

SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOS MARINS (SP)⁽¹⁾

R. E. MACHADO⁽²⁾ & C. A. VETTORAZZI⁽³⁾

RESUMO

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi aplicado para simular a carga de sedimentos produzida pela microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba (SP), no biênio 1999/2000. A aplicação do modelo requer a entrada dos dados na forma espacializada que foi feita com o auxílio de uma interface entre o modelo e um Sistema de Informações Geográficas (SIG's). A microbacia foi discretizada em sub-bacias para determinar os parâmetros de entrada no modelo. Os resultados obtidos na simulação da produção de sedimentos foram comparados aos dados observados em um posto hidrossedimentométrico, localizado no terço superior da microbacia, utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) e o desvio dos dados simulados em relação aos observados (D_v). Para as condições específicas da microbacia do Ribeirão dos Marins, os resultados obtidos na simulação da produção de sedimentos pelo modelo, após a calibração, foram de 0,83, para o COE, e de -3,2 %, para o D_v , indicando um bom ajuste dos dados simulados comparados aos dados observados.

Termos de indexação: erosão, modelos hidrológicos, poluição difusa, SIG's, SWAT.

SUMMARY: *SEDIMENT YIELD SIMULATION FOR THE WATERSHED RIBEIRÃO DOS MARINS, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL*

The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was applied to simulate the sediment yield in the watershed Ribeirão dos Marins, in Piracicaba, Brazil, for the biennial period of 1999/2000. The application of this model requires georeferenced input data, provided by an interface between the model and a Geographic Information System (GIS). The watershed

⁽¹⁾ Recebido para publicação em fevereiro de 2002 e aprovado em maio de 2003.

⁽²⁾ Engenheiro Agrícola, Doutor em Irrigação e Drenagem, Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – DER/ESALQ/USP. Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: remachad@carpa.ciagri.usp.br

⁽³⁾ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. E-mail: cavettor@carpa.ciagri.usp.br

was divided into sub-basins, and parameters were separately determined for each area. The simulated sediment yields were compared to the observed data of a gauge station located in the upper third of the watershed, using the Nash and Sutcliffe Coefficient (COE) and the deviation between simulated and measured data (Dv). After calibration the simulation results of the sediment yield showed a COE of 0,83 and a Dv of -3,2%, indicating that the simulated and observed data tally basically.

Index terms: erosion, hydrological models, non-point source pollution, GIS, SWAT.

INTRODUÇÃO

A degradação dos recursos naturais, principalmente do solo e da água, vem crescendo de forma alarmante, atingindo níveis críticos que se refletem na deterioração do meio ambiente, no assoreamento dos cursos e dos espelhos d'água (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

A principal causa da degradação das terras agrícolas é a erosão dos solos, a qual consiste nos processos de desprendimento e arraste de suas partículas, causados pela ação da água e do vento. Dentre as formas de erosão, a hídrica é, em grande parte do nosso planeta, a mais importante forma de erosão (Zachar, 1982). Esta é causada pela chuva e pelo escoamento superficial, sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antrópicos.

Os processos hidrológicos afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a deposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas que, coletivamente, determinam, em parte, a qualidade das águas, superficiais e subterrâneas. Os sedimentos são, provavelmente, o mais significativo de todos os poluentes em termos de sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes (Brooks et al., 1991).

Segundo Chaves (1991), a crescente preocupação com problemas de assoreamento e poluição de cursos d'água e de reservatórios contribuiu para o desenvolvimento de modelos matemáticos que prevêm o aporte de sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica. Estes são utilizados para a avaliação de práticas de manejo da terra e avaliação e planejamento ambientais. De acordo com Lane et al. (1992), a estimativa da erosão é essencial para determinar as práticas adequadas de conservação do solo e é útil para determinar impactos, antes mesmo da adoção na área de determinada cultura ou prática agrícola. Infelizmente, é muito dispendioso e impraticável monitorar a erosão em toda a bacia hidrográfica, daí a necessidade de prever a erosão com o uso de modelagem (Cochane & Flanagan, 1999).

