

# ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL RÁPIDO E SUA CARGA EM SUSPENSÃO COM A APLICAÇÃO DO MODELO DE SEPARAÇÃO DE HIDROGRAMAS COM FILTROS NUMÉRICOS: BACIA DO RIO SOROCABA - SP

*Alexandre Martins FERNANDES, Murilo Basso NOLASCO, Jefferson MORTATTI*

Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA)/USP. Avenida Centenário, 303. Caixa Postal 96. CEP 13400-970. Piracicaba, SP. Endereços eletrônicos: afernandes@cena.usp.br; mnolasco@cena.usp.br; jmortatt@cena.usp.br

Introdução  
Caracterização da Área de Estudo  
Desenvolvimento Metodológico  
Limitações do Método  
Resultados e Discussão  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O escoamento fluvial total de uma bacia de drenagem, considerando um modelo de dois reservatórios, pode ser entendido como a soma do escoamento superficial rápido com o escoamento de base ou subterrâneo, estando o primeiro relacionado diretamente com a recarga pluvial e responsável direto pelo dinamismo da erosão mecânica em bacias de drenagem. Dada a importância do rio Sorocaba como manancial de abastecimento de água para cerca de 1.000.000 habitantes, este trabalho teve por objetivo estimar o escoamento superficial rápido, com ênfase na separação do escoamento total num modelo de dois componentes, com o emprego de filtros numéricos auto-recursivos de 1ª ordem, para o período de 1984 a 2008, em termos de variabilidade temporal e carga de material particulado transportado fluvialmente. O conhecimento do componente escoamento superficial rápido do rio Sorocaba nos últimos 25 anos forneceu subsídios para uma melhor avaliação e entendimento dos processos erosivos predominantes na bacia de drenagem e suas conseqüências aos corpos de água. Esta componente representou 38,04% do escoamento total médio anual e sua variabilidade se mostrou diretamente associada ao regime de precipitação, com uma carga estimada de material particulado transportado no período chuvoso 10 vezes superior à observada no período seco.

**Palavras-chave:** hidrologia, escoamento superficial rápido, bacia de drenagem, material particulado em suspensão

**ABSTRACT** – *A.M. Fernandes, M.B. Nolasco, J. Mortatti - Estimative of quick surface runoff and its suspended load with application of the hydrograph separation model with numeric filters: Sorocaba river basin – SP.* The total river flow of a drainage basin, considering a two-reservoir model, can be understood as the sum of quick surface runoff and the baseflow or groundwater flow, the first being directly related to rainfall recharge and responsible for the mechanical erosion dynamism in the drainage basin. Considering the importance of the Sorocaba river as source of water supply to about 1,000,000 inhabitants, this study aimed to estimate quick surface runoff, with emphasis on the total river flow separation in a two-component model, with the use of 1st order's auto-recursive filters, for the 1984 - 2008 period, in terms of temporal variability and suspended load carried by the river. Knowing the component of the runoff surface of Sorocaba river in the last 25 years provided subsidies for better assessment and understanding of erosion prevalent in the drainage basin and its consequences to water bodies. This component accounted for 38,04% of total average annual flow and its variability showed to be directly associated with rainfall recharge, with an estimated suspended load carried during the rainy season 10 times higher than observed in the dry season.

**Keywords:** hydrology, quick surface runoff, drainage basin, suspended load.

## INTRODUÇÃO

O escoamento total de um rio pode ser entendido como o somatório das contribuições do escoamento superficial, do escoamento sub-superficial e do escoamento subterrâneo, também chamados de componentes ou reservatórios. Essa interpretação é um reflexo da capacidade de abstração de quem avalia esses processos físicos e a sua tradução em modelos matemáticos (Araujo & Dias, 1995).

Vários métodos podem ser empregados na separação de um hidrograma de cheia em dois ou mais componentes ou reservatórios principais, desde o método gráfico proposto por Barnes (1939), passando pelo de traçadores químicos (Pinder & Jones, 1969) e isotópicos (Dincer et al., 1970; Fritz et al., 1976), chegando até aos métodos estatísticos envolvendo séries temporais e filtros auto-recursivos (Hino & Hasebe, 1981, 1984, 1986).

O escoamento fluvial total de uma bacia de drenagem, considerando um modelo de dois reservatórios, pode ser entendido como a soma de dois componentes principais: o escoamento superficial rápido e o escoamento de base ou subterrâneo (Pilgrim et al., 1979; Hooper & Shoemaker, 1986; Robson & Neal, 1990). O escoamento superficial rápido está relacionado diretamente com a recarga pluvial, sendo produzido durante ou imediatamente após a precipitação, levando ainda em consideração os aspectos geomorfológicos e cobertura vegetal da bacia de drenagem.

Após um período de estiagem, a vegetação e o solo estão com pouca umidade e os cursos d'água estão sendo alimentados pelo lençol de água subterrâneo, mantendo sua vazão de base. Quando se inicia um evento de precipitação, boa parte da água é interceptada pela vegetação e a que chega ao chão é infiltrada no solo; com a continuidade da precipitação, a capacidade de retenção da vegetação se esgota e a água cai sobre o solo, a capacidade de infiltração do solo pode ser excedida e a água começa a formar um filme de água sobre o solo e a se mover como escoamento superficial em direção a um curso de água. Se a chuva persistir, o escoamento superficial ocorrerá de forma contínua, na direção de um rio, se a chuva cessar, o escoamento superficial cessará (Hudak, 2005).

