



## MODELO HIDROLÓGICO SWAT NA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO – BOTUCATU / SP

Luís Gustavo Frediani Lessa<sup>1</sup>, Célia Regina Lopes Zimback<sup>2</sup>, Sérgio Lázaro de Lima<sup>3</sup> & Ronalton Evandro Machado<sup>4</sup>

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi avaliar a produção de sedimentos da parte inicial da Bacia do Rio Pardo – Botucatu/SP, utilizando-se do modelo hidrológico matemático SWAT, durante o período de 1994 a 1999. Foram utilizadas cartas planialtimétricas, imagens de satélite e manipulados em SIG por meio do programa SPRING 5.1.6. A simulação da produção de sedimentos foi gerada com o auxílio de uma interface entre o modelo hidrológico SWAT 2009 com ArcView®, versão 9.3. Os mapas de Solo, Uso do Solo e Modelo Numérico do Terreno (MNT) foram gerados no SIG-SPRING 5.1.6 e exportados para o ArcSWAT 2009. Os dados tabulares relacionados aos parâmetros de solo e aos parâmetros meteorológicos foram inseridos diretamente no banco de dados do SWAT. O modelo possibilitou estimar a produção de sedimentos proposta e que, no ponto de descarga da bacia foi computado uma taxa de produção média de sedimentos de 33,866 t ha<sup>-1</sup> ao longo dos 6 anos de estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelo Numérico do Terreno - MNT, Sistema de Informação Geográfica - SPRING, modelagem.

### DETERMINATION OF SOIL LOSS IN RIVER PARDO WATERSHED – BOTUCATU / SP USING THE HYDROLOGICAL SWAT MODEL

**ABSTRACT:** The objective of this work was to evaluate the sediment production in the initial part of the Pardo River Basin - Botucatu/SP from 1994 to 1999, using the mathematical hydrological model SWAT. It was used topographic maps and satellite data manipulated in GIS using the software SPRING 5.1.6. The simulation of sediment production was generated with the aid of an interface between the hydrological model SWAT 2009 with ArcView®, version 9.3. The maps of Soil, Land Use and Digital Elevation Model (DEM) were generated in the GIS-SPRING 5.1.6 and exported to ArcSWAT 2009. The tabular data related to the parameters of soil and meteorological parameters were entered directly to the SWAT. The model allowed to estimate the sediment production. A sediment average production rate of 33.866 ton ha<sup>-1</sup> over the six years of study was computed in the point of discharge of the basin.

**KEYWORDS:** Digital Elevation Model - DEM, Geographic Information System - SPRING, modeling.

<sup>1</sup> Geólogo, Doutor em Agronomia, Prof. Doutor do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA / UNESP, Rua José Barbosa de Barros, 1780 - CEP: 18610-307, Botucatu/SP, luisgustavo\_lessa@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Enga Agrônoma, Profa Adjunta do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA / UNESP, Rua José Barbosa de Barros, 1780 - CEP: 18610-307, Botucatu/SP, czimback@fca.unesp.br

<sup>3</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA / UNESP, Rua José Barbosa de Barros, 1780 - CEP: 18610-307, Botucatu/SP, sergiolima@fca.unesp.br

<sup>4</sup> Eng. Agrícola, Prof. Doutor da Divisão de Tecnologia em Construção de Edifícios e Estradas, Faculdade de Tecnologia - FT / UNICAMP, Rua Paschoal Marmo, 1888 - CEP: 13484-332, Limeira/SP, machado@ft.unicamp.br

## 1 INTRODUÇÃO

A definição de uma área de estudo é uma atividade complexa daí utilizar-se bacia hidrográfica como unidade de trabalho, pois, constitui um sistema natural bem delimitado no espaço (SANTOS, 2004). Guerra (1993) definiu bacia hidrográfica como o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes cuja delimitação é dada pelas linhas divisoras de água que demarcam seu contorno.

Segundo Coelho Netto (1998), bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é a área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, em um determinado ponto de um canal fluvial. Os materiais que são transportados para os cursos dos rios causando deterioração do meio ambiente, e o assoreamento dos cursos e espelhos d'água são reflexos da degradação intensa dos recursos naturais, principalmente do solo e da água (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

De acordo com Carvalho (1994), o conhecimento de determinados mecanismos, como o transporte de sedimentos, é essencial para a solução de problemas de perdas de solo. Desta forma, o transporte de sedimentos é um processo natural que envolve remoção, transporte e deposição de material e faz parte da evolução da paisagem originando as formas geomorfológicas (SANTOS et al., 2001).