Modelos hidrológicos e de qualidade da água vêm sendo desenvolvidos para prever o impacto da

agricultura na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Dentre os muitos modelos que tentam exprimir a ação dos principais fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica, estão os modelos conceituais distribuídos que simulam os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico. Um desses modelos é o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que permite uma grande flexibilidade na configuração de bacias hidrográficas (Peterson & Hamlett, 1998). O modelo foi desenvolvido para prever o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e cargas de poluentes em bacia hidrográficas agrícolas (Srinivasan & Arnold, 1994). O SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da bacia.

A maior limitação ao uso desses modelos é a dificuldade em trabalhar a grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Por essa razão, Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) podem ser empregados na criação do banco de dados para esses modelos. Nos SIG's, as sucessivas análises dos dados espaciais podem dividir grandes áreas heterogêneas em pequenas unidades hidrológicamente homogêneas, sobre as quais os modelos são aplicados.

Nesse contexto, este trabalho apresenta-se com os seguintes objetivos: (a) avaliar a distribuição espacial da produção de sedimentos na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (Piracicaba, SP), por meio da integração SWAT-ArcView; (b) analisar comparativamente os resultados gerados pelo modelo quanto à produção de sedimentos com os dados observados no biênio 1999/2000.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo SWAT

O SWAT é um modelo matemático de parâmetro distribuído (quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e, ou, do tempo) que

permite um número de diferentes processos físicos ser simulados em bacias hidrográficas com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas (Srinivasan & Arnold, 1994). O modelo opera em passo de tempo diário e é capaz de simular longos períodos, para computar os efeitos das variações de manejo.

O modelo é baseado em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos através da bacia. Os maiores componentes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (Arnold et al., 1998). O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração. O modelo requer dados diários de precipitação, temperaturas (máxima e mínima) do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa.

O SWAT utiliza uma formulação modificada do Método da Curva Número (CN) (USDA, 1972) para calcular o escoamento superficial. O Método da Curva Número relaciona o escoamento superficial ao tipo de solo, uso da terra e práticas de manejo (Arnold et al., 1995). A produção de sedimentos é estimada pela Equação Universal de Perda de Solos Modificada (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE) (Williams & Berndt, 1977).

A entrada de dados no SWAT (planos de informação cartográficos - PIs e dados alfanuméricos) é realizada via uma interface apropriada. Os PIs necessários são: Modelo Numérico do Terreno (MNT); solos e uso da terra. Uma interface (Di Luzio et al., 2001) foi desenvolvida entre o SWAT e o SIG ArcView®. A interface automaticamente subdivide a bacia em sub-bacias a partir do MNT e, então, extrai os dados de entrada a partir dos PIs e do banco de dados relacionados para cada sub-bacia. A interface permite que as saídas do modelo sejam exibidas em mapas, gráficos e quadros do ArcView®.

Área de estudo e dados de entrada

A área selecionada para este estudo foi a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (MHRM), afluente do rio Piracicaba, localizada no município de Piracicaba, estado de São Paulo, entre as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 216.000 e 226.000, 7.470.000 e 7.488.000 m N (Fuso 22 S, meridiano central 51 °W), com uma área aproximada de 5.973 ha (Figura 1).

As informações sobre o uso atual da terra foram obtidas a partir de uma imagem do satélite SPOT, datada de julho de 1998. Quatro categorias predominantes de uso da terra foram classificadas.

A cultura da cana-de-açúcar ocupa a maior parte da área na microbacia (56,2 %), em terrenos de menor declividade, enquanto as encostas mais íngremes são ocupadas com pastagem (30,9 %). A vegetação florestal original, quase inexistente em decorrência da evolução do uso e ocupação do solo na área de estudo, encontra-se apenas em algumas grotas e às margens do Ribeirão dos Marins (11,6 %). A área urbana ocupa 2,02 % e está localizada no terço inferior da microbacia. Os tipos de solo dominantes são os Litólicos (41 %) e os Podzólicos (58 %). Os dados dos solos foram obtidos do Boletim Científico nº 48 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (Oliveira, 1999) e do banco de dados do PROJETO PIRACENA (2001).

