

## Simulação de Escoamento em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento

Ronalton Evandro Machado, Carlos Alberto Vettorazzi, Décio Eugenio Cruciani

Departamento de Engenharia Rural/ESALQ/USP - Caixa Postal 09

Piracicaba, SP - remachad@carpa.ciagri.usp.br, cavettor@carpa.ciagri.usp.br, cruciani@carpa.ciagri.usp.br

Recebido: 04/02/02 - revisão: 05/08/02 - aceito: 05/11/02

### RESUMO

Neste estudo, o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi aplicado para simular o escoamento produzido na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, aflrente do rio Piracicaba, SP, para o biênio 1999/2000. A aplicação do modelo requer a entrada dos dados na forma especializada, o que foi feito com auxílio de uma interface entre o modelo e um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A microbacia foi discretizada em sub-bacias para se determinar os parâmetros de entrada no modelo. Os resultados obtidos na simulação do escoamento, médias mensais, 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 ( $D_p$ ). Foi feita uma calibração de alguns parâmetros físico-hídricos do solo, para a variável simulada. Para as condições específicas da microbacia do Ribeirão dos Marins, os resultados obtidos do escoamento simulado foram de 0,92 e -0,7% para o COE e o  $D_p$ , respectivamente, após a calibração, indicando um bom ajuste dos dados simulados comparados aos dados observados.

**Palavras-chave:** simulação de escoamento; microbacia; modelagem; geoprocessamento.

### INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos e de qualidade da água (H/WQ) 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 em jogo no ciclo hidrossedimentológico.

Um desses modelos, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), 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).

A maior limitação ao uso desses modelos é a dificuldade em trabalhar uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. A variabilidade espaço-temporal nas características da paisagem, incluindo solo, uso da terra, relevo e clima, afeta a resposta hidrológica do sistema físico, implicando em limitações à aplicação de modelos. A complexidade extrema da manipulação de grandes volumes de dados de natureza espacial e não espacial, por exemplo, limita e muito o uso dos modelos de parâmetros distribuídos.

Por essas razões, Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) são empregados na criação do banco de dados

para esses modelos. Os SIG's são destinados à aquisição e ao tratamento de dados georreferenciados, permitindo a manipulação de dados de diversas fontes, recuperando e combinando informações e efetuando vários tipos de análises (Alves, 1990). No SIG, as sucessivas análises dos dados espaciais podem dividir grandes áreas heterogêneas em pequenas unidades hidrologicamente homogêneas, sobre as quais os modelos são aplicados.

Apesar das vantagens da integração entre modelos e SIG's como uma poderosa ferramenta para análise em bacias hidrográficas, no Brasil essa poderosa combinação ainda é relativamente pouco utilizada. Nesse contexto, este trabalho apresenta-se com os seguintes objetivos: 1) avaliar os resultados gerados na modelagem de escoamento na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP, por meio da integração SWAT-ArcView no biênio 1999/2000; 2) calibrar o modelo para as condições da microbacia em estudo.

### MATERIAL E MÉTODOS

#### O modelo SWAT

O SWAT é um modelo matemático de parâmetro distribuído, que permite que diferentes processos físicos sejam 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, com anos ou mais, para computar os efeitos das variações de manejo. Embora o modelo opere em intervalos de tempo diários, ele é eficiente o bastante para simulações por muitos anos e seu objetivo não é simular eventos isolados.

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 sub-superficial, 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-SCS, 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 entrada de dados no SWAT (planos de informação cartográficos – PI's e dados alfanuméricos) é realizada via uma interface apropriada. Os PI's necessários são: o 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 PI's e do banco de dados relacionais para cada sub-bacia. A interface permite que as saídas do modelo sejam exibidas utilizando-se dos mapas, gráficos e tabelas do ArcView.

Para o propósito de modelagem, 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. O meio comum, para a divisão da bacia em sub-bacias, consiste em especificar a área limite (*threshold*), a qual é a área mínima necessária para drenar para um ponto para formar um canal (Tribe, 1992). Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units – HRU's) as quais correspondem a uma única combinação de cobertura da terra e solos dentro da sub-bacia.

As HRU's são partes da sub-bacia que possuem uma única combinação de uso da terra/solo/manejo. Uma ou mais combinação única de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia. Um nível de sensibilidade é adotado para eliminar áreas de uso da terra menores do que o valor arbitrado. O segundo passo controla a criação das HRU's com base na distribuição dos usos da terra selecionados sobre diferentes tipos de solos. O solo que cobre uma

porcentagem de área dentro da área de uso da terra menor do que o nível de sensibilidade é eliminado.

## Área de estudo e dados de entrada

A área selecionada para esse estudo foi a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (BHRM), afluente do rio Piracicaba, localizada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, entre as coordenadas UTM (Universal Transversa Mercator) 216000 m e 226000 m E, e as coordenadas 7470000 m e 7488000 m N (Fuso 22 S, meridiano 51°W), com uma área aproximada de 5973 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. Três categorias de uso da terra foram classificadas. A cultura da cana-de-açúcar ocupa a maior parte da área na microbacia (58,8%), em terrenos de menor declividade, enquanto que as encostas mais íngremes são ocupadas com pastagem (33,1%). A vegetação florestal original, quase inexistente devido à evolução do uso e ocupação do solo na área de estudo, encontra-se apenas em algumas grotas e às margens do ribeirão dos Marins e ocupa 8,1% (Figura 2). Os tipos de solos dominantes são litólicos (41%) e podzólicos (58%). Os dados dos solos predominantes na MBHM foram retirados do Boletim Científico n° 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 porcentagem das partículas do solo). O modelo associa os dados à categoria de solo especificada no Plano de Informação (PI) solos e cria o arquivo de entrada.