Chaves (1996) relatou que a não quantificação das perdas de solo por erosão impossibilita uma análise mais detalhada sobre o grau de degradação e controle deste fenômeno e que, estudos puramente qualitativos sobre a erosão, não permitem comparações de diferentes cenários de planejamento conservacionista, nem fornecem dados para estudos de sedimentação. Por esta razão, caracteriza-se a necessidade de utilizar ferramentas que levem à quantificação da erosão, o que pode ser obtido por meio de alguns modelos matemáticos que preveem o aporte de sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica.

A demanda por modelos matemáticos que permitam estimar a ação dos principais fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica é crescente. Um desses modelos que simulam os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico é o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que é um modelo dentre vários outros, com características de permitir uma grande flexibilidade na configuração de bacias hidrográficas (PETERSON; HAMLETT, 1998).

O modelo foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações do uso e da ocupação do solo sobre a produção/contribuição de sedimentos da bacia hidrográfica para o sistema, bem como no escoamento superficial e subterrâneo (ARNOLD et al., 1998).

Como o modelo SWAT baseia-se em características físicas da bacia, é necessário que o usuário tenha conhecimento sobre as condições meteorológicas, as propriedades físicas e químicas do solo, a topografia e as práticas de manejo realizadas na bacia. O uso destas informações como dados de entrada no modelo SWAT, o torna capaz de avaliar a bacia hidrográfica quanto ao transporte de sedimentos, fluxo de água e cobertura vegetal (SHAW, 2001).

Uma das desvantagens de se trabalhar com modelos matemáticos é avaliar a grande quantidade de informações por eles geradas. Desta forma, surge a necessidade da utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) na criação do banco de dados para esses modelos (MACHADO; VETTORAZZI, 2003).

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como o projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos. O uso do SIG permite, portanto, subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas (CALIJURI et al., 1998).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial da produção anual de sedimentos, da parte inicial da bacia hidrográfica do Rio Pardo, em Botucatu/SP, no período de 1994 a 1999; utilizando-se do modelo hidrológico matemático SWAT.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

#### 2.1.1 O modelo SWAT

Por definição, modelo é “uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes” (HAGGETT; CHORLEY, 1975).

Os objetivos dos modelos usados em Hidrologia compreendem em simplificar e generalizar uma realidade complexa, prever a ocorrência de eventos hidrológicos e planejar o uso futuro dos recursos d'água (MORE, 1975).

O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo matemático de parâmetro distribuído, ou seja, quando as variáveis e os parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Foi desenvolvido em escala de bacia hidrográfica com a finalidade de prever o impacto de práticas de manejo do solo em relação à água, sedimentos e produtos agro-químicos. Tem aplicação em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas, por meio de diversas combinações de solos, usos e coberturas do solo e condições de manejo sobre longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2002).

O SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva parâmetros espacialmente distribuídos da bacia

inteira e características homogêneas dentro da mesma (DI LUZIO et al., 2002).

De acordo com Neitsch et al. (2002), a estrutura de dados que são parâmetros de saída é dividida em oito componentes principais: clima, ciclo hidrológico, nutrientes e pesticidas, erosão, cobertura do solo e crescimento vegetal, práticas de manejo, propagação no canal principal e, corpos de água.

A entrada de dados no SWAT como os Planos de Informações (PIs) e os dados alfanuméricos são realizados por uma interface apropriada.

### 2.1.2 Área de estudo

A área selecionada para o estudo compreende a parte inicial da bacia hidrográfica do Rio Pardo, que abrange áreas dos municípios de Botucatu e Pardinho, situados na região centro sul do Estado de São Paulo.

A Bacia possui área de 148,76 km<sup>2</sup>, tendo o Rio Pardo como principal curso de água da bacia, que percorre um trecho de aproximadamente 28,7 km, desde a sua nascente até o local de captação de água pela SABESP (CONTE; LEOPOLDO, 2001).

A área de estudo está geograficamente localizada entre as coordenadas 23°06'14" e 22°56'07" de latitude sul e, 48°28'37" e 48°20'40" de longitude WGr, com altitudes variando entre 840 a 1007 metros (IBGE, 1969; 1982).

De acordo com Araújo Junior (2001), os valores de altitudes que ocorrem nas três feições fisiográficas distintas são variáveis, com valores na Depressão Periférica entre 450-650 metros, na Cuesta Basáltica entre 650-840 metros e no Planalto Ocidental entre 790-940 metros.

Na região de estudo, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1981) afloram duas formações geológicas: na parte mais alta acompanhando o divisor de águas da bacia aparecem arenitos mais resistentes ao intemperismo, pertencentes ao Grupo Bauru, Formação Marília e, nas áreas inferiores do relevo, formando uma faixa relativamente estreita, margeando os cursos d'água, rochas basálticas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral.