Os dados foram digitados diretamente no banco de dados do modelo. O banco de dados contém informações das características físico-hídricas (número de camadas, profundidade do limite inferior de cada camada à superfície, densidade do solo, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada e percentagem das partículas do solo). A condutividade hidráulica saturada (K_0) foi estimada com base nas relações das propriedades do solo desenvolvidas por Rawls & Brakensiek (1985). A capacidade de água disponível foi calculada de acordo com o método proposto por van den Berg et al. (2000). O modelo associa os dados à categoria de solo especificada no PI solo e cria o arquivo de entrada.

Os dados diários de radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa foram gerados pelo SWAT, utilizando o gerador climático WXGEN (Sharpley & Williams, 1990), com base nos dados mensais da estação meteorológica da ESALQ/USP, localizada nas coordenadas (UTM) 229.474 e 7.486.335 m (Figura 1). Os dados diários de temperaturas, máxima e mínima, foram obtidos da mesma estação meteorológica e lidos pelo modelo no formato de tabelas.

Os dados de precipitação e de sedimentos foram provenientes dos pluviômetros e do posto hidrossedimentométrico, instalados na microbacia em estudo, sob responsabilidade do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH)/USP. Um dos pluviômetros (D4118r) está instalado na porção superior da microbacia, nas coordenadas (UTM) 221.379 e 7.473.744 m (fuso 22 S). O outro pluviômetro (D4116r) está instalado próximo ao posto hidrossedimentométrico, nas coordenadas (UTM) 221.497 e 7.478.241 m (fuso 22 S). A bacia de contribuição, até o posto, tem aproximadamente 2.300 ha (Figura 1). A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Penman-Monteith.

Análises estatísticas

Estatísticas, incluindo o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, COE, (Equação 1) e o desvio dos

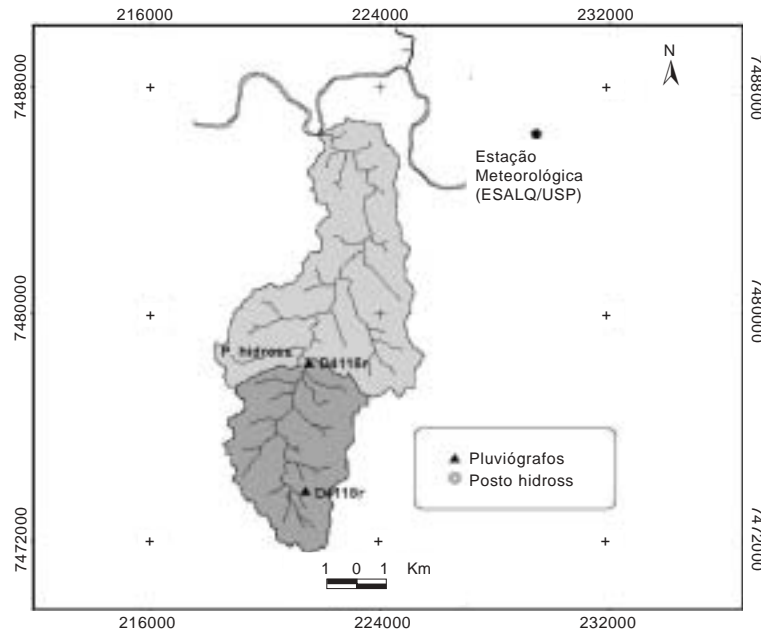


Figura 1. Microbacia do Ribeirão dos Marins, com localização do posto hidrossedimentométrico e dos pluviógrafos.

dados simulados em relação aos dados observados (D_v) (Equação 2) (ASCE, 1993) foram computados para a comparação entre a produção de sedimentos simulada e a observada no posto hidrossedimentométrico dentro da microbacia em estudo, para o biênio 1999/2000. Como esse posto está localizado no terço superior da MHRM, o número de sub-bacias até o posto é diferente do total de sub-bacias, considerando toda a microbacia. Para este estudo, a microbacia até o posto foi dividida em 39 sub-bacias.

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

em que E_m é o evento observado; E_s é o evento simulado pelo modelo; \bar{E} é a média do evento observado no período de simulação, e n é o número de eventos. O coeficiente de Nash e Sutcliffe pode variar a partir de negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste.