Tal escoamento é responsável direto pelo dinamismo da erosão mecânica em bacias de drenagem, com a desagregação de partículas do solo da sua massa original, o transporte e a eventual deposição dessas partículas ocasionadas pela ação das gotas de chuva e do escoamento superficial da água sobre o solo (Cassol et al., 2008). O escoamento de base ou subterrâneo, responsável por manter a perenidade dos rios nos períodos de estiagem, apresenta uma circulação mais lenta e se encontra associado ao processo de erosão

química, sendo derivado de várias fontes no perfil dos solos mais profundo e dos aquíferos.

O conhecimento dessas contribuições no escoamento fluvial total tem sido de fundamental importância na compreensão das relações hidrogeoquímicas entre os componentes hidrológicos, precipitação, vazão e evapotranspiração e o material particulado transportado fluvialmente oriundo dos processos erosivos nas bacias de drenagem. A evolução temporal do escoamento superficial rápido permite inferir sobre o grau de degradação que se encontram determinadas áreas, permitindo identificar possíveis alterações nesses ecossistemas (Mortatti et al., 1997).

A dificuldade em se definir exatamente entre o que é escoamento direto e subterrâneo em cada instante faz com que os modelos clássicos de separação de hidrogramas envolvam, muitas vezes, um alto grau de subjetividade. A análise de hidrogramas cada vez mais complexos permitiu uma evolução nesse contexto hidrológico, principalmente nos conceitos de formação de cheias em áreas de drenagem; e, a aplicação do método de separação através de métodos puramente estatísticos envolvendo análise espectral de Fourier para séries cronológicas de vazões (Probst & Sigha, 1989) e mais recentemente a aplicação de filtros auto-recursivos de 1ª ordem, tornando essa análise mais objetiva, pois seus parâmetros são obtidos por critérios objetivos (Araujo & Dias, 1995).

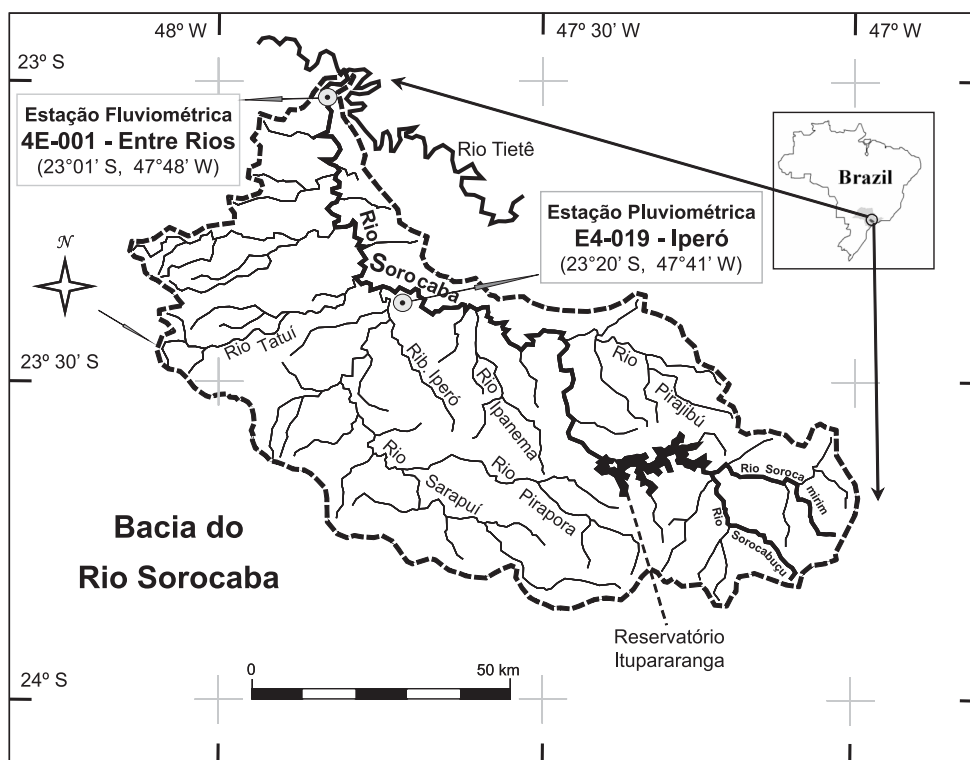
O presente trabalho teve por objetivo o estudo do escoamento total do rio Sorocaba, com ênfase na separação do escoamento superficial rápido num modelo de dois componentes e a análise de sua variabilidade temporal, com o emprego de filtros numéricos auto-recursivos de 1ª ordem, para a série histórica de vazões fluviais de 1984 a 2008, estimando-se ainda a carga de material particulado transportado por esta componente nos períodos seco e chuvoso.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Sorocaba, afluente mais importante da margem esquerda do Médio Tietê, percorre 227 km, considerando seu leito natural, antes de desembocar no rio Tietê (Figura 1). Localizada na porção sudeste do Estado de São Paulo, entre os paralelos 23° e 24° de latitude S e 47° e 48° de longitude W, sua bacia de drenagem ocupa uma área de 5.269 km<sup>2</sup> e abrange 18 municípios, com uma população total de aproximadamente 1,150 milhões de habitantes (IBGE, 2007).

