstr</sub>).  
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2002).

| C <sub>perm</sub> | Condutividade Hidráulica Saturada |
|-------------------|-----------------------------------|
| 1                 | Rápido (>150 mm/h)                |
| 2                 | Moderado a rápido (50-150 mm/h)   |
| 3                 | Moderado (15-50 mm/h)             |
| 4                 | Lento a moderado (5-15 mm/h)      |
| 5                 | Lento (1-5 mm/h)                  |
| 6                 | Muito lento (< 1 mm/h)            |

Tabela 2 Permeabilidade do solo (C<sub>perm</sub>).  
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2002).

| Declividade do Solo (%) | P    |
|-------------------------|------|
| 1 a 2                   | 0,60 |
| 3 a 5                   | 0,50 |
| 6 a 8                   | 0,50 |
| 9 a 12                  | 0,60 |
| 13 a 16                 | 0,70 |
| 17 a 20                 | 0,80 |
| 21 a 25                 | 0,90 |

Tabela 3 Fator prática conservacionista (P).  
Fonte: Adaptado de Wischmeier & Smith (1978).

### 2.3 Calibração do Modelo

Segundo Bravo *et al.* (2007) e Shawul *et al.* (2013) a calibração consiste em uma técnica de otimização dos parâmetros do modelo hidrológico, buscando adequar os dados simulados com os dados reais. Esta técnica pode ser realizada de forma manual, pelo próprio usuário, ou automática, utilizando *softwares* complementares.

Segundo Marchioro (2008) para a calibração do modelo SWAT, é necessário um banco de dados climático, vazão e concentração de sólidos em suspensão monitorados por um período de no mínimo 5 a 10 anos, visando assim minimizar os erros durante a calibração. Arnold *et al.* (1998) complementa afirmando que caso não existam informações de qualidade disponíveis para a calibração, deve-se dispensar esta etapa, pois esta não é requerida pelo modelo para realizar a simulação.

Uzeika (2009) e Castro (2013) afirmam em seus estudos que o modelo SWAT sem calibração apresentou um bom desempenho na estimativa do escoamento superficial, vazões líquidas e evapotranspiração. Já na simulação de produção de sedimentos não obtiveram resultados satisfatórios, pois os valores simulados foram subestimados.

Desta forma, para realizar a simulação hidrossedimentológica desta Bacia Hidrográfica, foi dispensada a calibração do modelo, devido à bacia não ser instrumentada, faltando dados monitorados de vazão pelo período mínimo requerido.

### 3 Resultados e Discussão

Como resultado da simulação obteve-se a distribuição espacial do tipo e uso do solo, do escoamento superficial anual e da produção anual de sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze - Francisco Beltrão (PR). O modelo SWAT segregou a bacia em 18 sub-bacias com base nas características de elevação do terreno, mantendo como referência a ramificação principal do corpo d'água, conforme apresentado na Figura 2. Segundo Arnold *et al.* (2011) a segregação da bacia em sub-bacias garante a distribuição espacial dos parâmetros declividade, uso do solo e tipos de solo, preservando a homogeneidades das características da bacia.

A Tabela 4 apresenta a distribuição das classes de uso e ocupação do solo, assim como as classes de tipos de solos segundo a classificação da Embrapa, para cada sub-bacia do Rio Quatorze, simuladas pelo modelo hidrológico SWAT.

O uso e ocupação do solo está dividido em cinco classes, sendo estas: água, solo exposto, floresta, agricultura e urbanização. Para as sub-bacias 3, 12, 13 e 18 a classe de uso e ocupação do solo que predomina é o solo exposto, representando 37,13%, 53,94%, 53,20% e 42,46%, respectivamente. Já para

as sub-bacias 1, 6, 15, 16 e 17, a classe predominante é floresta, representando 38,85%, 38,89%, 40,97%, 37,47% e 56,58%, respectivamente. As sub-bacias 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 e 14 são ocupadas em sua grande maioria pela classe agricultura, sendo representadas por 44,70%, 44,35%, 49,44%, 42,81%, 46,27%, 44,51%, 38,63%, 40,47% e 35,72%, respectivamente.