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

em que E é o evento observado no período analisado e E^* é o evento simulado no período. Esses dois parâmetros foram usados em conjunto com os métodos gráficos e de dispersão para avaliar o desempenho do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da simulação da produção de sedimentos foi comparado com os dados observados no posto hidrossedimentométrico localizado na microbacia dos Marins por um período de dois anos (1999 e 2000). Dados estatísticos, incluídos o coeficiente de eficiência (COE) e o desvio dos dados simulados em relação aos dados medidos (D_v), foram computados para a simulação, para determinar a eficiência do modelo. A simulação foi, posteriormente, estendida para toda a MHRM. Os resultados foram então usados para analisar o impacto das atividades agrícolas sobre a produção espacial de sedimentos em toda a microbacia.

Os resultados mostraram que o modelo teve uma boa estimativa em relação aos dados observados (Figura 2). O COE foi de 0,83, o que indica que o modelo é melhor preditor do que a média dos dados medidos. De modo geral, um COE variando de 0,70 a 0,80 indica um bom ajuste (Krysanova et al., 1998). O D_v entre os valores observados e simulados pelo modelo foi de -3,2 %, indicando o valor negativo que a produção de sedimentos simulada superou o valor total observado nos dois anos de estudo. Como se pode observar, a avaliação estatística dos resultados da simulação foi muito satisfatória.

O diagrama de dispersão entre a produção de sedimentos simulada e observada é apresentado na figura 3. Os valores mensais da produção de sedimentos simulados tiveram uma boa correlação com os valores medidos, sendo o valor de r^2 entre as variáveis de 0,92 significativo a 1 %.

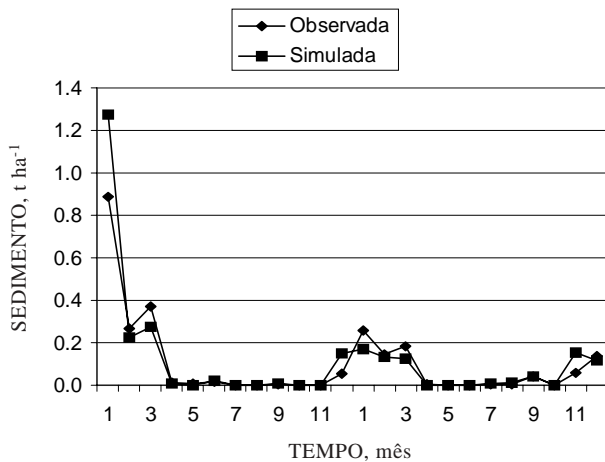


Figura 2. Produção de sedimentos observada e simulada no período 1999-2000, para a MHRM.

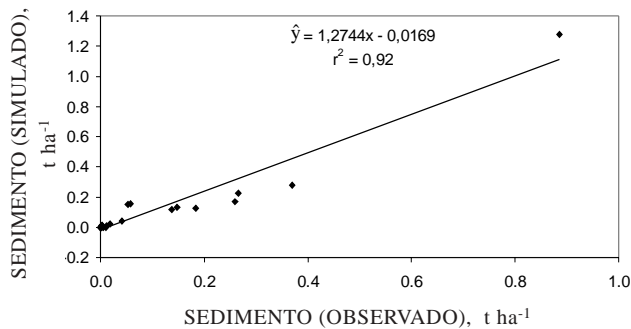


Figura 3. Diagrama de dispersão entre a produção de sedimentos observada e a simulada, para a MHRM.

Embora as figuras 2 e 3 mostrem que o modelo representou a variação da produção de sedimentos da microbacia razoavelmente bem como um todo (COE = 0,83 e $r^2 = 0,92$), houve períodos em que a produção de sedimentos foi superestimada em relação aos dados observados e, em outros, subestimada. A análise dos dados mostrou que a quantidade de chuva sobre a microbacia não foi uniforme durante o mesmo período nos dois postos pluviográficos.

Apesar de terem os volumes de precipitação registrados nos dois postos durante o período da simulação apresentado pequena diferença (42 mm), houve uma variação na distribuição da precipitação, conforme foi demonstrado pela série temporal mensal da precipitação no período analisado nos dois postos (Figura 4). O posto D4-118 está localizado na parte superior da microbacia, enquanto o posto D4-116 está localizado próximo ao posto hidrossedimentométrico (Figura 1). A distância entre ambos é de aproximadamente 4.500 m.