O modelo requer dados diários de precipitação, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. 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) 229474 m e 7486335 m (Figura 1). O procedimento utilizado para gerar dados diários de radiação é baseado no processo de geração fixa. 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 escoamento são provenientes dos pluviógrafos e do posto hidrossedimentométrico, instalados na microbacia em estudo, sob responsabilidade do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e

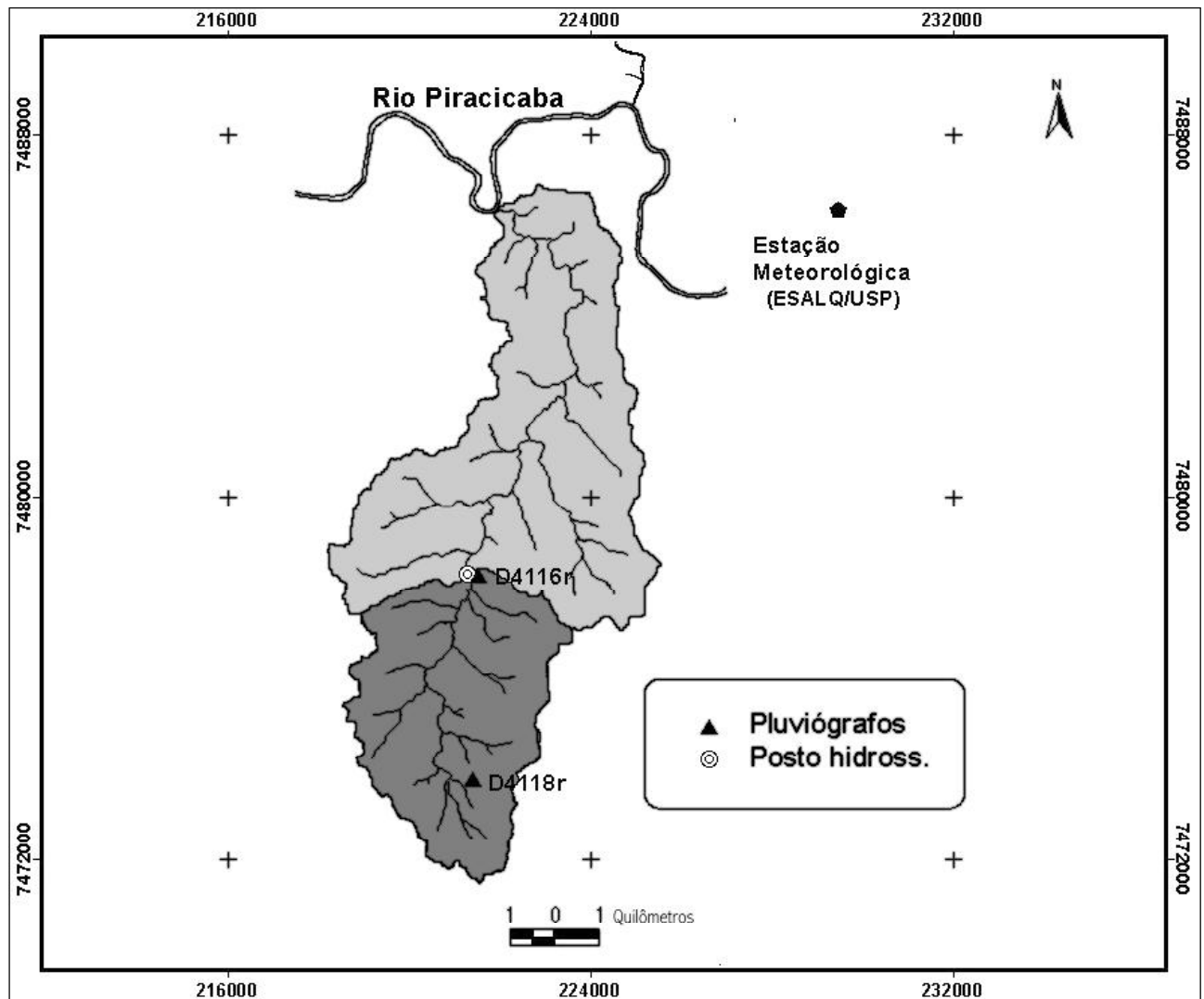


Figura 1. Microbacia do Ribeirão dos Marins, com a indicação da localização do posto hidrossedimentométrico e dos pluviógrafos.