A bacia de drenagem do rio Sorocaba apresenta seu trecho superior no Planalto Atlântico e o restante na Depressão Periférica, com altitudes variando de 1200 a 500 m, desde as terras mais altas nas cabeceiras até a foz no rio Tietê, respectivamente. A drenagem

apresenta um padrão dendrítico, com morros altos, vales entalhados e densidade de drenagem elevada, apresentando um nível de fragilidade potencial de médio a alto e estando sujeita a fortes atividades erosivas (Ross & Moroz, 1997). A maior parte da vegetação original, caracterizada por matas, capoeiras, campos, cerrados e vegetação de várzea, foi retirada para a ocupação agrícola e pelos processos de urbanização ao longo da bacia, sendo que as cabeceiras ainda apresentam expressivas áreas com cobertura vegetal original (IPT, 2005). Segundo a classificação Köppen, o clima é Cwa na área da Depressão Periférica e Cwb nas áreas mais elevadas, com o predomínio de chuvas no verão e estiagem no inverno.

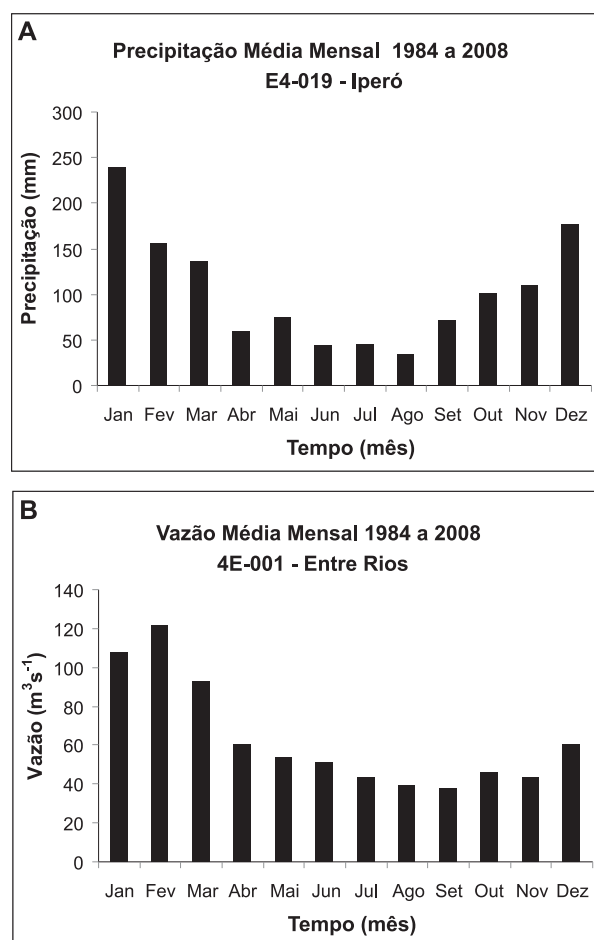


**FIGURA 1.** Localização da bacia do rio Sorocaba e das estações fluviométrica (4E-001 - Entre Rios) e pluviométrica (E4-019 – Iperó).

Os regimes pluviométrico e fluviométrico da bacia do rio Sorocaba no período de 1984 a 2008 foram caracterizados a partir de dados diários fornecidos pelo Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (Maria Laura – informação pessoal em 11mar2009) para as estações E4-019 – Iperó (23°20'S, 47°41'W) e 4E-001 – Entre Rios (23°01'S, 47°48'W), respectivamente. A escolha dessas estações levou em consideração a disponibilidade de dados confiáveis para o período de estudo e a sua representatividade na bacia de drenagem, estando a primeira localizada na porção média da bacia de drenagem e a segunda próxima à foz do rio Sorocaba, entendida como integradora de todos os processos que ocorrem na bacia de drenagem (Figura 1).

A precipitação média anual no período estudado foi de 1246,3 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso (239,8 mm) e agosto o mais seco (34,8 mm). Já a vazão média anual para o mesmo período foi de 63,1 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, com maior vazão média mensal em fevereiro (122,1 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) e menor em setembro (37,5 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). Podem ser observadas na Figura 2 as médias mensais de precipitação (a) e de vazão (b), onde é possível verificar a influência da sazonalidade da precipitação no regime de fluviométrico do rio Sorocaba.

**FIGURA 2.** Médias mensais de precipitação (a) e vazão (b) na bacia do rio Sorocaba no período de 1984 a 2008.



## DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

A separação de hidrogramas em um modelo de dois componentes, metodologia estatística de emprego de filtros numéricos desenvolvida por Hino & Hasebe (1981), foi aplicada por Araujo & Dias (1995) para uma série de dados diários de vazão. Esta técnica consiste em um processo de separação estatística utilizando um filtro numérico de separação de alta frequência, permitindo a somente a passagem dos sinais de baixa frequência, que são associados à componente subterrânea do escoamento total; e que foi adaptada por Mortatti et al. (1997) para dados mensais de vazão do rio Amazonas, utilizando filtros numéricos auto-recursivos de 1ª ordem para uma série temporal de dados de escoamento total do referido rio. Esse filtro, para uma série temporal de dados do escoamento total de um rio ( $Q_t$ ), calculados para uma equação de filtro de 1ª ordem, é expresso de acordo com a equação (1):