Segundo Goodrich et al. (1995), na aplicação de modelos hidrológicos e de qualidade da água, a precipitação é geralmente assumida como espacialmente uniforme e não é considerada a sua contribuição nas incertezas das respostas do modelo, além de que as tormentas que causam os maiores movimentos de sedimentos e nutrientes raramente são uniformes. Essa variação no padrão da distribuição espacial da precipitação tem significativo impacto no escoamento e, conseqüentemente, na produção de sedimentos (Faures et al., 1995).

O regime climatológico tem significativa importância na produção de sedimentos nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, desde que essa cultura é colhida nos meses de maio a novembro e parte do seu período de crescimento coincide com o início da estação das chuvas. Por essa razão e considerando que a cana-de-açúcar é cultivada em toda a microbacia, em áreas de relevo ondulado, essas áreas contribuem significativamente para a produção de sedimentos. A variação temporal da produção de sedimentos depende do escoamento, o qual, por sua vez, depende do regime da precipitação. Para o biênio estudado, 94 % da produção de sedimentos anual na MHRM ocorreu no período de dezembro a março e 70 % da precipitação anual registrada nos dois postos também ocorreu durante esse período de quatro meses.

Segundo Grunwald & Frede (1999), é importante notar que outros fatores, como o histórico dos eventos erosivos, a variação espacial dos solos na paisagem e a morfologia do sistema de drenagem, podem influenciar as diferenças entre a produção simulada e a observada. Além de que, para diferentes condições locais (uso da terra, clima, solos e relevo) e em diferentes escalas, os processos dominantes que influenciam o transporte de sedimentos não são os mesmos.

A distribuição espacial da produção de sedimentos média para o biênio 1999/2000 é apresentada na figura 5. Enquanto os maiores valores da produção de sedimentos ocorreram, na maioria das vezes, na

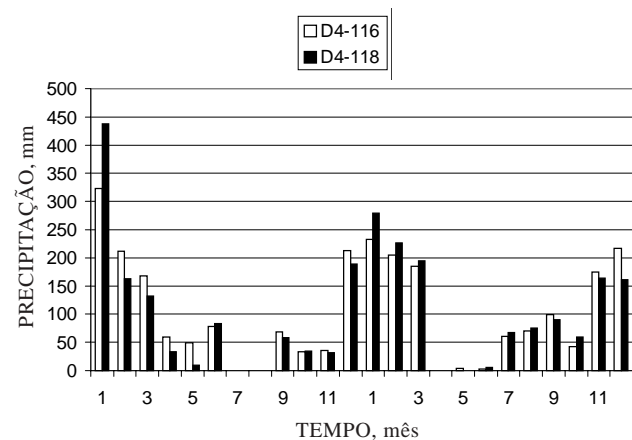


Figura 4. Distribuição temporal da precipitação nos dois postos pluviográficos instalados na MHRM.

parte alta da microbacia, graças ao relevo ondulado e ao uso intensivo dos solos com a cultura da cana-de-açúcar e pastagens, as sub-bacias localizadas na parte média-baixa da microbacia também tiveram maiores valores de produção de sedimentos. Segundo Beuselinck (2000), parte do sedimento produzido durante os períodos de tormentas é parcialmente depositada na microbacia, mas considerável parte é transportada para a saída pelo sistema de drenagem. O transporte de sedimentos para a rede de drenagem é complexo em razão da influência de muitos processos, como: a erosão do solo, o transporte de sedimentos e a deposição dentro da bacia (Gburek et al., 2000).

Em algumas sub-bacias, predominou o processo de deposição de sedimentos em vez de transporte, ou seja, nem todo o sedimento removido pelo processo de erosão foi transportado pela rede de drenagem, o que revela a forte deposição de sedimentos na parte média da microbacia da MHRM.

Segundo Carvalho (1994), o comportamento de uma bacia em relação à sedimentação é muito variável, desde as partes mais altas até às planícies. Isso depende das rochas e dos solos, da cobertura vegetal, das declividades, do regime de chuvas, bem como de outros fatores.

