

ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO ATRAVÉS DA PROFUNDIDADE SECHI

Heinz Dieter Fill¹ e Irani dos Santos²

Resumo – A avaliação correta do transporte de sedimentos em suspensão é uma importante ferramenta para muitos estudos sedimentológicos aplicados, sendo freqüentemente necessário dispor-se de uma série temporal longa e contínua da descarga sólida. Tradicionalmente essa série é determinada através da chamada curva-chave de sedimentos que relaciona descarga sólida em suspensão e vazão líquida. A baixa precisão da curva-chave de sedimentos tem levado à busca de outras variáveis explicativas, facilmente monitoradas e que conduzam a regressões mais precisas. Entre essas variáveis a turbidez tem recebido recentemente bastante atenção na literatura internacional. O presente trabalho mostra uma avaliação da concentração de sólidos em suspensão a partir de medidas de transparência pelo disco de Sechi em uma bacia urbana, rio Barigüi na região metropolitana de Curitiba, e três bacias naturais localizadas na Serra do Mar, estado do Paraná. Os resultados mostram que a metodologia é tecnicamente viável e economicamente atraente, conduzindo a resultados melhores que a curva-chave de sedimentos.

Abstract - The correct evaluation of suspended sediment transport is an important tool for many applied sediment studies. Often a long and continuous series of the suspended sediment discharge is necessary. Traditionally this series is estimated by the sediment discharge curve, which relates suspended sediment discharge and streamflow. The low precision of the sediment discharge curve has lead to the search of other explanatory variables, easily monitored and with better regressions. Among those the turbidity has received recently much attention in the international literature. This paper presents an evaluation of the suspended solid concentration from transparency measures with the traditional Sechi disk. The study includes an urban basin, the Barigüi river in the metropolitan area of Curitiba, and three natural basins located in the Serra do Mar, state of Paraná. The results

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento/UFPR, Cx. Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba, Paraná, e-mail: fill@lactec.org.br

² Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR, Convênio UFPR/COPEL/LACTEC, Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba, PR, Brasil. Fone: (041) 361-6307, Fax: (041) 266-2935 e-mail: irani@cehpar.org.br

show that the methodology is technically feasible and economically attractive, resulting in better estimates of sediment transport than the traditional sediment discharge curve.

Palavras-Chave – sedimento; descarga sólida; disco de Sechi

INTRODUÇÃO

A avaliação correta do transporte de sedimentos em suspensão é importante entre outros estudos para a caracterização de bacias hidrográficas, quantificação de impactos do manejo do terreno e alterações antrópicas e para estimar a sedimentação de reservatórios, lagos e estuários.

Para tanto geralmente é necessário dispor de uma série temporal longa e contínua da descarga sólida. Tradicionalmente essa série é determinada através da chamada curva-chave de sedimentos que relaciona descarga sólida em suspensão e vazão líquida (Carvalho, 1994). Ela é obtida a partir de medidas de vazão líquida e a determinação simultânea da concentração de sedimentos em suspensão (CSS).

No presente estudo foi utilizado na verdade a determinação da concentração de sólidos totais (dissolvidos e em suspensão) que é determinada evaporando-se à temperatura de 103 a 105°C, a água contida em uma sub-amostra da amostra homogeneizada e pesando-se o resíduo sólido. Para uma descrição detalhada dos procedimentos do ensaio, recomenda-se a consulta do Manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Eaton *et al.*, 1995).

Embora fosse mais adequado utilizar apenas o material em suspensão cuja concentração é obtida através da filtração da água com a utilização de filtros especiais, optou-se pelo uso da concentração de sólidos totais por estar este dado disponível nos postos analisados. Acredita-se que nas bacias estudadas neste trabalho os sólidos dissolvidos sejam apenas uma parcela pequena dos sólidos totais o que torna válida a presente análise.

O uso da curva-chave de sedimentos decorre do fato de que a realização diária de coleta e análise de amostras é economicamente inviável, além de que deve ser executada por pessoal qualificado e treinado (hidrometristas) que não fica permanentemente no local da estação. Entretanto, o método da curva-chave de sedimentos tem se mostrado pouco preciso com um grau de dispersão bastante acentuado devido ao fato de que outros fatores, como intensidade de precipitação, uso do solo, controle da erosão, os quais são altamente variáveis no tempo e no espaço, contribuirão no processo.

A Figura 1 mostra um exemplo de curva-chave de sedimentos para o rio Ivaí em Tereza

Cristina onde a dispersão dos pontos fica evidente.