As classes, água e urbanização não predominaram em nenhuma das sub-bacias sendo representadas por no máximo 1,58%, na sub-bacia 13 e 3,45%, na sub-bacia 1, respectivamente.

Com relação à classificação dos tipos de solo, a classe que apareceu com maior frequência foi o LATOSSOLO, representando aproximadamente de 56% de toda a Bacia do Rio Quatorze. As sub-bacias que apresentaram predomínio da classe do tipo LATOSSOLO foram: 2, 3, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 17 e 18. Já a classe de solo do tipo NEOSSOLO foi a segunda com maior frequência, representando cerca de 33% de toda a bacia. As sub-bacias que compuseram esta classe de tipo de solo foram: 1, 6, 7, 10, 15 e 16. A classe de solo do tipo NITOSSOLO predomina apenas as sub-bacias 11 e 14, representando cerca de 11% da bacia total.

O escoamento superficial simulado pelo SWAT para a Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze

variou de 140,6 a 809,3 mm durante o ano de 2011. As sub-bacias que apresentaram maior escoamento superficial foram a 2 e a 4, variando de 512,2 a 809,3 mm por ano. Este elevado escoamento superficial pode ser explicado pelo fato do solo das sub-bacias serem do tipo LATOSSOLO e o uso e ocupação predominante nestas áreas ser a agricultura. Segundo Ruthes *et al.* (2012) solos com textura argilosa ou muito argilosa como os LATOSSOLOS, tendem a uma maior agregação das partículas causando selagem da cobertura do solo, o que diminui a capacidade de infiltração e conseqüentemente aumenta o escoamento superficial. O uso do solo pela agricultura pode influenciar no aumento do escoamento superficial, devido à aplicação de práticas inadequadas de manejo durante a preparação para o cultivo (Lepsch, 2010).

As sub-bacias 6, 15, 16 e 17 apresentaram os menores valores de escoamento superficial variando de 140,6 a 154,6 mm. Isto pode ser evidenciado visto que a cobertura do solo predominante nestas sub-bacias pertence à classe floresta, incluindo desde áreas de reflorestamento até mesmo remanescentes da Mata Atlântica.