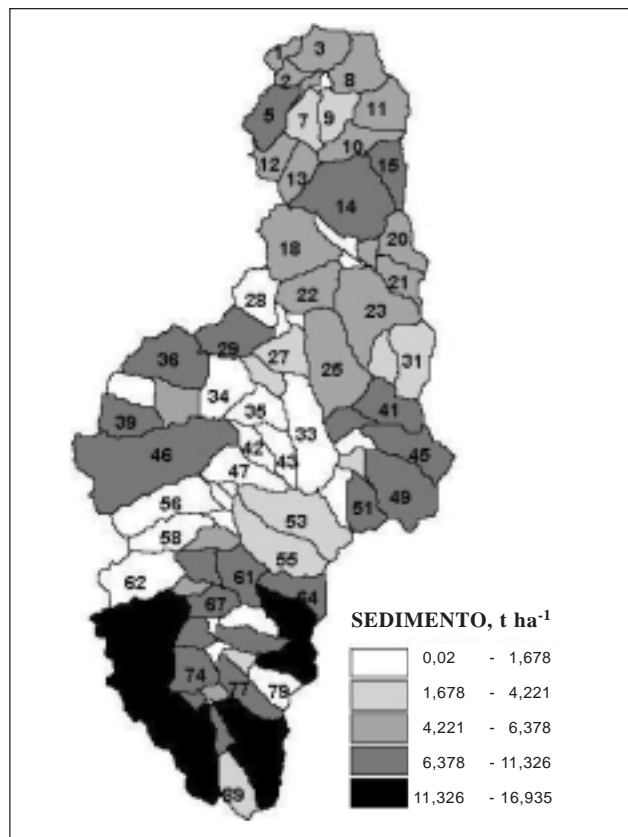


Figura 5. Distribuição espacial da produção anual de sedimentos (média para o biênio 1999/2000).

De modo geral, na alta bacia, percebeu-se maior erosão e transporte de sedimentos, enquanto, na parte baixa da bacia, observou-se, normalmente, menor taxa de erosão, ocorrendo formação de depósitos com forte processo de agradação. Verificou-se que, nas sub-bacias de cabeceiras, a produção de sedimentos foi realmente maior, à exceção da sub-bacia nº 89, diminuindo conforme decresce a altitude até a parte média da microbacia. Na parte baixa, notou-se um aumento da produção de sedimentos em relação à parte média, em decorrência da intensificação do uso do solo nessas regiões. Entretanto, a conexão entre a geração, o transporte e a produção de sedimentos é complexa, pela combinação dos fatores supracitados e pela variação temporal da capacidade da rede de drenagem em transportar sedimentos.

Os resultados da produção de sedimentos na sub-bacia nº 1 representam os processos erosivos e sedimentológicos que ocorrem em toda a MHRM durante o período de estudo. Nessa sub-bacia, o processo erosivo atua de forma branda. O relevo é quase plano e boa parte dos sedimentos destacados nas sub-bacias a montante foi depositada nas sub-bacias intermediárias.

As sub-bacias a montante apresentaram as maiores taxas de produção de sedimentos dentre todas as sub-bacias, no período analisado. Os fatores que contribuíram para a obtenção dessa expectativa de maior produção foram o relevo acidentado e os solos pouco resistentes à erosão. Essas sub-bacias são cultivadas com cana-de-açúcar e pastagens sobre solos Litólicos e Podzólicos, sendo susceptíveis ao processo erosivo. Isso confirma um forte argumento no meio científico de utilizar áreas de ocorrência desses solos, quase sempre em relevo acidentado, somente com culturas perenes ou como Áreas de Preservação Permanente. A localização espacial de áreas agrícolas em relação a vários fatores, como relevo, solos e clima, é de fundamental importância no controle do processo erosivo em microbacias.

O modelo SWAT forneceu estimativas de onde e quando a produção de sedimentos ocorreu e a partir desses resultados que medidas de conservação podem ser tomadas para controlar mais efetivamente a perda de sedimentos. Essa é a vantagem de fazer simulações com base em modelos. Entretanto, precauções devem ser tomadas quando da interpretação quantitativa dos resultados, visto que se deve direcionar maior atenção dos resultados qualitativos.