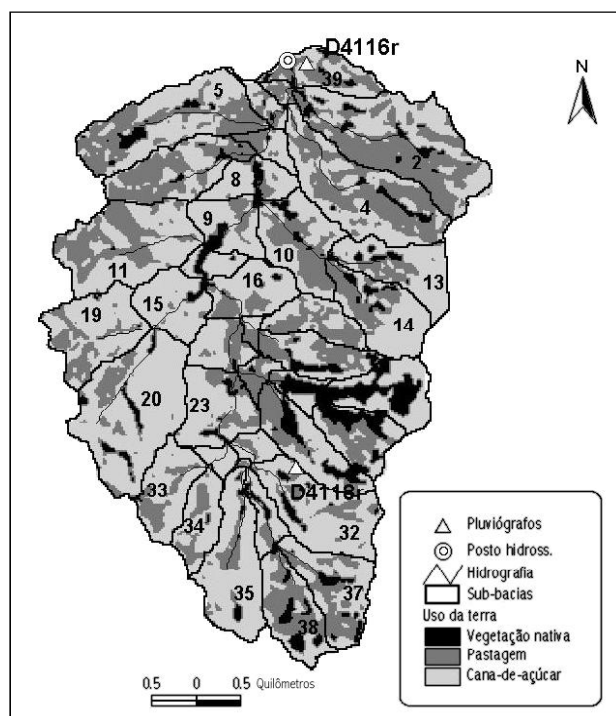
do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH)/USP. Um dos pluviógrafos (D4118r) está instalado na porção superior da microbacia, nas coordenadas (UTM) 221379 m e 7473744 m. O outro pluviógrafo (D4116r) está instalado próximo ao posto hidrossedimentométrico, nas coordenadas (UTM) 221497 m e 7478241 m. A bacia de contribuição até o posto, tem aproximadamente 2300 ha (Figura 1). A evapotranspiração potencial foi estimada pelo Método de Penman-Monteith.

Para a definição do número de sub-bacias foram feitas simulações para vários níveis de discretização da MHRM, considerando as áreas limites de: 10 ha, 20 ha, 30 ha, 40 ha, 60 ha, 80 ha, 100 ha, 120 ha, 150 ha, e 200 ha. As simulações foram feitas para duas situações. Na primeira, o uso da terra e o tipo de solo dentro da sub-bacia foram considerados como dominantes (uso da terra e solo de maior área na sub-bacia), gerando somente uma unidade de resposta

hidrológica (HRU). Isso corresponde à área total da sub-bacia, já que os outros tipos de uso da terra e solos são eliminados. Na segunda situação, múltiplas HRU's foram determinadas, com o nível de sensibilidade variando de 10% para uso da terra e 20% para solos.

### Calibração do modelo

A calibração total do modelo pode ser feita para: balanço de água e escoamento; sedimentos; nutrientes e pesticidas. Como o objetivo do trabalho foi simular o escoamento, somente essa variável foi calibrada. Como todo teste de calibração depende da disponibilidade de dados observados, uma tentativa foi feita para uma calibração "grosseira" e não uma calibração detalhada do modelo e também não foi feito o teste de validação.



**Figura 2.** Distribuição do uso da terra na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins até o posto hidrossedimentométrico.

Quando o  $D_v$  atingisse um valor igual ou abaixo  $\pm 5\%$  entre os valores simulados e observados, o processo de calibração seria finalizado. Três variáveis foram selecionadas para calibração: 1) ALPHA\_BF – Baseflow alpha factor ou constante de recessão do fluxo de base e definido como a taxa na qual a água subterrânea retorna para o rio; 2) AWC – Capacidade de água no solo disponível para as plantas; e 3) CN – Curva Número. A calibração foi feita somente para o escoamento total, nenhuma tentativa foi feita para calibrar especificamente o fluxo de base ou a recarga.

Para avaliar os dados simulados pelo modelo durante o período de calibração, utilizou-se de métodos estatísticos e de gráficos.

### Análises estatísticas

Estatísticas, incluído o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, COE, Equação (1), e o desvio dos dados simulados em relação aos dados observados ( $D_v$ ), Equação (2), (ASCE, 1993) foram computadas para a comparação entre o escoamento simulado e o observado no posto hidrossedimentométrico localizado na microbacia em estudo para o biênio 1999/2000. Como esse posto está localizado no terço superior da MHRM, o número de sub-bacias drenando dentro da bacia até o posto é diferente do total de sub-bacias, considerando toda a microbacia. Para esse estudo, a

microbacia até o posto foi dividida em 39 sub-bacias (Figura 2):

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

onde  $E_m$  é o evento observado;  $E_s$  o evento simulado pelo modelo;  $\bar{E}$  a média do evento observado no período de simulação; e  $n$  o número de eventos. O coeficiente de Nash-Sutcliffe, 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  $E$  é o evento observado no período analisado e  $E^*$  o evento simulado no período. O cálculo do desvio do evento analisado ( $D_v$ ) é importante por considerar o erro potencial nos dados medidos. Esses dois parâmetros foram usados em conjunto com os métodos gráficos e de dispersão para avaliar o desempenho do modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre o escoamento observado e simulado pelo modelo foi feita, primeiramente, analisando-se as diferenças entre os valores obtidos por ambos os procedimentos de discretização, considerando a combinação de uso da terra/solo dominante, nesse caso uma única HRU, e posteriormente considerando várias HRU's.