A sub-bacia 3 apresentou escoamento super-

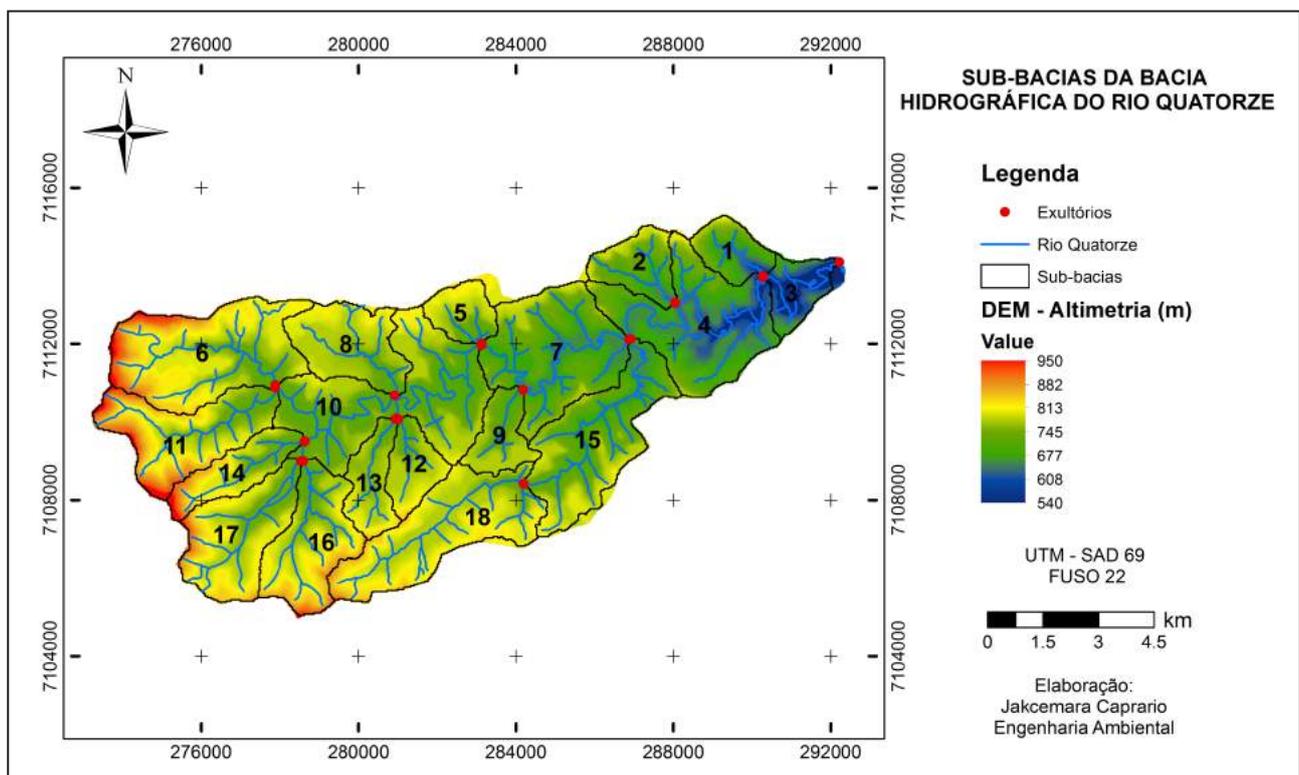


Figura 2 Sub-bacias do Rio Quatorze e seus respectivos exultórios.

| Sub-Bacias | Uso do Solo (%) |              |          |             |             | Tipo de Solo |
|------------|-----------------|--------------|----------|-------------|-------------|--------------|
|            | Água            | Solo Exposto | Floresta | Agricultura | Urbanização |              |
| 1          | 1,26            | 19,86        | 38,85    | 36,58       | 3,45        | NEOSSOLO     |
| 2          | 0,74            | 22,37        | 30,28    | 44,70       | 1,91        | LATOSSOLO    |
| 3          | 1,12            | 37,13        | 26,79    | 34,49       | 0,46        | LATOSSOLO    |
| 4          | 0,93            | 26,13        | 27,08    | 44,35       | 1,50        | LATOSSOLO    |
| 5          | 0,91            | 32,89        | 15,52    | 49,44       | 1,24        | LATOSSOLO    |
| 6          | 0,27            | 21,58        | 38,89    | 38,44       | 0,82        | NEOSSOLO     |
| 7          | 0,42            | 30,32        | 25,38    | 42,81       | 1,08        | NEOSSOLO     |
| 8          | 0,43            | 15,27        | 37,60    | 46,27       | 0,43        | LATOSSOLO    |
| 9          | 0,04            | 30,57        | 23,23    | 44,51       | 1,66        | LATOSSOLO    |
| 10         | 0,55            | 24,12        | 35,65    | 38,63       | 1,04        | NEOSSOLO     |
| 11         | 0,26            | 30,08        | 26,68    | 40,47       | 2,51        | NITOSSOLO    |
| 12         | 0,57            | 53,94        | 17,01    | 26,25       | 2,23        | LATOSSOLO    |
| 13         | 1,58            | 53,20        | 14,80    | 27,67       | 2,75        | LATOSSOLO    |
| 14         | 0,05            | 27,32        | 34,78    | 35,72       | 2,13        | NITOSSOLO    |
| 15         | 0,80            | 25,13        | 40,97    | 32,53       | 0,56        | NEOSSOLO     |
| 16         | 0,04            | 34,25        | 37,47    | 26,48       | 1,76        | NEOSSOLO     |
| 17         | 3,72            | 24,88        | 56,58    | 13,94       | 0,88        | LATOSSOLO    |
| 18         | 1,03            | 42,46        | 29,52    | 25,04       | 1,96        | LATOSSOLO    |

Tabela 4 Tipo e uso do solo para cada sub-bacia do Rio Quatorze.

ficial diferencial, sendo a única com variação estimada entre 437,5 e 512,2 mm. Esta sub-bacia está localizada na foz da Bacia do Rio Quatorze, recebendo todo o escoamento superficial gerado. O tipo de solo predominante nesta sub-bacia é o LATOSSOLO, sendo seu uso classificado como solo exposto, devido ao seu recente processo de urbanização. As sub-bacias 12, 13 e 18 apresentaram as mesmas características do solo da sub-bacia 3, sendo diferenciadas desta apenas pelo escoamento superficial, que varia de 154,6 a 192,9 mm.