Na área, segundo Zimback (1997) foram encontrados cinco tipos representativos de solos: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Gleissolo Háptico Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região pertence a classe Cwa, sendo um clima mesotérmico, com estação mais seca no inverno, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais (CARVALHO; JIM, 1983).

A vegetação nativa regional pode ser enquadrada como Floresta Tropical Subperenifolia e Floresta Tropical Subcaducifolia (BRASIL, 1960).

### 2.1.3 Sistema de Informações Geográficas

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) empregado foi o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, versão 5.1.6 (SPRING 5.1.6), de domínio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para criar e armazenar o banco de dados, efetuar o georreferenciamento dos mapas e manipulação dos dados gerados.

As informações sobre a produção de sedimentos na área foram realizadas via integração do modelo hidrológico SWAT 2009 com ArcView®, versão 9.3. Uma interface (Di Luzio et al., 2002) foi desenvolvida entre o SWAT e o SIG ArcView®. A versão AVSWAT2009 utilizada está totalmente integrada ao SIG ArcView®.

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Criação do banco de dados

O programa SPRING 5.1.6 foi o Sistema de Informação Geográfica (SIG) utilizado para geração, armazenamento e manuseio das informações, no qual os dados vetoriais e matriciais foram importados pelo SPRING 5.1.6 para criação do Banco de Dados.

O passo inicial foi a criação no SPRING 5.1.6 do Banco de Dados e definido seu Modelo de Dados.

A seguir foi definido o Projeto, pelo menu principal [Arquivo] [Projeto], onde foi dado um nome para este Projeto e inseridas as coordenadas planas, sistema de projeção [UTM], Modelo da Terra [Córrego Alegre] e origem Longitude [W 51° 00' 00"] Zona [22 Sul]. Após serem definidos esses parâmetros foram efetuados a entrada e manipulação de dados no SIG.

As cartas topográficas no formato .tif foram manuseadas no Impima 5.1.6, que é um módulo do SPRING 5.1.6, e salvas no formato .spr, e na sequência importadas pelo SPRING 5.1.6 para dar início ao processo de georreferenciamento. Esta etapa foi executada no menu principal [Arquivo], [Registro], modo [Manual].

Neste processo, que é o estabelecimento da localização dos pontos de controle, são inseridas as coordenadas geográficas, em UTM, e elaborado o georreferenciamento das cartas.

A geração do Modelo Numérico do Terreno (MNT) foi efetuada pelo cruzamento do Mapa Altimétrico (resultado das curvas de nível vetorizadas) com uma grade triangular, Triangulated Irregular Network (TIN), gerado pelo SPRING 5.1.6, com posterior processo de refinamento para uma grade regular retangular.

O Mapa de solos foi obtido do levantamento de solos realizado por Zimback (1997), que foi inserido no SPRING 5.1.6 por meio do menu [dados vetoriais ou

dados matriciais]. Na sequência, foi georreferenciado e retrabalhado no comando [edição vetorial] para verificar se todos os polígonos representativos dos tipos de solos estavam fechados e assim poder efetuar a reclassificação das classes temáticas para cada tipo de solo.

O Mapa Uso do Solo foi gerado utilizando-se as imagens CBERS, sensor CCD. Foi criada uma imagem sintética de falsa cor para melhor visualizar as feições representativas. Sobre esta imagem foi criada uma classificação supervisionada “pixel a pixel”, pelo método da Máxima Verossimilhança (MAXVER).

As amostras de treinamento resultantes dessa classificação foram organizadas em nove usos diferentes para o solo: pastagem, café, cana, feijão, milho, reflorestamento, mata, urbano e água (represas).

Em determinada fase do processo, alguns Planos de Informações (PIs) gerados no SPRING 5.1.6 foram exportados para o SWAT 2009 por meio de interface apropriada, que processou os dados inseridos no banco de dados do modelo hidrológico e utilizou-se do SIG ArcView®, versão 9.3, compatível com esta interface, para gerar as informações processadas no modelo, na forma de mapas, gráficos e tabelas.

Os PIs necessários nesta etapa, para dar início à modelagem no modelo hidrológico SWAT foram o Modelo Numérico do Terreno (MNT), o Mapa de solos e o Mapa de uso dos solos, após serem convertidos no formato .shape, extensão reconhecida pela interface que processa o software SWAT.

### 2.2.2 Dados de entrada no SWAT

O SWAT por ser um modelo físico, requer que no seu banco de dados seja inserida uma grande quantidade de informações definidas na área a respeito das características físicas da bacia hidrográfica, para desta forma, processar as equações físicas que simularão o fluxo da água no ciclo hidrológico.