A Tabela 1 mostra a comparação entre os níveis de discretização utilizando uma única combinação de cobertura/solo dominante e a opção de múltiplas combinações para o nível de sensibilidade de 10% para uso da terra e 20% para solos. O COE variou entre 0,80 a 0,90 (dominante). Bons resultados foram obtidos usando a opção cobertura e solo dominante em qualquer nível de discretização e o COE não melhorou utilizando múltiplas HRU's. Por exemplo, utilizando-se a cobertura e solo dominante, para a área suporte de 10 ha, o COE foi 0,90, enquanto utilizando a área suporte 120 ha, o COE foi 0,80 (Figura 3). Dentro dessa mesma configuração, a precisão na simulação não aumentou quando mais combinações de cobertura e solo foram simuladas. Portanto, o aumento na precisão foi mínimo quando mais sub-bacias foram geradas nas simulações, isto é, quanto mais detalhada foi a discretização.

O  $D_v$  teve uma maior variação entre as discretizações (Figura 4), variando de -23,2% a -7,7% (dominante), entre os valores observados e simulados pelo modelo, indicando o valor negativo os testes nos quais o valor do escoamento simulado superou o valor total observado nos dois anos de registro.

Como visto anteriormente, o aumento na discretização da microbacia nas simulações, considerando tanto múltiplas

Tabela 1. Coeficiente de eficiência (COE) e desvio ( $D_v$ ) resultantes dos níveis de discretização para a simulação do escoamento.

Área (ha)	Discretizações		COE		Dv	
	Nº sub-bacias	Nº HRU	Dominante	10% e 20%	Dominante	10% e 20%
10	107	371	0,90	0,90	-13,3	-12,8
20	57	225	0,90	0,91	-10,2	-10,0
30	43	202	0,82	0,84	-7,7	-6,6
40	39	167	0,90	0,90	-12,7	-10,7
60	33	144	0,90	0,89	-13,1	-12,5
80	25	112	0,89	0,91	-14,8	-11,8
100	17	79	0,89	0,89	-14,7	-13,4
120	15	74	0,80	0,79	-23,2	-22,2
200	7	30	0,9	0,91	-16,3	-14,5

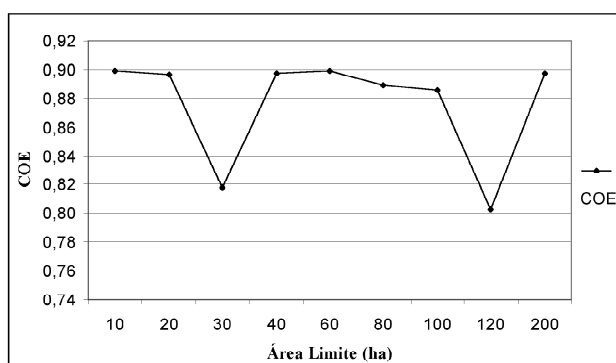
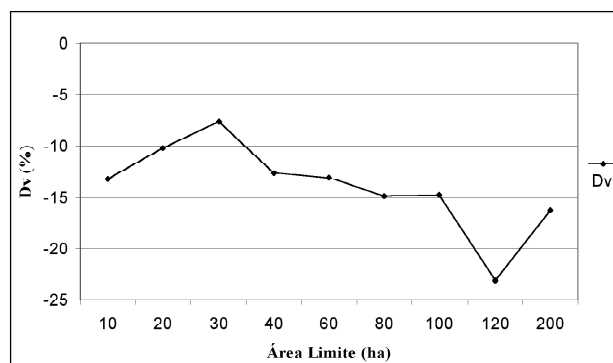


Figura 3. Variação do coeficiente de eficiência (COE) entre os níveis de discretização.

Figura 4. Variação do desvio ( $D_v$ ) entre os níveis de discretização.

HRU's quanto uma única combinação de uso da terra/solo, não melhorou significativamente os valores das estatísticas adotadas para a análise, mas de outro modo, aumentou o tempo de simulação e o tamanho dos arquivos gerados. Por exemplo, usando 20 ha como área limite, o número de combinações simuladas no caso dominante foi 57, enquanto utilizando a mesma área suporte com área de 10% para uso da terra e 20% para solos, o número de combinações foi 225. Entretanto, não está claro a partir de outros estudos qual o efeito do nível de discretização na melhora da precisão dos resultados simulados. Para o uso efetivo da integração modelo-SIG, é necessário ter conhecimento do nível de discretização da bacia para um adequado nível de detalhamento. Uma discretização "grosseira", pode levar a resultados ruins, enquanto discretizações muito "detalhadas" podem requerer mais dados de entrada e aumentar significativamente o tempo e espaço computacionais (principalmente para grandes bacias), com pouco ou nenhum aumento na precisão.

A Figura 5 mostra as hidrógrafas mensais simuladas pelo SWAT para todos os níveis de discretização (dominante). O escoamento teve pouca variação para as diferentes delimitações da bacia, devido ao fato de ser estreitamente relacionado à CN. O valor médio da CN é quase o mesmo para todas as delimitações, variando entre 59 a 83. Outro

fator é a variabilidade espacial na microbacia (uso da terra e solos), que não é grande o suficiente e, assim, pouco sensível aos níveis de decomposição adotados. A hipótese de que o grau da variabilidade espacial não foi grande o suficiente para produzir diferenças significativas nos resultados simulados. Em relação as discretizações adotadas, deve ser testado em outras bacias com maior grau de variabilidade espacial.