As sub-bacias 11 e 14 apresentaram escoamento superficial variando entre 192,9 e 263,7 mm, tendo o uso do solo classificado como predomínio de agricultura. Estas sub-bacias possuem como característica diferencial o tipo de solo predominante, sendo as únicas representantes do NITOSSOLO.

As outras sub-bacias encontram-se classificadas quanto ao escoamento superficial na faixa que varia de 263,7 a 437,5 mm. Estas sub-bacias apresentam uso do solo com predomínio agrícola (excetuando a sub-bacia 1 que é floresta), diferenciando-se pelo tipo de solo dominante, sendo estes representados por LATOSSOLO (sub-bacias 5, 8 e 9) e NEOSSOLO (sub-bacias 1,7 e 10).

A produção de sedimentos simulada pelo SWAT variou de 4,75 a 264,67 t/ha durante o ano

de 2011. A sub-bacia 2 apresentou a maior produção de sedimentos durante o período simulado, fato este que pode ter ocorrido devido seu elevado escoamento superficial, que segundo Pruski (2009 *apud* Bortolotto, 2011) e Ben-Hur *et al.* (2011) favorece o desprendimento das partículas do solo por meio de tensões cisalhantes. A falta de cobertura vegetal densa (uso agrícola) segundo Bortolotto (2011) pode colaborar com este processo, diminuindo a resistência da passagem da água, e consequentemente reduzindo a infiltração.

As sub-bacias 12, 13, 17 e 18 apresentaram os menores valores de produção de sedimentos, variando na faixa de 4,75 a 7,72 t/ha. Este fato pode ser explicado pelo baixo escoamento superficial que varia de 140,6 a 192,9 mm. O uso do solo para as sub-bacias 12, 13 e 18 foi classificado como solo exposto, no entanto esta classificação não influenciou de forma significativa a produção de sedimentos, pois a declividade do terreno nestas áreas varia entre 0 e 15% (terreno plano), sendo o tipo de solo classificado como LATOSSOLO. Já a sub-bacia 17 apresenta predomínio de floresta, justificando de forma complementar a baixa produção de sedimentos.

Para as sub-bacias 4, 7 e 10 a produção de sedimentos variou de 112,05 a 211,27 t/ha, sendo