$$Q_n = \alpha [(B \times Q_{n(t-1)}) + A \times Q_t] \quad (1)$$

onde  $Q_n$  corresponde à vazão do fluxo de base ou subterrâneo filtrado;  $\alpha$  é o fator de ponderação escolhido de modo a evitar os sinais negativos e que está associado, em termos de sensibilidade de cálculo, ao valor de escoamento superficial rápido mínimo igual a zero; A e B são constantes expressas de acordo com as equações (2) e (3):

$$A = \frac{e^{-\left(\frac{1}{Tc}\right)}}{Tc} \quad (2)$$

$$B = \frac{\Delta t}{Tc} \quad (3)$$

onde  $\Delta t$  o intervalo de tempo (base temporal dos dados da série de vazão) e  $Tc$  o período da função de separação que representa a constante de tempo do filtro. O período da função de separação ( $Tc$ ) pode ser calculado estatisticamente, através da análise de séries temporais de Fourier, com determinação da frequência de corte ( $fc$ ) da série de vazões após análise de periodograma, de acordo com a equação (4):

$$Tc = \frac{1}{(2\pi \times fc)} \quad (4)$$

Como em um modelo de dois compartimentos o escoamento total representa a soma dos escoamentos rápido superficial e subterrâneo, foi possível adaptar a equação (1) para a determinação do escoamento superficial rápido ( $Q_r$ ) a partir de uma série temporal de dados anuais do escoamento total ( $Q_t$ ), de acordo com a equação (5):

$$Q_r = Q_t - \alpha [(B \times Q_{n(t-1)}) + A \times Q_t] \quad (5)$$

De acordo com Mortatti et al. (2004), tal metodologia permite, de forma bastante simples, separar o hidrograma de cheia num modelo de dois reservatórios, identificando as componentes do escoamento total ( $Q_t$ ): superficial rápido ( $Q_r$ ) e subterrâneo ( $Q_n$ ) e suas constantes  $K_r$  e  $K_n$ , equações 6 e 7, respectivamente.

$$K_r = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (6)$$

$$K_n = \frac{Q_n}{Q_t} \quad (7)$$

A variabilidade do escoamento superficial rápido ( $\Delta Q_r$ ) para o período de estudo, em base anual, foi calculado de acordo com a equação 8.

$$\Delta Q_r = \frac{(Q_r - Q_{r\text{médio}})}{Q_{r\text{médio}}} \quad (8)$$

onde  $Q_r$  é o escoamento rápido superficial médio anual e  $Q_{r\text{médio}}$  é o escoamento rápido superficial médio do intervalo de tempo considerado, sendo 25 anos no presente estudo.

O escoamento superficial rápido está associado diretamente aos processos de erosão mecânica que ocorrem em uma bacia de drenagem; para um melhor entendimento desses processos torna-se importante conhecer a carga de material particulado transportado fluvialmente por este compartimento. Para o presente estudo foram realizadas 9 excursões a campo para a coleta de amostras de sedimento em suspensão. O canal do rio na estação de amostragem apresentou-se bem encaixado, com largura variando entre 35 a 40 m. A cada excursão foram coletadas amostras, em triplicata, nas margens esquerda e direita, a 10 m do centro do canal, e no eixo principal da corrente do rio, na porção central do canal, sempre a 1,5 m de profundidade, utilizando um amostrador pontual de estágio simples de 500 mL, adaptado por Mortatti (1995) para rios de médio porte, sendo compostas posteriormente para maior representatividade da estação amostrada. A quantificação do material particulado em suspensão (MPS) foi feita por gravimetria (Meade, 1985), após processo de filtração manual à vácuo utilizando filtros de acetato de celulose 0,45  $\mu\text{m}$ , previamente secos e pesados.

A concentração do material particulado em suspensão transportado pelo escoamento superficial rápido foi estimada de acordo com o método



desenvolvido por Probst & Sigha (1989), conforme equação (9):

$$Cr = \frac{Ct}{Kr} \quad (9)$$

onde Cr é a concentração de material particulado transportado fluvialmente pelo escoamento superficial rápido ( $\text{g L}^{-1}$ ) e Ct é a concentração de material particulado transportado fluvialmente pelo escoamento total ( $\text{g L}^{-1}$ ).

## LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Apesar de ser mais objetivo que os métodos clássicos, pois os parâmetros  $Tc$  e  $\alpha$  são obtidos por critérios objetivos; e de sua aplicação ficar extremamente simples e fácil após a implementação computacional do algoritmo de filtragem (Araujo & Dias, 1995), o método de separação de hidrogramas de cheia utilizando filtros numéricos apresenta limitações importantes.

Uma delas se relaciona às séries históricas de vazão e precipitação, uma vez que o conceito de séries temporais está relacionado a um conjunto de observações de uma determinada variável feita em períodos sucessivos de tempo e ao longo de um determinado intervalo de tempo (Faria et al., 2008). Para a elaboração

do hidrograma de cheia são necessárias séries históricas de dados contínuas e confiáveis.

O conceito de formação de cheia exige uma adequação do método de separação à realidade física que se pretende representar (Hino & Hasebe, 1986), pois além de a técnica de filtragem ser fisicamente equivalente a um reservatório subterrâneo linear, verifica-se a ocorrência de uma diferença não nula entre o escoamento total e o escoamento subterrâneo (Araujo & Dias, 1995), em decorrência da utilização de dados anuais de vazão e precipitação. Essa diferença não nula também é verificada quando se trabalha com séries históricas diárias, persistindo ao longo do período sem chuvas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo do escoamento fluvial da bacia do rio Sorocaba foi realizado para um período de 25 anos, considerando a precipitação total e os valores médios anuais de vazão, calculados a partir de dados diários. Com o método de separação de hidrograma de cheia, envolvendo a utilização de filtro numérico auto-recursivo, foi possível calcular o escoamento superficial rápido (Qr) para a bacia do rio Sorocaba em sua foz, em Laranjal Paulista (SP). A Tabela 1 apresenta os resultados principais da separação do hidrograma de cheia do rio Sorocaba em Laranjal Paulista, próximo à foz, para o período de 1984 a 2008.