Os dados tabulares foram digitados diretamente no banco de dados do modelo. Observa-se que existe uma troca de informações desses dados tabulares com os mapas de entrada e a localização do posto meteorológico informada.

Os parâmetros de entrada de dados de solo necessários são: número de camadas do solo, grupo hidrológico, profundidade das camadas, máxima profundidade da raiz no perfil do solo, densidade do solo, fração de porosidade, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada, fator erodibilidade do solo, porcentagem de partículas (areia, silte, argila e fragmentos de rochas), albedo e carbono orgânico. Os parâmetros de solo foram obtidos de Zimback (1997).

O modelo requer dados diários dos parâmetros meteorológicos que são: temperatura mínima do ar, temperatura máxima do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Estes dados

foram coletados no período de 01 de janeiro de 1994 a 31 de dezembro de 1999, por equipamentos instalados na Faculdade de Ciências Agronômicas / UNESP / Campus de Botucatu, cuja localização geográfica corresponde a 22°51' de latitude S e 48° 26' de longitude WGr. e altitude de 786 metros.

Os dados tabulares de vazão e concentração de sedimentos em suspensão foram obtidos de Conte (1999). Os dados de vazão foram utilizados para calibrar o modelo para balanço de água e de escoamento. Os dados de concentração de sedimentos em suspensão foram usados para calibrar o modelo e para a comparação entre a produção de sedimentos simulada pelo SWAT a observada dos resultados das análises efetuadas por Conte (1999).

### 2.2.3 Análises estatísticas

Para avaliar o desempenho do modelo, os dados de vazão simulados pelo SWAT foram comparados estatisticamente com os dados de vazão coletados por Conte (1999), na área de captação da SABESP, no período de 01 de setembro de 1996 a 30 de novembro de 1997, na Bacia do Rio Pardo.

O critério estatístico para avaliar o ajuste do modelo foi o mesmo utilizado por Machado (2002), que é o Coeficiente Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), o qual avalia o ajuste do modelo, equação (1) e o desvio dos dados simulados em relação aos dados observados (Dv), equação (2).

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \hat{E})^2} \quad (1)$$

onde  $E_m$  é o evento observado;  $E_s$  o evento simulado pelo modelo;  $\hat{E}$  é a média do evento observado no período de simulação e  $n$  o número de eventos. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) pode variar a partir de negativo infinito a 1, sendo 1 indicativo de um perfeito ajuste.

$$D_v[\%] = \frac{E - E^*}{E} * 100 \quad (2)$$

onde  $D_v[\%]$  é o desvio do evento analisado;  $E$  o evento observado no período analisado e  $E^*$  o evento simulado no período. O cálculo do  $D_v[\%]$  é importante por considerar o erro potencial nos dados observados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter os resultados da distribuição da produção de sedimentos nas 43 sub-bacias definidas pelo SWAT, que constituem a Bacia do Rio Pardo foi necessário primeiro calibrar o modelo, para depois quantificar a produção de sedimentos.

O resultado da simulação da produção de sedimentos foi comparado com os dados observados das análises de água para sedimentos em suspensão coletados por Conte (1999).

Para a concentração de sedimentos sem calibração, na fase de escoamento para dados diários, foi simulado um valor de COE igual a 0,31 e Dv igual a - 53,83%. Para concentração de sedimentos de dados diários já calibrados, resultantes do processo da calibração da vazão, produziu um valor de COE igual a - 11,48 e Dv igual a - 173,33%. Estes resultados de valores de COE e Dv podem ser melhor visualizados pela Tabela 1.

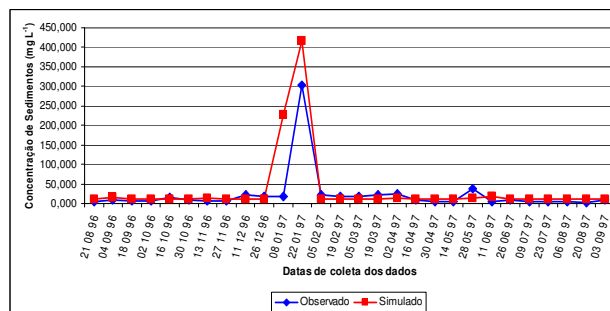
**Tabela 1:** Valores do COE e Dv antes e após a calibração, para sedimentos na Bacia do Rio Pardo.

Variável	Sem Calibração	Calibrado
COE	0,31	- 11,48
Dv (%)	- 53,83	- 173,33

Observou-se que na expectativa de calibrar o modelo para o parâmetro vazão, consequentemente o programa está calibrando o parâmetro concentração de sedimentos, pois os sedimentos são transportados via escoamento e o programa está considerando isto.