O emprego das propriedades do solo e uso da terra para determinar a variabilidade espacial na bacia quase sempre é o meio mais utilizado, desde que são eles os fatores mais importantes na estimativa da Curva Número, utilizada pelo SWAT para estimar o escoamento. A escolha de uma resolução espacial adequada para a aplicação de modelos de simulação em bacias hidrográficas é de fundamental importância nos processos hidrológicos e hidrogequímicos. Uma alta resolução dos dados pode significar a inclusão de maior variação espacial na análise do modelo. A resolução espacial e o aumento do processamento computacional do modelo são inter-relacionados.

Mamillapalli (1997), citado por Manguerra & Engel (1998), utilizou o SWAT para simular o escoamento em oito bacias hidrográficas com áreas variando de 2000 a 5000 km<sup>2</sup>, cada uma dessas bacias apresentando significativas diferenças climáticas, uso da terra, solo e relevo. Segundo o autor, estimativas de escoamento para várias decomposições não

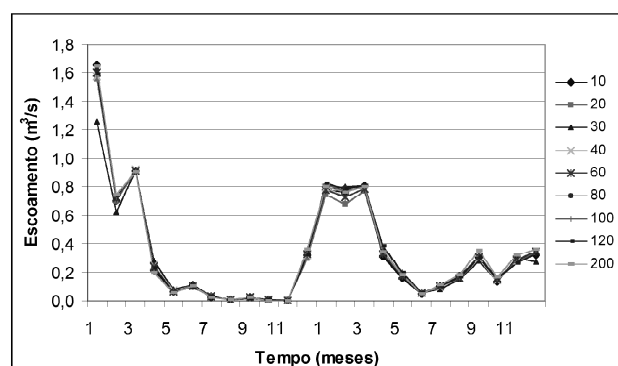


Figura 5. Hidrógrafas resultantes dos níveis de discretização (dominante).

foram significativamente diferentes em muitas situações, quando muitas sub-bacias virtuais (HRU's) foram consideradas. O autor encontrou estimativa razoável de escoamento nessas bacias, quando comparadas aos dados observados.

Os resultados indicaram que o modelo gerou uma boa estimativa em relação aos dados observados (Figura 6). O COE foi 0,90 (considerando a área limite de 40 ha), o qual indica que o modelo é melhor preditor do que a média dos dados medidos. Um COE com o valor 1 (um) indica que o modelo é perfeito, enquanto o valor zero ou negativo indica que a média é igual ou melhor estimador que o modelo. Um COE variando entre 0,70-0,80 geralmente indica um bom ajuste (Krysanova et al., 1998). No presente estudo, a eficiência na simulação do escoamento variou entre 0,80-0,90, com intervalo de tempo mensal. Como se pode observar, a avaliação estatística dos resultados da simulação foi muito satisfatória.

Esses resultados foram similares aos encontrados na literatura. Manguerra & Engel (1998) simularam o escoamento utilizando o SWAT na microbacia hidrográfica Animal Science (3,28 km²) e na bacia hidrográfica Greenhill (113,38 km²), localizadas no Estado de Indiana, EUA, sendo que o uso da terra predominante é a cultura anual (milho e soja). O COE obtido da comparação entre valores mensais de escoamento simulado e observado foram 0,69 para a microbacia hidrográfica Animal Science e 0,48 para a bacia hidrográfica Greenhill. King et al. (1999) aplicaram o modelo SWAT na microbacia Goodwin Creek (21,3 km²). Valores mensal e anual do escoamento simulado foram comparados com os valores observados por um período de 8 anos. Os resultados obtidos para o COE foram de 0,84 e 0,55, respectivamente. Srinivasan et al. (1993) aplicaram o modelo SWAT às bacias dos rios Seguin (24.469 km²) e Naches (25.161 km²), no Estado do Texas, EUA. Eles relataram que o coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) foi de 0,86 e 0,82 entre os escoamentos mensais observados e simulados para as duas bacias, respectivamente. Srinivasan & Arnold (1994) usaram o SWAT para modelar a bacia do rio Seco (114 km²), também no Estado do Texas, sendo que 98% da

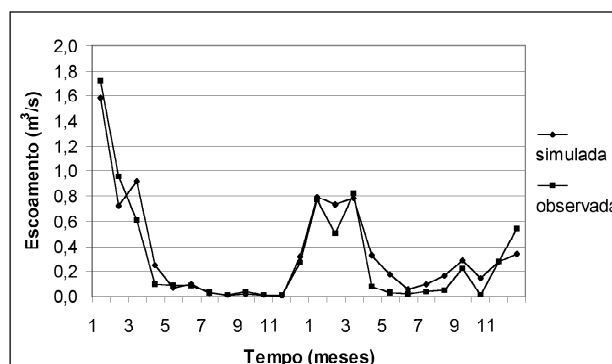


Figura 6. Hidrógrafas observada e simulada, considerando a área limite de 40 ha.

área da bacia esta sendo utilizada com pastagem, e registraram que o escoamento mensal médio simulado pelo modelo foi 12% menor do que os valores medidos. Binger (1996) também registrou razoável concordância entre volumes anuais simulados e medidos, com 90% para muitas bacias. Rosenthal et al. (1995) utilizaram o SWAT para avaliar o balanço de água na parte baixa da bacia do Rio Colorado (8927 km²), no Texas. Sem calibração, esse autores registraram uma relação significativa entre o escoamento mensal observado e o estimado ( $r^2 = 0,75$ ).