Pôde ser verificado que o escoamento superficial rápido médio anual para o período estudado foi de  $24,09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , o que representou 38,04% do escoamento total ( $Kr = 0,3804$ ), sendo considerado um valor próximo aos obtidos por Mortatti et al. (2004) para os rios Tietê (30,4%) e Piracicaba (27,4%) no período de 1976 a 1997, integrantes da mesma grande bacia de drenagem. Tais valores são típicos de bacias com predomínio agrícola, onde o manejo do solo interfere diretamente nos processos erosivos mecânicos. Neste mesmo período, a contribuição média da água subterrânea foi de 61,96%.

Para o ano de 1985 foi possível observar os menores valores de precipitação (883,6 mm), vazão média total ( $35,43 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) e de contribuição do escoamento

superficial rápido na vazão total (32,48%), enquanto que os maiores índices foram observados em 1991, com precipitação anual de 1868,5 mm e vazão total média de  $96,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Entretanto, neste ano de maior pluviosidade, a contribuição do escoamento superficial rápido foi de 37,18% e a subterrânea de 62,82%, próximos às médias do período estudado. A maior contribuição do escoamento superficial rápido foi em 1997, quando representou 42,24% da vazão total.

A Figura 3 ilustra a separação do hidrograma do rio Sorocaba com a utilização de filtros numéricos auto-recursivos de 1ª ordem, onde foi possível observar as contribuições dos escoamentos superficial rápido e subterrâneo. A variação dessas contribuições se mostrou associada ao regime pluviométrico, com maior contribuição do escoamento superficial rápido nos períodos de maior pluviosidade, como pode ser observado no período de 1984 a 2000. A partir de 2000 foi verificada a não ocorrência de grandes variações na precipitação, oscilando entre 1076 e 1264 mm, o que refletiu numa certa estabilidade nos valores de vazão média anual e da contribuição de suas componentes.

O relacionamento entre os escoamentos total e superficial rápido para a bacia do rio Sorocaba, conforme pode ser observado na Figura 4, apresentou uma correlação linear altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre as variáveis. A equação da reta de correlação

obtida pode ser utilizada para as determinações do escoamento superficial rápido em função do escoamento total diretamente medido no canal fluvial, desde que esteja dentro dos limites de vazões observadas.

A Figura 5 ilustra a variabilidade do escoamento superficial rápido ( $\Delta Q_r$ ) evidenciando a sua importância nos processos de erosão mecânica, onde os valores positivos relacionam-se com períodos de maior potencial erosivo, e que tais situações se mostraram diretamente dependentes dos mecanismos de recarga do sistema fluvial pela precipitação, estando em consonância com o afirmado em Mortatti & Probst (1998) e Mortatti et al. (2004).

O escoamento superficial é o principal processo associado à erosão hídrica, o impacto das gotas de chuva libera as partículas de solo, que são transportadas

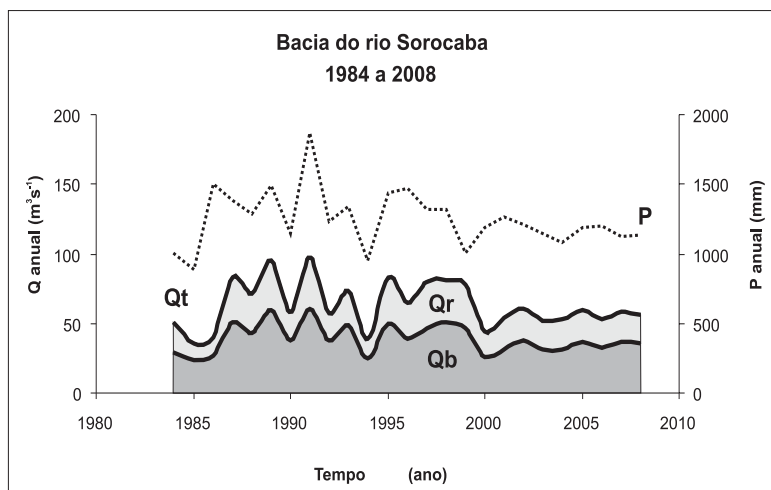
pelo escoamento superficial. A erosão do solo e os consequentes impactos na produtividade agrícola, na qualidade da água e no assoreamento de cursos e reservatórios de água tornam-se a pauta de discussões e preocupações ambientais (Pruski et al., 2001). Dessa forma, conhecer a carga de material particulado transportado pelo escoamento superficial rápido permite um maior entendimento dos processos de erosão mecânica que ocorrem na bacia de drenagem do rio Sorocaba.

A partir de dados de campo obtidos em 2009 e quantificação do material particulado em suspensão transportado pelo escoamento total (Tabela 2), foi possível estimar a concentração do material particulado transportado pelo escoamento superficial rápido, considerando os períodos seco e chuvoso.