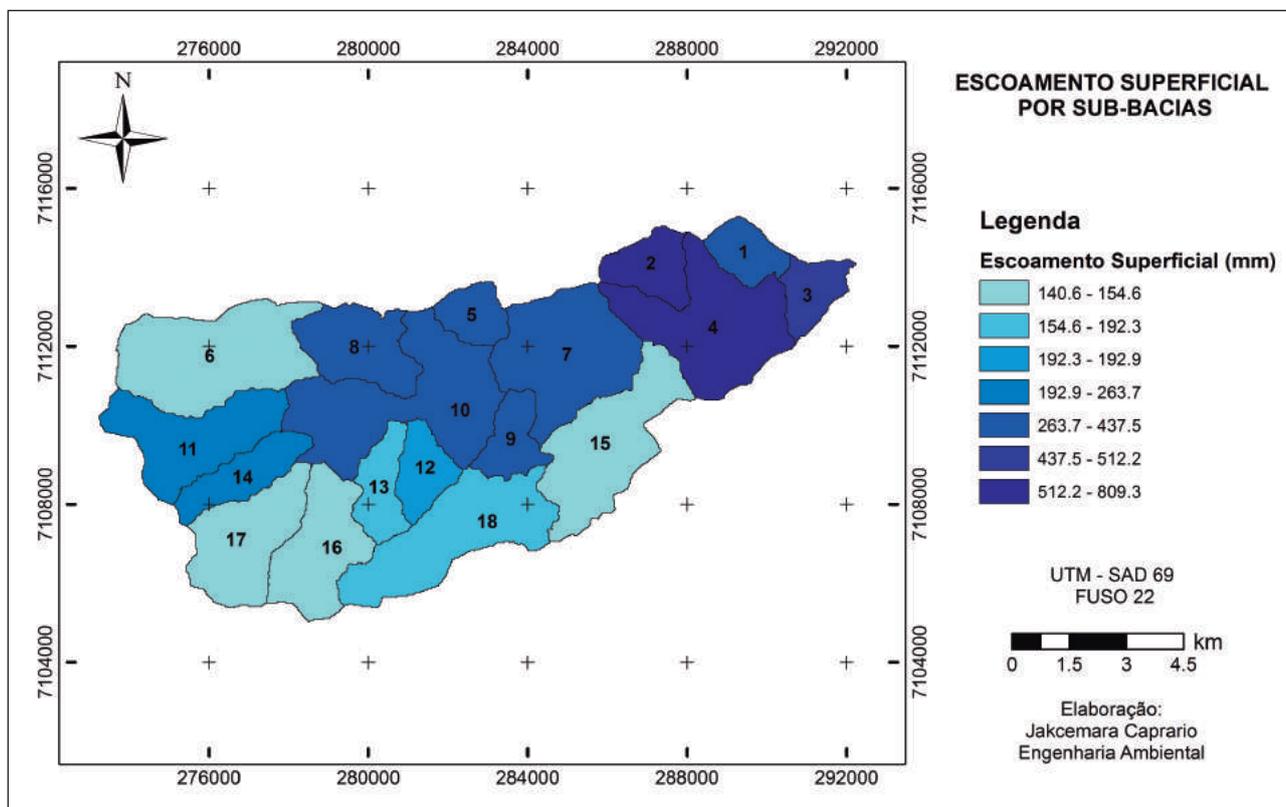


Figura 3 Distribuição espacial do escoamento superficial das sub-bacias do Rio Quatorze para o ano de 2011.

a segunda faixa maior em produção. A cobertura do solo das sub-bacias 7 e 10 é predominada pela agricultura, o que juntamente com o escoamento superficial explica a alta produção de sedimentos. Já para a sub-bacia 4 os fatores de relevância na produção de sedimentos foram: a declividade que variou de 0 a 45% (plano a forte ondulado) e o elevado escoamento superficial (263,7 - 437,5 mm).

As sub-bacias 3, 6 e 16 apresentaram a segunda menor produção de sedimentos da bacia, variando entre 7,72 e 35,10 t/ha. Para as sub-bacias 6 e 16 este fato pode ser explicado pelo baixo escoamento superficial (140,6 - 154,6 mm), sendo que o mesmo não serve de regra para a sub-bacia 3, visto que sua produção de escoamento superficial é elevada, justificando-se assim pela baixa declividade do terreno (0 - 15%).

As outras sub-bacias apresentaram valores médios de produção de sedimentos, variando entre 35,10 e 112,05 t/ha. Para as sub-bacias 5, 8, 9, 11 e 14 este fato pode ser explicado pela combinação uso do solo agrícola e escoamento superficial médio, variando de 182,3 a 437,5%. Para as sub-bacias 1 e 15 a produção de sedimentos média pode ser justificada

pela combinação de altas declividade e ocupação do solo com florestas. A Figura 3 ilustra a distribuição espacial do escoamento superficial (mm) produzido no ano de 2011 nas sub-bacias do Rio Quatorze.

A Figura 4 ilustra a distribuição espacial da produção de sedimentos (t/ha) nas sub-bacias do Rio Quatorze - Francisco Beltrão (PR), no ano de 2011.

A Figura 5 ilustra a relação entre os dados simulados de produção de sedimentos [t/ha] e escoamento superficial [mm] e os dados de precipitação [mm] observados.