Embora a Figura 6 mostre que o modelo representou a variabilidade no regime de escoamento da microbacia razoavelmente bem como um todo (COE = 0,90), os escoamentos simulados pelo SWAT nos meses de março e abril de 1999 e nos meses de fevereiro a agosto de 2000 foram superestimados em relação aos dados observados. O total para os dois anos de simulação foi 12,7% maior do que os valores observados, considerando a área limite como 40 ha. Há também períodos onde o escoamento foi significativamente subestimado, particularmente nos meses de janeiro e fevereiro de 1999 e no mês de dezembro de 2000. 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 dos volumes de precipitação registrados nos dois postos durante o período da simulação tenham apresentado uma pequena diferença (42 mm), houve uma variação na distribuição da precipitação. Isso é demonstrado pela série temporal mensal da precipitação no período analisado nos dois postos, mostrado na Figura 7. O posto D4-118 está localizado na parte superior da microbacia, onde a atividade agrícola predominante é o cultivo da cana-de-açúcar, enquanto o posto D4-116 está localizado próximo ao posto hidrossedimentométrico (Figura 2). A distância entre ambos é de aproximadamente 4500 m. Segundo Goodrich et al. (1995), na aplicação de modelos H/WQ, a precipitação é geralmente assumida como espacialmente uniforme e não é considerada a sua contribuição nas incertezas das respostas do modelo. Essa variação no padrão da distribuição espacial

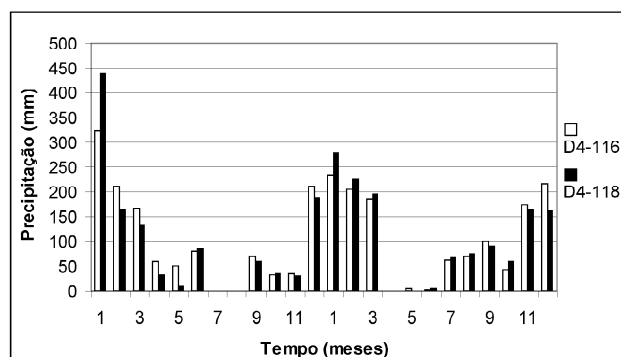


Figura 7. Distribuição temporal da precipitação nos dois postos pluviográficos.

da precipitação tem significativo impacto no escoamento (Faures et al., 1995).

A Figura 8 mostra a relação entre o total precipitado (média dos dois postos) e o escoado no período analisado. Os dados de escoamento até o posto hidrossedimentométrico foram convertidos para milímetros. Os valores mensais do escoamento na microbacia tiveram uma boa correlação com a precipitação mensal, sendo o valor de  $r^2$  (0,82), significativo ao nível de 1%. O valor do coeficiente da correlação da precipitação com o escoamento simulado pelo modelo (Figura 9) foi de 0,90, também significativo ao nível de 1%.

Conforme os resultados apresentados anteriormente na Figura 6, o modelo superestimou os menores valores do escoamento comparativamente aos valores observados, especificamente no ano de 2000. Como nesse período o regime hídrico foi governado pelo escoamento de base, esses valores indicam que os resultados da simulação nesse período estão relacionados mais a esse tipo de escoamento do que com o escoamento superficial. O modelo gera um *default* dos valores das variáveis (13 variáveis) relacionadas à água subterrânea. Caso os valores reais desses parâmetros estejam disponíveis, pode-se fazer a edição dessas variáveis, o que não ocorreu neste caso. Desses parâmetros, segundo Spruill et al. (2000), o fator alfa é o mais sensível. Adotando o valor do fator como zero, virtualmente elimina-se a contribuição do fluxo de retorno (Manguerra & Engel, 1998).

Para melhor simular o escoamento, algumas modificações foram feitas nos parâmetros de entrada utilizados na simulação não calibrada. Primeiramente os valores de *default* da CN, obtidos a partir da interface ArcView/SWAT, foram modificados para melhor representar as condições de uso da terra e solo na microbacia do Ribeirão dos Marins. Isso foi feito pela redução dos valores da CN em 10%, conforme as recomendações sugeridas por Mockus (1972).

Desde que a infiltração decresce com o aumento do escoamento, o fluxo base e a recarga são ambos inversamente correlacionados com a Curva Número. O fator alfa foi modificado a partir do valor do *default* do modelo (-25%). Para também diminuir o volume do fluxo de base, a capaci-

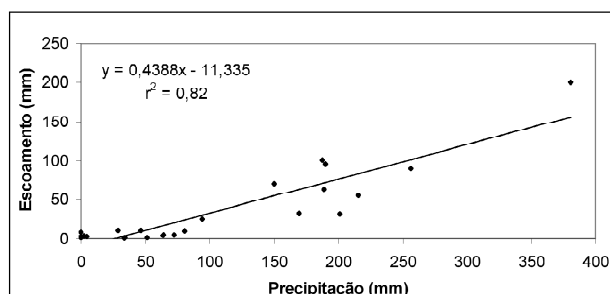


Figura 8. Diagrama de dispersão entre a precipitação e o escoamento observado.