**TABELA 1.** Resultados hidrológicos para a bacia do rio Sorocaba obtidos com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos para o período de 1984 a 2008.

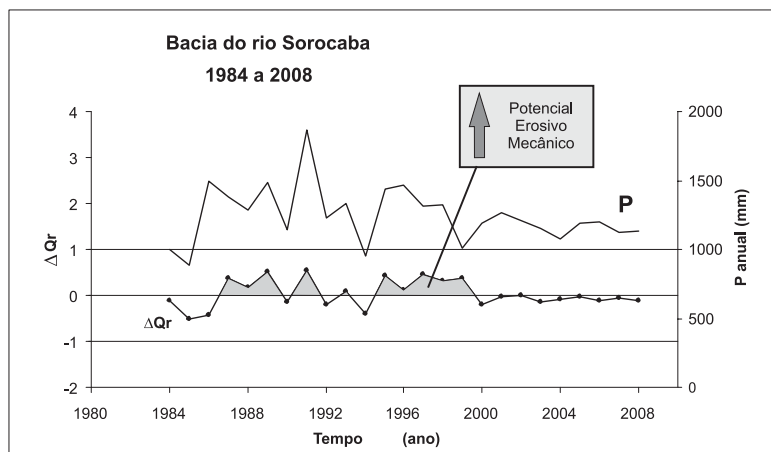
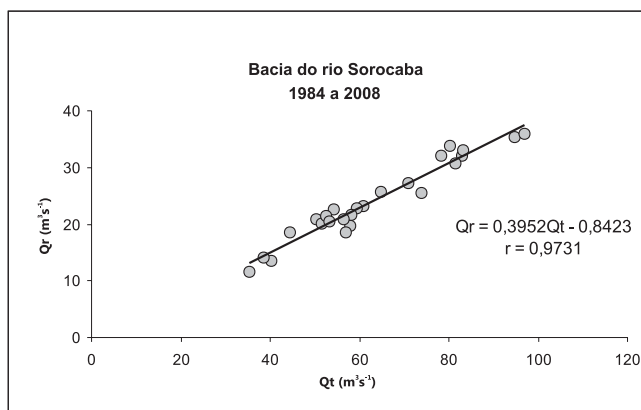
| Tempo (ano) | P (mm)  | Qt ( $m^3 s^{-1}$ ) | Qr ( $m^3 s^{-1}$ ) | Qn ( $m^3 s^{-1}$ ) | Kr     | Kn     | DQr   |
|-------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|--------|-------|
| 1984        | 1001,20 | 50,35               | 20,79               | 29,56               | 0,4128 | 0,5872 | -0,11 |
| 1985        | 883,60  | 35,43               | 11,51               | 23,92               | 0,3248 | 0,6752 | -0,50 |
| 1986        | 1498,50 | 40,27               | 13,60               | 26,68               | 0,3376 | 0,6624 | -0,41 |
| 1987        | 1379,40 | 82,98               | 32,17               | 50,81               | 0,3877 | 0,6123 | 0,38  |
| 1988        | 1284,60 | 70,92               | 27,27               | 43,64               | 0,3846 | 0,6154 | 0,17  |
| 1989        | 1489,20 | 94,77               | 35,32               | 59,45               | 0,3727 | 0,6273 | 0,52  |
| 1990        | 1145,10 | 57,88               | 19,74               | 38,14               | 0,3410 | 0,6590 | -0,15 |
| 1991        | 1868,50 | 96,89               | 36,02               | 60,87               | 0,3718 | 0,6282 | 0,55  |
| 1992        | 1233,20 | 56,87               | 18,60               | 38,26               | 0,3272 | 0,6728 | -0,20 |
| 1993        | 1335,30 | 73,81               | 25,54               | 48,26               | 0,3461 | 0,6539 | 0,10  |
| 1994        | 952,90  | 38,51               | 14,15               | 24,36               | 0,3675 | 0,6325 | -0,39 |
| 1995        | 1441,10 | 83,14               | 33,02               | 50,12               | 0,3972 | 0,6028 | 0,42  |
| 1996        | 1465,40 | 64,72               | 25,62               | 39,09               | 0,3959 | 0,6041 | 0,10  |
| 1997        | 1315,30 | 80,16               | 33,86               | 46,30               | 0,4224 | 0,5776 | 0,46  |
| 1998        | 1321,70 | 81,40               | 30,80               | 50,59               | 0,3784 | 0,6216 | 0,33  |
| 1999        | 1008,50 | 78,24               | 32,15               | 46,09               | 0,4109 | 0,5891 | 0,38  |
| 2000        | 1189,50 | 44,39               | 18,57               | 25,82               | 0,4183 | 0,5817 | -0,20 |
| 2001        | 1264,40 | 54,30               | 22,70               | 31,60               | 0,4180 | 0,5820 | -0,02 |
| 2002        | 1209,90 | 60,88               | 23,24               | 37,64               | 0,3817 | 0,6183 | -0,00 |
| 2003        | 1149,40 | 51,46               | 20,14               | 31,32               | 0,3914 | 0,6086 | -0,13 |
| 2004        | 1076,00 | 52,60               | 21,50               | 31,11               | 0,4087 | 0,5913 | -0,08 |
| 2005        | 1193,70 | 59,35               | 22,83               | 36,51               | 0,3847 | 0,6153 | -0,02 |
| 2006        | 1199,10 | 53,18               | 20,55               | 32,63               | 0,3864 | 0,6136 | -0,12 |
| 2007        | 1121,20 | 58,19               | 21,66               | 36,53               | 0,3722 | 0,6278 | -0,07 |
| 2008        | 1131,70 | 56,33               | 20,80               | 35,53               | 0,3693 | 0,6307 | -0,10 |
| Média       | 1246,34 | 63,08               | 24,09               | 38,99               | 0,3804 | 0,6196 |       |

onde P é a precipitação total anual e Qt é o escoamento total, Qr o escoamento superficial rápido, Qn o escoamento subterrâneo, Kr e Kn os respectivos coeficientes de escoamento e DQr a variabilidade do escoamento superficial rápido, todos em termos médios anuais.