Desta forma tentou-se melhorar o parâmetro concentração de sedimentos para o modelo calibrado, mas a melhora foi ínfima e a idéia foi abortada, porque alterou para pior o valor da COE já definido quando da calibração para vazão.

Pela Figura 1, verificou-se que no dia 22/jan/1997 o valor de concentração de sedimentos observado e não calibrado, 304,00 mg L<sup>-1</sup> está completamente fora do padrão em relação aos demais pontos coletados que variam entre 3,20 a 37,30 mg L<sup>-1</sup>. A resposta do programa para a simulação não calibrada tendeu a um bom ajuste com relação aos pontos de coleta, com exceção para os dias 08/jan/1997 (227,70 mg L<sup>-1</sup>) e 22/jan/1997 (415,80 mg L<sup>-1</sup>).

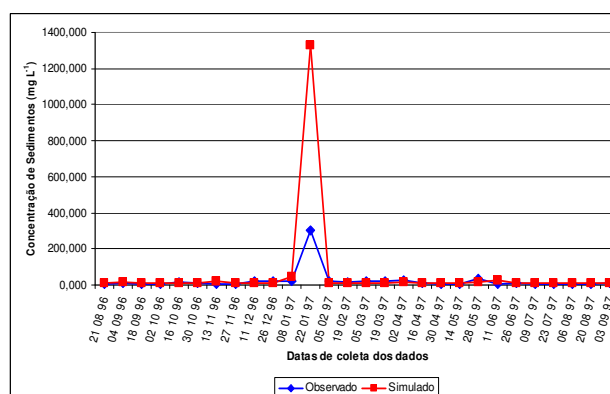


**Figura 1:** Comparação entre as concentrações de sedimentos (mg L<sup>-1</sup>) diária, observada e simulada, resultantes da modelagem sem calibração na Bacia do Rio Pardo.

Este valor elevado para concentração de sedimentos observado (304,00 mg L<sup>-1</sup>) é consequência da ocorrência de enchente na área que foi registrada pelo linígrafo e pelo pluviômetro.

A Figura 2 apresenta o resultado produzido pelo SWAT para a concentração de sedimentos diária, quando do processo de calibração para vazão, demonstrando que no dia 22/jan/1997 o valor da concentração de sedimentos observado foi de 304,00 mg L<sup>-1</sup> e o programa simulou uma concentração de sedimentos de 1.328,00 mg L<sup>-1</sup>. Verificou-se pela Figura 2, que houve uma melhora no ajuste entre os dados observados e simulados para o parâmetro concentração de sedimentos, dos quais somente o valor de coleta do dia 22/jan/1997 permaneceu fora dos padrões, o que resultou em um valor discrepante para o COE, que foi de - 11,48.

A explicação entre estes dois valores de concentração de sedimentos observado e simulado está relacionada com a ocorrência do fenômeno natural de enchente na área, que certamente contribui para o aumento da produção de sedimentos ao longo da série, e ao mesmo tempo, desbalanceou o volume de sedimentos trazidos via suspensão, sendo que estes, possivelmente, não foram representados no dia da coleta, em 22/jan/1997.



**Figura 2:** Comparação entre as concentrações de sedimentos diárias, observada e simulada resultantes da modelagem com calibração, na Bacia do Rio Pardo.

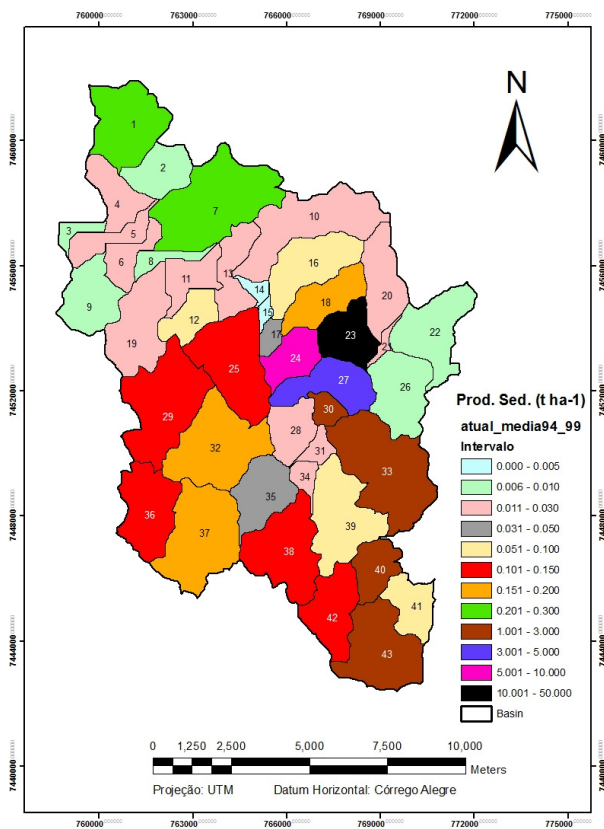
Desta maneira, o registro do dado observado para esta data interferiu no valor esperado de COE que deveria ser mais próximo de 1. Segundo Krysanova et al. (1998), se variar entre 0,70 a 0,80 indica um bom ajuste do modelo.