Analisando a Figura 4 constata-se que o escoamento superficial simulado acompanha os picos de precipitação obtidos em campo, aferindo ao modelo um desempenho aceitável. Cabe uma ressalva ao mês de agosto, onde o modelo simulou uma redução do escoamento superficial, sendo que a precipitação neste mês aumentou. Fato este justificado pela ausência de calibração e pela série de dados utilizada ser de apenas 1 ano, impossibilitando a aferição dos dados simulados. Já para os dados de produção de sedimentos, a simulação apresentou um ótimo desempenho, acompanhando todos os picos

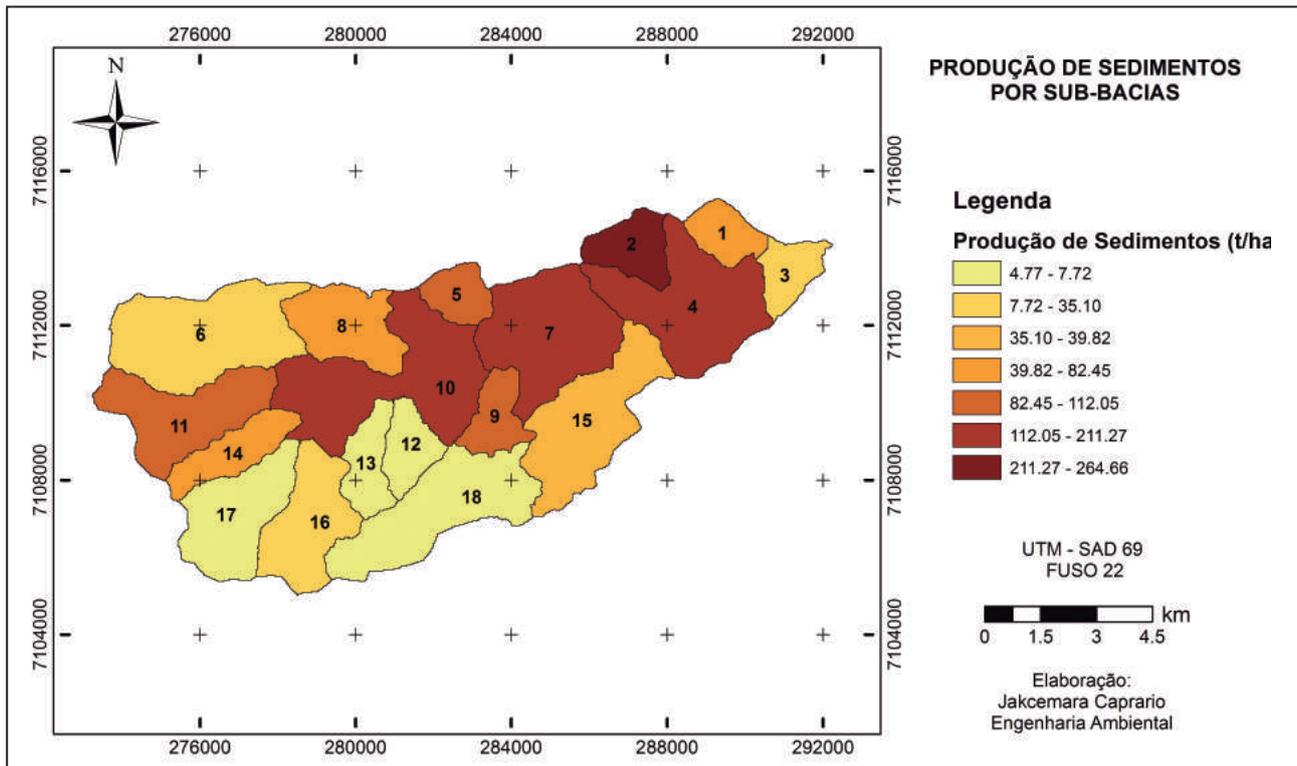


Figura 4 Distribuição espacial da produção de sedimento nas sub-bacias do Rio Quatorze para o ano de 2011.