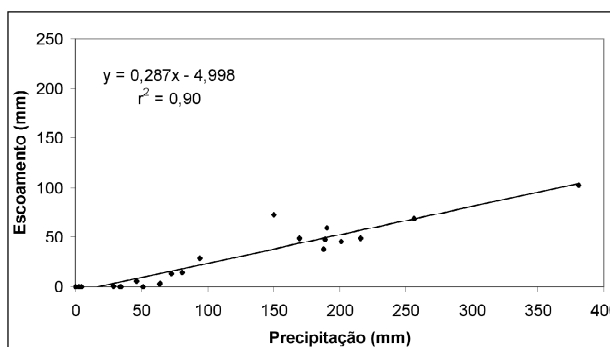


Figura 9. Diagrama de dispersão entre a precipitação e o escoamento simulado.

dade água disponível (AWC) foi aumentada em 5%. Segundo Finch (1998), os parâmetros mais críticos em modelos de balanço de água, para estimativa da água subterrânea, são aqueles requeridos pelos componentes do solo (particularmente capacidade de água disponível). Warrick & Nielsen (1980) compararam o resultado de diferentes estudos a respeito da variabilidade de parâmetros do solo. Eles encontraram coeficientes de variação de 90-190% e 170-400% para condutividade hidráulica saturada e não saturada, respectivamente.

Com o aumento da AWC, está ativa do escoamento, fluxo de base e recarga decrescem, enquanto a evapotranspiração (ET) aumenta (Arnold et al., 2000). Com o aumento da ET, menor quantidade de água estará disponível para o escoamento superficial, fluxo de base e recarga. Por outro lado, com menor azenamento, menor quantidade de água irá escoar na superfície ou percolar, e conseqüentemente, menor quantidade irá ser armazenada no solo, ficando disponível para a ET. Outras propriedades do solo permaneceram a mesma, com o na simulação sem calibração.

Na Figura 10, o escoamento simulado após a calibração do modelo é comparado aos dados observados. Exceto para os meses 4, 5, 8 e 10 de 2000, o valor do escoamento simulado está geralmente em boa concordância com os valores observados. Esses resultados sugerem que o SWAT tendeu a superestimar o fluxo de base nas condições do estudo. Isso não é surpreendente, desde que a estimativa dos parâmetros de aquífero é difícil de ser feita e quase sempre não é disponível. Também somente o escoamento total foi

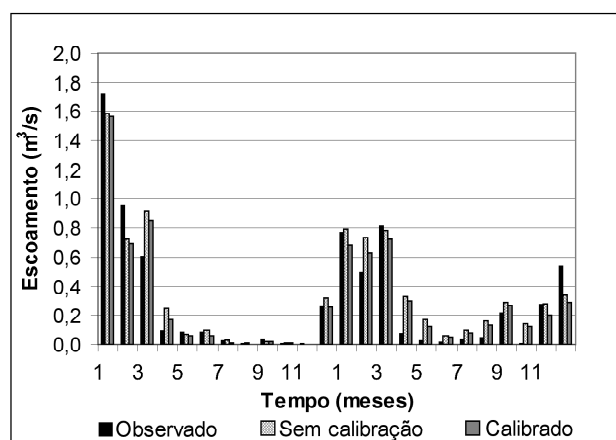


Figura 10. Escoamento observado e simulado antes e após calibração.

calibrado. Nenhuma tentativa foi feita para calibrar o fluxo de base. Segundo Butcher (2001), o SWAT não contém um completo balanceamento de massa dos componentes que simulam a água subterrânea. Isso é um problema comum em modelos para bacia hidrográfica, pois a representação do tempo de resposta da água subterrânea é maior que o passo de tempo para simulação dos processos na superfície. O COE, o  $D_v$  e o coeficiente de correlação  $r^2$  entre valores observados e simulados, antes e após a calibração, são listados na Tabela 2. O escoamento total no período foi superestimado em 0,7% após a calibração. O valor do COE foi 0,92 e o da correlação 0,94. Resultados de trabalhos anteriores podem dar uma idéia do nível aproximado de eficiência alcançado. Por exemplo, Cho et al. (1995) chegaram a um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,83 entre valores de escoamento mensais simulados e observados, usando o modelo SWAT calibrado aplicado na bacia Brodhead (250 km<sup>2</sup>), localizada no nordeste do Estado da Pensilvânia (EUA). Srinivasan et al. (1998) obtiveram COE's de 0,77 e 0,84 durante o período de calibração, para duas bacias de mesoescala nos EUA.

## CONCLUSÕES

A microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins foi discretizada em 39 sub-bacias até o posto hidrossedimentométrico, para a simulação do escoamento, com o auxílio de uma interface entre o modelo SWAT e um SIG. Os resultados obtidos da simulação do escoamento, médias mensais, foram comparados aos dados observados em um posto hidrossedimentométrico localizado no terço superior da microbacia.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o nível de discretização adotado na microbacia para esse estudo foi adequado para a modelagem do escoamen-

Tabela 2. Valores do COE,  $D_v$ (%) e  $r^2$ , antes e após a calibração.

	Sem Calibração	Calibrado
COE	0,90	0,92
$D_v$	-12,7	-0,7
$r^2$	0,91	0,94

to, considerando a opção de uso da terra e solo dominante. Quando comparado com os dados observados no posto hidrossedimentométrico, os resultados das simulações foram de 0,92 e -0,7% para o COE e o  $D_v$ , respectivamente, após a calibração, indicativo de um bom ajuste.