Diante destes fatos, verificou-se que mesmo com um valor de COE = - 11,48, o modelo está ajustado e um valor mais adequado de COE não foi possível em função da coleta de 22/jan/1997.

Com o modelo calibrado executou-se a quantificação da distribuição da produção anual de sedimentos, para o período de 01/jan/1994 a 31/dez/1999, representada pela média da distribuição anual de sedimentos, conforme verificado na Figura 3.

Os resultados da produção anual de sedimentos para cada sub-bacia durante o ano de 1994 foi de 9,683 t ha<sup>-1</sup>, em 1995 de 12,488 t ha<sup>-1</sup>, em 1996 de 12,039 t ha<sup>-1</sup>, em 1997 de 44,436 t ha<sup>-1</sup>, em 1998 de 114,306 t ha<sup>-1</sup> e em 1999 de 10,244 t ha<sup>-1</sup>. O resultado da produção média anual para os 6 anos de estudo (Figura 3) foi de 33,866 t ha<sup>-1</sup>.

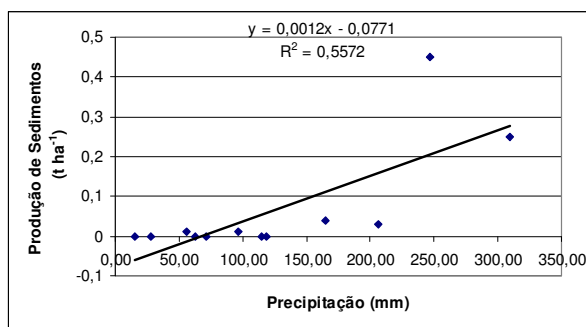
Pode-se inferir que os eventos erosivos que se manifestam em determinada área sofrem influências dos fenômenos da precipitação, da variação espacial das ocorrências dos solos, da cobertura vegetal e da morfologia do terreno.



**Figura 3:** Distribuição espacial da produção anual de sedimentos na Bacia do Rio Pardo para a média do período de 1994 a 1999.

Observou-se pelo diagrama de dispersão (Figura 4), que a produção de sedimentos não está tendo uma correlação direta com o fenômeno de precipitação para média mensal na bacia durante os seis anos, pois apresentou um R<sup>2</sup> de 0,56, significativo ao nível de 1%. Então, a cobertura vegetal é que está desempenhando maior influência na bacia, já que o relevo comportou-se relativamente constante e a produção de sedimentos apresentou uma média para o período nos seis anos inferior a 250 kg ha<sup>-1</sup>. A exceção é observada nas sub-bacias 23, 24, 27, 30, 33, 40 e 43 com valores de produção para a média dos seis anos acima de 1,000 t ha<sup>-1</sup>, conforme observado pela Figura 3.

As sub-bacias 23 e 24 produziram mais sedimentos a partir de 1995 até 1999, com valores superiores a 1,000 t ha<sup>-1</sup>. No ano de 1994, a sub-bacia 23 produziu 147 kg ha<sup>-1</sup> de sedimentos e a sub-bacia 24, 70 kg ha<sup>-1</sup>. A produção média anual de sedimentos durante os 6 anos de estudo foi para a sub-bacia 23 de 13,565 t ha<sup>-1</sup> e para a sub-bacia 24 de 7,804 t ha<sup>-1</sup>.



**Figura 4:** Diagrama de dispersão entre a média mensal da produção de sedimentos simulada (t ha<sup>-1</sup>) e a média mensal da precipitação (mm) durante os seis anos de estudo, na Bacia do Rio Pardo.

Com relação à cobertura vegetal, que predominou nessas duas sub-bacias que apresentaram alta produção de sedimentos, tem-se na sub-bacia 23 presença de cultura de feijão (179,8677 ha e 62,90% de área da sub-bacia), pastagem (79,9734 ha e 27,97% de área da sub-bacia) e cana de açúcar (26,0991 ha e 9,13% de área da sub-bacia). Na sub-bacia 24 presença de cana de açúcar (126,1401 ha e 52,58% de área da sub-bacia), de cultura de feijão (59,8500 ha e 24,95% de área da sub-bacia) e de pastagem (53,8900 ha e 22,47% de área da sub-bacia) e ambas sub-bacias, com declividade predominante de 3 a 12% e predominância de Latossolo Vermelho Distrófico.