**FIGURA 3.** Separação do hidrograma do rio Sorocaba nos compartimentos escoamento superficial rápido ( $Q_r$ ) e subterrâneo ( $Q_n$ ) e precipitação anual ( $P$ ), no período de 1984 a 2008.

**FIGURA 4.** Correlação linear entre escoamento fluvial total ( $Q_t$ ) e escoamento superficial rápido ( $Q_r$ ).



**FIGURA 5.** Análise da variabilidade do escoamento superficial rápido ( $\Delta Q_r$ ) e da precipitação ( $P$ ) durante o período de 1984 a 2008.

**TABELA 2.** Escoamento total ( $Q_t$ ) e material particulado em suspensão transportado fluvialmente pelo escoamento total (MPS), para a estação de amostragem Entre Rios, em Laranjal Paulista, obtidos em 2009.

| Data       | $Q_t$        | MPS         |
|------------|--------------|-------------|
|            | $m^3 s^{-1}$ | $mg L^{-1}$ |
| 10/03/2009 | 48,76        | 16,33       |
| 07/04/2009 | 44,83        | 20,66       |
| 12/05/2009 | 45,34        | 25,33       |
| 17/06/2009 | 41,47        | 14,33       |
| 21/07/2009 | 57,69        | 46,50       |
| 25/08/2009 | 125,73       | 54,33       |
| 09/09/2009 | 208,06       | 173,50      |
| 22/09/2009 | 95,08        | 45,30       |
| 10/11/2009 | 171,28       | 145,00      |

Esses períodos foram estabelecidos a partir dos valores de vazão do rio Sorocaba, medidos em Laranjal Paulista, sendo a amostragem do dia 17/06/2009 considerado como seco, com uma vazão de  $41,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , medida após 10 dias de estiagem, e 09/09/2009 como o mais chuvoso, com vazão de  $208,06 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , um dia após um evento chuvoso de aproximadamente 60 mm, sendo a concentração total do material particulado transportado fluvialmente pelo escoamento total de  $14,33 \text{ mg L}^{-1}$  no período seco e  $173,50 \text{ mg L}^{-1}$  no período chuvoso. Com a utilização da equação (9), foi estimada a carga de material transportada pelo escoamento superficial rápido como sendo de  $0,044 \text{ g L}^{-1}$  no período seco e  $0,460 \text{ g L}^{-1}$  no período chuvoso, para os quais foram utilizados os valores de Kr relacionados aos anos de maior e menor vazão média, respectivamente,

apresentados na Tabela 1.

A carga estimada observada para o período chuvoso foi 10 vezes superior à observada para o período seco, corroborando a relação direta entre a precipitação e o aumento do material particulado transportado fluvialmente, oriundos dos processos erosivos mecânicos que ocorreram na bacia de drenagem. A carga estimada para o período chuvoso se mostrou semelhante à apresentada pelos rios Congo ( $0,48 \text{ g L}^{-1}$ ) e Gâmbia ( $0,45 \text{ g L}^{-1}$ ), ambos na África; e foi considerada como próxima às observadas para os rios Orenoco ( $0,62 \text{ g L}^{-1}$ ), na Venezuela, e São Lourenço ( $0,57 \text{ g L}^{-1}$ ), divisa entre os EUA e Canadá na costa atlântica (Probst & Sigha, 1989); resguardando-se as características peculiares de cada bacia de drenagem.

## CONCLUSÕES

O método de separação de hidrogramas de cheia com filtro numérico auto-recursivo se mostrou eficiente no estudo do comportamento e variabilidade do escoamento superficial rápido na bacia do rio Sorocaba, considerando uma série de dados anuais de vazão.

O escoamento superficial rápido médio anual representou 38,04% do escoamento total. De acordo com a literatura os processos de erosão mecânica estão associados ao escoamento superficial e considerando as características de relevo e drenagem da bacia, com nível de fragilidade potencial de médio a alto e sujeita a fortes atividades erosivas, recomenda-se a necessidade de maior atenção em relação ao uso e ocupação do solo e de seu manejo, preferencialmente com a adoção de medidas preventivas e conservacionistas, visando a conservação dos recursos naturais presentes, principalmente dos cursos de água.

O modelo linear obtido a partir do relacionamento

entre os escoamentos total e superficial rápido apresentou correlação altamente significativa ( $p < 0,01$ ), permitindo identificar a componente superficial rápida a partir de medidas de vazão total.

A variabilidade temporal do escoamento superficial rápido também se mostrou diretamente associada com o regime de precipitação na bacia de drenagem com reflexos diretos no potencial erosivo mecânico associado. Dados preliminares de campo obtidos em 2009 permitiram estimar a carga de material particulado transportado pelo escoamento superficial rápido, sendo 10 vezes maior no período chuvoso, quando comparado ao período seco.