CONCLUSÕES

1. O teste de modelagem demonstrou a habilidade do modelo em simular a produção e o transporte de sedimentos na MHRM. Quando comparados aos dados observados no posto hidrossedimentométrico

localizado na microbacia, os resultados da simulação tiveram um bom ajuste.

2. Os processos hidrológicos associados ao uso e manejo da terra claramente exercem um papel dominante na produção e transporte de sedimentos.

AGRADECIMENTOS

Ao DAEE/SP e ao CTH/USP, pela cessão dos dados hidrossedimentométricos referentes à microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marinês.

LITERATURA CITADA

- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S. & WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Am. Water Res. Assoc.*, 34:73-89, 1998.
- ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. & MAIDMENT, D.R. Continuous-time water and sediment routing model for large basins. *Hydr. Engin.*, 121:171-183, 1995.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division. *Irrig. Drain. Eng.*, 119:429-442, 1993.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo, Ícone, 1990. 355p.
- BEUSELINCK, L.; STEEGEN, A.; GOVERS, G.; NACHTERGAELE, J.; TAKKEN, I. & POESEN, J. Characteristics of sediment deposits by major rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology*, 32:69-82, 2000.
- BROOKS, K.N.; FFOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M. & THAMES, J.L. Hydrology and the management of watersheds. Ames, Iowa State University Press, 1991. 392p.
- CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia prática. Rio de Janeiro, CPRM, 1994. 372p.
- CHAVES, H.M.L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). *R. Bras. Ci. Solo*, 15:345-350, 1991.
- COCHRANE, T.A. & FLANAGAN, D.C. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Soil Water Conser.*, 54:678-685, 1999.
- DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. ArcView interface for SWAT2000 - User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2001. 337p.
- FAURES, J.; GOODRICH, D.C.; WOOLHISER, D.A. & SOROOSHIAN, S. Impact of small-scale spatial on runoff modeling. *Hydrology*, 173:309-326, 1995.
- GBUREK, W.J.; SHARPLEY, A.N.; HEATHWAITE, L. & FOLMAR, G.J. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Environ. Qual.*, 29:130-144, 2000.
- GOODRICH, D.C.; FAURES, J.; WOOLHISER, D.A.; LANE, L.J. & SOROOSHIAN, S. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Hydr.*, 173:283-308, 1995.
- GRUNWALD, S. & FREDE, H.G. Using the modified agricultural non-point source pollution model in German watersheds. *Catena*, 37:319-328, 1999.
- KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D. & BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecol. Model.*, 106:261-289, 1998.
- LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R. & LAFLEN, J.M. Development and application of modern soil erosion prediction technology. *Austr. Soil Res.*, 30:893-912, 1992.
- OLIVEIRA, J.B. Solos da folha de Piracicaba. Campinas, Instituto Agrônomo, 1999. 173p. (Boletim Científico, 48)
- PETERSON, J.R. & HAMLETT, J.M. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Am. Water Res. Assoc.*, 34:531-544, 1998.
- PROJETO PIRACENA. Banco de dados "Geoprocessamento", 2001.
- RAWLS, W.J. & BRAKENSIEK, D.L. Prediction of soil properties for hydrologic modeling In: JONES, E.B. & WARD, T.J., ed. Watershed management in the 80's. New York: ASCE, 1985. cap.13, p.293-299.
- SHARPLEY, A.N. & WILLIAMS, J.R. EPIC - Erosion productivity impact calculator, 1. Model documentation. Washington, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 145p. (Technical Bulletin, 1798)
- SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J.G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Res. B.*, 30:453-462, 1994.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE-USDA. Soil Conservation Service. Hydrology. National Engin. Handb. Washington, USDA, 1972. (Section 4)
- VAN DEN BERG, M.; BURROUGH, P.A. & DRIESSEN, P.M. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 81:43-55, 2000.
- WILLIAMS, J.R. & BERNDT, H.D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 20:1100-1104, 1977.
- ZACHAR, D. Soil erosion: developments in soil science. New York, Elsevier Scientific, 1982. 547p.