O fato da sub-bacia 24 produzir menos sedimentos em comparação com a sub-bacia 23 é que sua área de ocorrência com plantação de feijão é 3 vezes menor (33,27%) e que, na margem oposta do Rio Pardo, as plantações com cana-de-açúcar predominam com área de 52,58%.

O ciclo da cana de açúcar é maior que o do feijão, então, os solos sob essas culturas ficam protegidas com vegetação em períodos diferentes, pois, durante o período de preparo do solo este fica mais vulnerável a ação das chuvas. Como consequência há o favorecimento do escoamento superficial e, conseqüentemente, o aumento da produção de sedimentos, uma vez que o solo encontra-se numa situação favorável a ação da desagregação de suas partículas.

Então, o manejo do solo associado à presença do tipo de cobertura vegetal, provavelmente, está interferindo no aumento da produção de sedimentos para estes anos em relação ao regime climatológico da área no período analisado.

A sub-bacia 27 apresentou produção média anual de sedimentos, durante os 6 anos, de 3,914 t ha<sup>-1</sup>. Na sub-bacia predominaram as plantações com feijão (207,6612 ha<sup>-1</sup> e 59,87% de área da sub-bacia), seguido de cana de açúcar (100,6997 ha<sup>-1</sup> e 29,03% de área da sub-bacia) e pastagem (38,5094 ha<sup>-1</sup> e 11,10% de área da sub-bacia). Observou-se declividade predominante de 3 a 12% e ocorrência de Latossolo Vermelho Distrófico.

A produção média anual de sedimentos para a sub-bacia 30 durante o período de estudo foi de 1,547 t ha<sup>-1</sup>. A sub-bacia 30 apresentou plantações de cana de açúcar (36,4979 ha<sup>-1</sup> e 40,28% de área da sub-bacia) plantada na parte mais baixa na margem esquerda do Rio Pardo e declividade predominante de 3 a 12%. Ocorre também cultura de feijão (21,2921 ha<sup>-1</sup> e 23,50% de área da sub-bacia) na parte mais alta com predomínio de 12 a 20% de declividade. Também estão presentes áreas com mata (19,1861 ha<sup>-1</sup> e 21,17% de área da sub-bacia) e pastagem (13,6439 ha<sup>-1</sup> e 15,05% de área da sub-bacia). A sub-bacia está sobre Latossolo Vermelho Distrófico.

Para a sub-bacia 33 observou-se uma produção média anual de sedimentos de 2,311 t ha<sup>-1</sup>. Esta sub-bacia caracteriza-se pela ocorrência de cana de açúcar (393,7298 ha<sup>-1</sup> e 49,56% de área da sub-bacia) e plantações de milho (267,3218 ha<sup>-1</sup> e 33,65% de área da sub-bacia). Apresentou em menores quantidades presença de pastagem (133,3690 ha<sup>-1</sup> e 16,79% de área da sub-bacia). Situa-se sobre Latossolo Vermelho Distrófico com declives variando de 3 a 12% predominantes e de 20 a 40%.

Provavelmente, esses valores de produção de sedimentos para as sub-bacias 27, 30 e 33 estão relacionados com o tipo de solo, declividade e cobertura de cada uma das sub-bacias, principalmente no que diz respeito ao manejo do solo para as culturas de cana de açúcar, feijão e milho, cuja etapa para o preparo do solo é um facilitador no aumento da produção de sedimentos, como nas sub-bacias 23 e 24.

As sub-bacias 40 e 43 apresentaram produção média anual de sedimentos durante os 6 anos de 1,321 t ha<sup>-1</sup> para a sub-bacia 40 e de 1,237 t ha<sup>-1</sup> para a sub-bacia 43

e predominantemente ocupadas com plantações de cana de açúcar. A parte sul da sub-bacia 43 é delimitada pela crista da Cuesta (Serra do Limoeiro) e na divisa entre as sub-bacias está localizado o município de Pardinho-SP.

Provavelmente, esses valores de produção de sedimentos para as sub-bacias 40 e 43 estão relacionados à ocorrência sobre Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, menos resistentes a erosão e também, por ocuparem áreas mais altas com relevo de 12 a 20 % e 20 a 40% predominantes e em menores proporções 3 a 12% no seu interior.