O conhecimento da componente superficial rápida do escoamento total do rio Sorocaba e de seu comportamento ao longo dos últimos 25 anos forneceu subsídios para uma melhor avaliação e entendimento dos processos erosivos predominantes na bacia de drenagem e suas conseqüências aos corpos de água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processos nº 08/57104-4 e 08/09369-9) pelo apoio concedido durante a realização deste trabalho e ao Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Águas e Energia Elétrica, pelo fornecimento dos dados diários de vazão e precipitação da bacia do rio Sorocaba.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, A.A.M. DE & DIAS, N.L. Separação do hidrograma de cheias através de filtros auto-recursivos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11, 1995, Pernambuco. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995, p. 267-272.
2. BARNES, B.S. The structure of discharge recession curves. *Transactions - American Geophysical Union*, v. 20, n. 4, p. 721-725, 1939.
3. CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; MARTINS, D.; LEMOS, A.M. DE.; LIMA, V.S. DE; BUENO, A.C. Erosividade,



- padrões hidrológicos, períodos de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 1239-1251, 2008.
4. DINCER, T.; PAYNE, B.R.; FLORKOWSKI, T.; MARTINEC, J.; TONGIORGI, E. Snowmelt runoff from measurements of Tritium and Oxigen-18. **Water Resources Research**, v. 6, p. 110-124, 1970.
  5. FARIA, E.L.; ALBUQUERQUE, M.P.; ALFONSO, J.L.G.; ALBUQUERQUE, M.P.; CAVALCANTI, J.T.P. Previsão de séries temporais utilizando modelos estatísticos. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. **Nota Técnica**, n. 003/2008. 16 p. 2008. Disponível em: [http://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/nt00308.2009\\_01\\_16\\_13\\_12\\_34.pdf](http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/nt00308.2009_01_16_13_12_34.pdf). Acessado em 28jan2010.
  6. FRITZ, P.; CHERRY, J.A.; WEYER, K.U.; SKLASH, M.G. Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions, in IAEA publis. Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. **Proceedings of Aan Advisory Group Meeting, 1975**. Viena: International Atomic Energy Agency, p. 111-131, 1976.
  7. HINO, M. & HASEBE, M. Analysis of hydrologic characteristics from runoff data – a hydrologic inverse problem. **Journal of Hydrology**, v. 49, p. 287-313, 1981.
  8. HINO, M. & HASEBE, M. Identification and prediction of nonlinear hydrologic systems by the filter-separation Autoregressive (AR) method: extension to hourly hydrologic data. **Journal of Hydrology**, v. 68, p. 181-210, 1984.
  9. HINO, M. & HASEBE, M. Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation AR method and environmental isotope tracers. **Journal of Hydrology**, v. 85, p. 251-264, 1986.
  10. HOOPER, R.P. & SCHOEMAKER, C.A. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. **Water Resources Research**, v. 22, p. 1444-1454, 1986.
  11. HUDAK, P.F. **Principles of hydrogeology**. Boca Raton, Flórida: CRC Press LLC , 236 p., 2005.
  12. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Contagem da População 2007 e Estimativa da População 2007**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>. Acessado em 15ago2008.
  13. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Atualização do relatório de situação dos recursos hídricos 1995 da bacia do Sorocaba e Médio Tietê (Relatório Zero) como subsídio à elaboração do plano de bacia**. São Paulo: Agrupamento de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente – AGAMA / Divisão de Geologia – DiGeo / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, v. 1, 420 p., 2005. (Relatório Técnico nº 80 401-205).
  14. MEADE, R.H. Suspended Sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil, during 1982-1984. **US Geological Survey Open File Report 85-492**. US Geological Survey, 44 p., 1985.
  15. MORTATTI, J. **Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanço**. Piracicaba, 1995. 155 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
  16. MORTATTI, J. & PROBST, J.L. **Hidrogeoquímica de bacias de drenagem**. Piracicaba: CPG/CENA, Série didática, v.1, 239 p., 1998.
  17. MORTATTI, J.; BORTOLETTO JÚNIOR, M.J.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: series temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.
  18. MORTATTI, J.; MORAES, J.M.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A. Hydrograph separation of the Amazon river: a methodological study. **Aquatic Geochemistry**, v. 3, p. 117-128, 1997.
  19. PILGRIM, D.H.; HUFF, D.D.; STEELE, T.D. Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff. **Water Resources Research**, v. 15, n. 2, p. 329-339, 1979.
  20. PINDER, G.F. & JONES, J.F. Determination of the ground water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. **Water Resources Research**, v. 5, n. 2, p. 438-455, 1969.
  21. PROBST, J.L. & SIGHA, N. Estimation de l'écoulement superficiel et de as charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 309, n. 4, p. 357-363, 1989.
  22. PRUSKI, F.F.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. DA. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p.301-307, 2001.
  23. ROBSON, A. & NEAL, C. Hydrograph separation using chemical techniques: an application to catchments in mid-Wales. **Journal of Hydrology**, v. 116, v. 1/4, p. 345-363, 1990.
  24. ROSS, J.L.S. & MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia, Departamento de Geografia / FFLCH-USP, Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada - IPT, FAPESP. Mapas e Relatórios – SP, 1997.

*Manuscrito Recebido em: 25 de novembro de 2009  
Revisado e Aceito em: 6 de fevereiro de 2010*