## AGRADECIMENTOS

Ao DAEE/SP e ao CTH/USP pela cessão dos dados hidrossedimentométricos referentes a microbacia do Ribeirão dos Marins e ao Instituto Agronômico de Campinas (IAC) pela cessão de parte dos dados climáticos compilados da região de Piracicaba/SP obtidos no posto agrometeorológico da ESALQ/USP.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, D. S. (1990). Sistema de informação geográfica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto, 1, São Paulo. Anais. São Paulo: USP, Escola Politécnica, p.66-78.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R. & ALLEN, P. M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, vol.227, p.21-40.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. & WILLIAMS, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, vol.34, n°1, p.73-89.
- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. & MAIDMENT, D. R. (1995). Continuous-time water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol.121, n°2, p.171-183.
- ASCE (1993). Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol.119, n°3, p.429-442.
- BINGER, R. L. (1996). *Runoff Simulated from Goodwin Creek Watershed Using SWAT*. Transactions of the ASAE, vol.9, n°1, p.85-90.
- BUTCHER, J. (2001). Comunicação pessoal.
- CHO, S. M.; JENNINGS, G. D.; STALLINGS, C. & DEVINE, H. A. (1995). GIS – Based Water Quality Model Calibration in the Delaware River Basin. ASAE Microfiche N. 952404. St. Joseph, Michigan: ASAE.



- DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. (2001). ArcView Interface for SWAT2000 – User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas, EUA, July.
- FAURES, J.; GOODRICH, D. C.; WOOLHISER, D. A. & SOROOSHIAN, S. (1995). Impact of small-scale spatial on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, vol.173, p.309-326.
- FINCH, J. W. (1998). Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model – sensitivity to land surface parameters. *Journal of Hydrology*, vol.211, p.112-125.
- GOODRICH, D. C.; FAURES, J.; WOOLHISER, D. A.; LANE, L. J. & SOROOSHIAN, S. (1995). Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, vol.173, p.283-308.
- KING, K. W.; ARNOLD, J. G. & BINGER, R. L. (1999). Comparison of Green-Ampt and Curve Number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. *Transactions of the ASAE*, vol.42, n°4, p.919-925.
- KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D. & BECKER, A. (1998). Development and test of a Spatially Distributed Hydrological/Water Quality Model for Mesoscale Watersheds. *Ecological Modeling*, vol.106, p.261-289.
- MANGUERRA, H. B. & ENGEL, B. A. (1998). Hydrologic parameterization of watersheds for runoff prediction using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, vol.34, n°5, p.1149-1162.
- MOCKUS, V. (1972). *Estimation of direct runoff from storm rainfall*. In: National Engineering Handbook, cap.10, p.1-24, Section 4, Hydrology. Washington. D.C.: USDA-SCS.
- OLIVEIRA, J. B. (1999). Solos da folha de Piracicaba. Campinas: Instituto Agrônômico, 173p. (Boletim Científico, 48).
- PETERSON, J. R. & HAMLETT, J. M. (1998). Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, n°3, p.531-544.
- PROJETO PIRACENA (2001). Banco de dados "Geoprocessamento": [www.cena.usp.br/piracena](http://www.cena.usp.br/piracena).
- ROSENTHAL, W. D.; SRINIVASAN R. & ARNOLD, J. G. (1995). Alternative river management using a Linked GIG-Hydrology Model. *Transactions of the ASAE*, vol.38, n°3, p.783-790.
- SHARPLEY, A. N. & WILLIAMS, J. R. (1990). EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin, n°1798.
- SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R. & TARABA, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using o SWAT model. *Transactions of the ASAE*, vol.43, n°6, p.1431-1439.
- SRINIVASAN, R. & ARNOLD J. G. (1994). Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, vol.30, n°3, p.453-462.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD J. G.; ROSENTHAL, W. & MUUTIAH, R. S. (1993). *Hydrologic Modeling of Texas Gulf Basin Using GIS*. In: *Proceedings International GIS and environmental modeling*, 2, Breckenridge, Colorado. Colorado: IAHS. p.213-217.
- SRINIVASAN, R.; RAMANARAYANAN, T. S.; ARNOLD, J. G. & BEDNARZ, S. T. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application. *Journal of the American Water Resources Association*, vol.34, n°1, p.91-101.
- TRIBE, A. (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, vol.139, p.263-293.
- USDA-SCS (1972). U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service. Hydrology In: Estados Unidos. Soil Conservation Service. *National Engineering Handbooks*. Washington: USDA (Section 4).
- WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). *Application of Soil Physics*. New York: Academic Press, p.319-344.

## Streamflow Simulation for a Small Watershed Using Geoprocessing and Modeling Techniques

### ABSTRACT

In this study, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was applied to simulate streamflows within the Ribeirão dos Marins watershed, in Piracicaba, SP, Brazil, for the period 1999/2000. This model requires input data in spatial format. These data were handled through an interface between the model and a Geographic Information System (GIS). The watershed was discretized in sub-basins to determine the parameters of model input. The results simulated, monthly averages of streamflows, were compared with the observed data from a gauge located in the watershed area, using the Nash Sutcliffe Coefficient (COE) and the deviation between the simulated data and the measured data ( $D_v$ ). Some physical-hydrological parameters of soil were calibrated for the simulated variable. The results for the simulated streamflows were 0.92 and -0.7% for the COE and the  $D_v$ , respectively, after the calibration, indicating a good agreement of the simulated data with the observed data.

Key-words: streamflow simulation; small watershed; modeling; geoprocessing.