Observou-se a ocorrência de 15 sub-bacias com produção de sedimentos menor que 0,050 t ha<sup>-1</sup>, as quais se localizam a jusante da Bacia do Rio Pardo. Provavelmente este resultado é devido se situarem sobre Latossolo Vermelho Distrófico na sua maioria, mais resistentes a erosão e também, por desenvolverem-se sobre relevo de 0 a 3% e de 3 a 12%, representando a parte baixa da bacia. Nesta localidade predominam culturas de cana de açúcar, seguidos por reflorestamento e pequenos fragmentos com pastagem.

Com relação às sub-bacias que apresentaram produção de sedimentos entre 0,051 t ha<sup>-1</sup> a 0,300 t ha<sup>-1</sup>, observou-se a presença de áreas predominantes com plantações de cana de açúcar, em menores proporções ocorrência de pastagem e fragmentos de reflorestamento (sub-bacias 29, 32 e 37) e todas situadas sobre Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Possivelmente, esse valor de produção de sedimentos é devido à ocorrência dessas sub-bacias sobre predomínio de relevo de 3 a 12% e em menores proporções de 12 a 20%. Exceção é para as sub-bacias 1 e 7, que embora se localizem a jusante, apresentaram maiores produções de sedimentos mesmo com declividade predominante de 0 a 3% e 3 a 12%, talvez devido a presença no seu interior, de áreas mais altas com relevo de 12 a 20%, principalmente na sub-bacia 7 e ocorrência em ambas, do uso do solo urbano nas partes altas da bacia e situadas sobre Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico na sua maioria.

#### 4 CONCLUSÃO

A simulação no SWAT possibilitou estimar a produção anual de sedimentos para cada sub-bacia durante os anos de 1994 a 1999, e proporcionou uma visão panorâmica da distribuição espacial da produção de sedimentos, na parte inicial da Bacia do Rio Pardo.

Mesmo diante de uma série pequena de dados observados e ainda agravada pela ocorrência de enchente na área, o que prejudicou os dados observados, foi possível simular a produção de sedimentos para o período proposto de estudo, que foi de 33,866 t ha<sup>-1</sup>.

#### 5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO JUNIOR, A. A. **Diagnóstico físico conservacionista de 10 microbacias do Rio Capivara**

– **Botucatu (SP), visando a ocupação racional do solo.** 2001. 131 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, Jawra, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 2. ed. São Paulo: Icone, 1990. 355 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo.** Rio de Janeiro, 1960. 634 p. (Boletim Técnico, 12).

CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSKI, F. F. Geoprocessamento aplicado aos recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1998. p. 167-225.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática.** Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994. 372 p.

CARVALHO, W. A.; JIM, J. **Áreas de proteção ambiental:** região da “Serra de Botucatu” e região da “Serra de Fartura”. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Instituto Básico de Biologia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 1983. 47 p.

CHAVES, H. M. L. Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado.** Viçosa: SBCS, UFV, 1996. p. 731-750.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Ed.). **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93-148.

CONTE, M. L. **Aspectos quantitativos e qualitativos das águas da Bacia Experimental do Rio Pardo – Região de Botucatu, SP.** 1999. 157 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

CONTE, M. L.; LEOPOLDO, P. R. **Avaliação de recursos hídricos:** Rio Pardo, um exemplo. São Paulo: UNESP, 2001. 141 p.

DI LUZIO, M. et al. **Arcview Interface for Swat2000.** User’s Guide. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 345 p.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-morfológico.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1993. 446 p.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a nova geografia. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos físicos e de informação geográfica.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1975. p. 1-19.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. **Carta do Brasil – Quadrícula de Botucatu.** Rio de Janeiro, 1969. 1 folha SF – 22 – R – IV – 3 – Botucatu. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. **Carta do Brasil – Quadrícula de Bofete.** Rio de Janeiro, 1982. 1 folha SF – 22 – Z – D – III – 1 – Bofete. Escala 1:50.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do Estado de São Paulo.** São Paulo, 1981. 2 v. Escala 1:500.000.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.; BECKER, A. Development and Test of a Spatially Distributed Hydrological/Water Quality Model for Mesoscale Watersheds. **Economic Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 106, p. 261-289, 1998.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão do Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 735-741, maio, 2003.

MORE, R. Os Modelos Hidrológicos e a Geografia. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos físicos e de informação geográfica.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1975. p. 104-138.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool:** Theoretical documentation version 2000. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 498 p.

PETERSON, J. R.; HAMLETT, J. M. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed



containing fragipan soils. **Journal of the American Water Resources Association**, Jawra, n. 34, p. 531-544, 1998.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento, 2001. 372 p.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SHAW, K. **An evaluation of the Basins 3.0 models including the procedural steps taken to evaluate the Barton Creek Watershed**. Lexington: University of Kentuck, 2001. 22 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Pardo nos municípios de Pardinho e Botucatu**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 1997. 55 p.