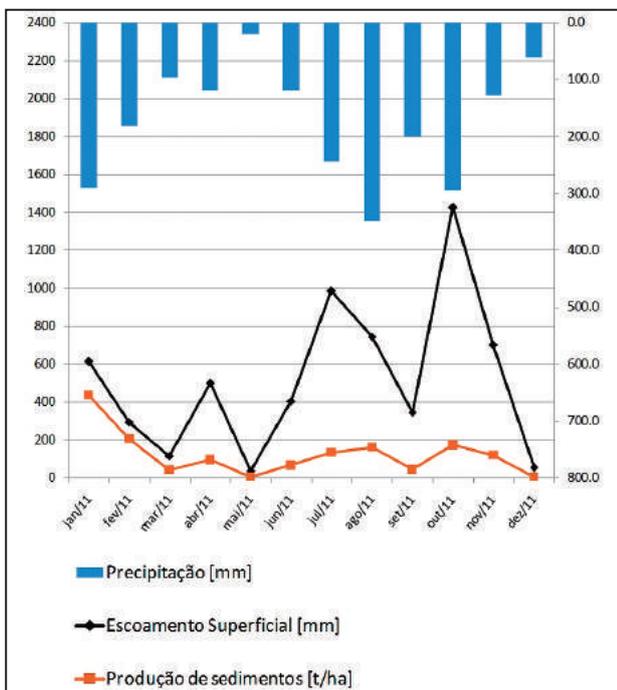


Figura 5 Relação entre produção de sedimentos, escoamento superficial e precipitação.

de precipitação, obtendo dados simulados próximos aos encontrados em áreas com características semelhantes e passíveis de calibração, como no estudo desenvolvido por Uzeika *et al.* (2012).

Cabe ressaltar ainda que os dados de escoamento superficial e produção de sedimentos do mês de janeiro parece ter sido subestimado, fato que pode ser justificado pela série de dados históricos ter início em 01 de janeiro 2011, não havendo período de aquecimento o que, segundo Collischonn (2001), nada mais é do que a atenuação dos efeitos das condições iniciais.

#### 4 Conclusão

As classes de uso e ocupação do solo demonstraram estar influenciando quase que diretamente os processos hidrossedimentológicos da bacia em estudo, visto que as sub-bacias ocupadas em sua grande maioria por florestas apresentaram as menores produções de sedimentos e as sub-bacias em que o uso do solo é do tipo agrícola a produção foi elevada. A topografia do terreno também apresentou influencia sobre a geração de sedimentos, sendo encontrados nas sub-bacias mais planas os menores valores de perdas de solo. A interação entre as características desses dois fatores influenciam na produção de escoamento superficial, o qual está diretamente relacionado com a produção de sedimentos.

O modelo hidrológico computacional SWAT permitiu simular a hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, reproduzindo por meio dos mapas de escoamento superficial e produção de sedimentos, a magnitude da geração e arraste das partículas de solo pelo impacto e escoamento da chuva durante o período estipulado. Apesar das restrições dos dados de entrada e da não calibração, o modelo demonstrou ser relativamente eficaz, permitindo relacionar os dados de topografia, uso e ocupação do solo, tipos de solo, escoamento superficial e produção de sedimentos.

A aplicação do modelo mesmo sem calibração visa apresentar soluções para o gerenciamento de bacias hidrográficas, possibilitando o apoio à tomada de decisão dos órgãos de gestão ambiental em relação ao processo de uso, ocupação e manejo inadequado do solo, reduzindo assim os impactos ambientais sobre os recursos hídricos.

## 5 Agradecimentos

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Ensino Superior) pela concessão da bolsa de mestrado e de doutorado da primeira e da segunda autora.

## 6 Referências

Aguiar, W. 2012. *Estimativa de taxas de denudação mecânica da bacia hidrográfica do Rio Quatorze (PR) pela análise de sólidos em suspensão*. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação de Mestrado, 106p.

Araújo, G.H.S.; Almeida, J.R. & Guerra, A.J.T. 2013. *Gestão ambiental de áreas degradadas*. 9.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 322p.

Arnold, G.J.; 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*, 34(1):73-89.

Arnold, J.G.; Kinity, J.R.; Srinivasan, R.; Williams, J.R.; Haney, E.B. & Neitsch, S.L. 2011. *SWAT input/output file Documentation, Version 2009*. Texas, Grassland Soil and Water Research Laboratory. 643p.

Ben-Hur, M.; Fernandez, C.; Sarkkola, S.; Cerezal, J.C.S. 2011. Overland flow, soil erosion and stream water quality in forest under diferente perturbations and climate conditions. *In: Forest Management and the Water Cycle: An Ecosystem-Based Approach*, 212:263-289.

Bertoni, J. & Neto, F.L. 2008. *Conservação do solo*. 6.ed. São Paulo: Ícone. 355p.

Bonumá, N.B.; Reichert, J.M.; Minella, J.P.; Jacomet, L.; Oliveira, A. & Rodrigues, M.F. 2009. Simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia

hidrográfica rural no sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32. Fortaleza, 2009.

Bortolotto, N.L. 2011. *Avaliação hidrossedimentológica da Bacia do Rio Cunha, município de Rio Dos Cedros, Santa Catarina com o modelo SWAT*. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Trabalho de Conclusão de Curso. 101 p.

Brady, N.C. & Well, R.R. 1996. *The Nature and properties of soil*. 11.ed. New Jersey, Prentice-Hall. 740p.

Bravo, J.M.; Picilli, D.G.A.; Colischonn, W.; Tassi, R.; Meller, A. & Tucci, C.E.M. 2007. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17. São Paulo, ABRH.

Carvalho, N.O. 2008. *Hidrossedimentologia prática*. 2.ed. Rio de Janeiro, Interciência. 599p.

Castro, K.B. 2013. *Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 122p.

Collischonn, W. 2001. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 270p.

Galeti, P.A. 1987. *Práticas de controle à erosão*. 1.ed. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 278p.

Guerra, A.J.T.; Silva, A.S. & Botelho, R.G.M. 2009. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 4.ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 340p.

IAPAR, Instituto Agrônômico do Paraná. 2012a. Cartas Climáticas do Paraná: Precipitação – Média anual.

IAPAR, Instituto Agrônômico do Paraná. 2012b. Médias históricas – Francisco Beltrão.

Lepsch, I.F. 2010. *Formação e conservação dos solos*. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos. 216p.

Lino, J.F.L. 2009. *Análise da dinâmica hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dissertação de Mestrado, 150p.

Marchioro, E. 2008. *Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste Fluminense*. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 196p.

Misra, A.K. 2011. Impacto f urbanization on the Hydrology of Ganga Basin (India). *Water Resource Management*, 25:705-719.

Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kinary, J. R.; Williams, J. R. & King, K. W. 2002. Soil and Water Assessment Tool: theoretical documentation. Texas. 506 p.

Ozsoy, G. & Aksoy, E. 2015. Estimation of soil erosion risk within an important agricultural sub-watershed in Brusa, Turkey, in relation to rapid urbanization. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187:405-419.

Rodrigues, M.F. 2011. *Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em Bacias Hidrográficas florestais no Sul do Brasil*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 202p.

Ruthes, J.M.; Tomazoni, J.C. & Gomes, T.C. 2012. Propriedades do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Catorze

- que contribuem no processo erosivo laminar. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 17, Curitiba, 2012. Anais do SICITE 2012. Curitiba: Editora da UTFPR.
- Shawul, A.A.; Alamirew, T.; Dinka, M.O. 2013. Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 10:13955-13978.
- Silva, A.M.; Schulz, H.E. & Camargo, P.B.C. 2007. Erosão e hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas. 2.ed. São Carlos, RiMa. 158p.
- Tomazoni, J.C. 2010. Banco de dados da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze. Francisco Beltrão. 1 arquivo (5,86 GB); Mídia removível 8 GB.
- Tucci, C.E.M. 2007. Inundações urbanas Porto Alegre, ABRH/RHAMA. 398p.
- Uzeika, T. 2009. *Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural*. Programa de Pós-graduação em Recursos Hidráulicos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 132p.
- Uzeika, T; Merten, G.H.; Minella, J.P.G. & Moro, M. 2012. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Revista Brasileira de Ciências dos Solos*, 36:557-565.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook N° 537. Washington, U.S. Government Printing Office. 69 p.