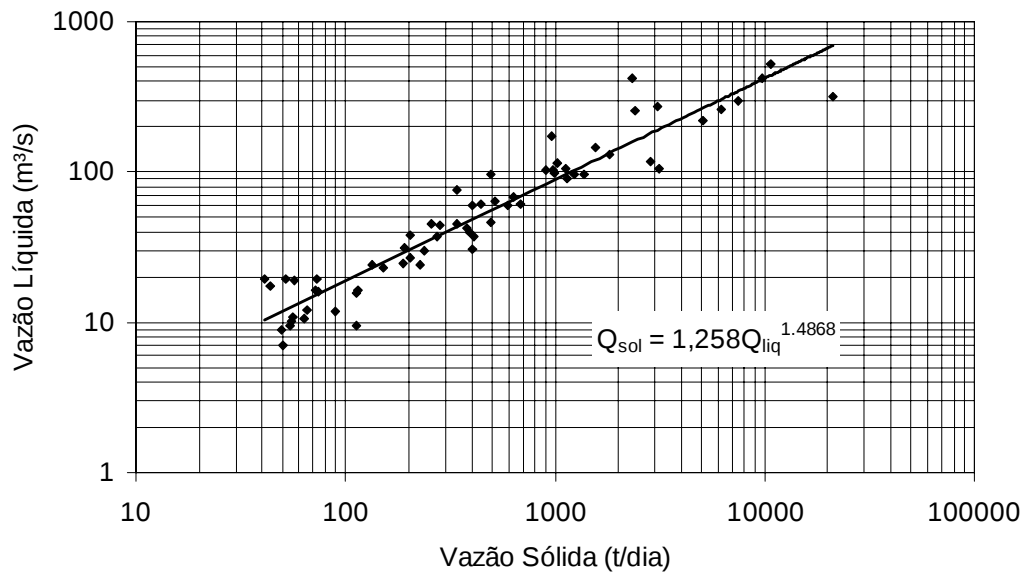


Figura 1 - Curva-chave de sedimentos em Tereza Cristina

Esse fato levou à busca de outras variáveis explicativas, facilmente monitoradas e que conduzem a regressões mais precisas reduzindo assim o erro associado à estimativa da CSS. Entre essas variáveis a turbidez tem recebido recentemente bastante atenção na literatura internacional (Lewis, 1996; Lewis e Eads, 1998; Moris e Fan, 1997).

A CSS tem considerável influência na diminuição da turbidez da água impedindo a penetração da luz, sendo que Moris e Fan (1997) afirmam que “a turbidez é em geral um previsor muito melhor que a vazão para a concentração de sedimentos suspensos fluviais”.

Há várias formas de medida da turbidez sendo mais recomendados na literatura os chamados turbidímetros nefelométricos baseados no retroespalhamento da luz e que resultam em uma unidade de turbidez chamada de NTU (nephelometric turbidity unit). Outros instrumentos medem a luz absorvida ou transmitida dando origem a unidade FTU (formazin turbidity unit). Finalmente existe o disco de Secchi com uma longa tradição no monitoramento limnológico para a medir a transparência (propriedade oposta à turbidez) de lagos.

A medida da transparência pelo método do disco de Secchi, descrito em detalhes por Esteves (1988) é muito simples, barata e rápida, podendo ser efetuado por pessoas pouco qualificadas após um breve período de treinamento *ad hoc*.

Do ponto de vista ótico, a transparência da água pode ser considerada o oposto da turbidez. Sua avaliação de maneira mais simples é feita através de um disco metálico de 20 a 30 cm de

diâmetro, pintado de branco e preto, denominado disco de Secchi. A medida é obtida mergulhando-se o disco na água pelo lado da sombra do barco preso a uma corda graduada. A profundidade na qual a radiação refletida do disco não é mais sensível ao olho humano corresponde em centímetros ao parâmetro transparência do disco de Secchi.

Este trabalho procura avaliar a viabilidade de se estimar a CSS a partir da profundidade (ou transparência) de Secchi, usando como exemplo o rio Barigüi na região Metropolitana de Curitiba e três rios de características semelhantes na Serra do Mar (Ipiranga, São João e Arraial) no estado do Paraná.

ÁREA DO ESTUDO

A bacia do rio Barigüi localiza-se na Região Metropolitana de Curitiba e drena até a sua foz 279 km² em uma extensão de 66 km. As suas nascentes situam-se no município de Almirante Tamandaré e sua foz no rio Iguaçu na divisa entre os municípios de Araucária e Curitiba. O rio Barigüi constituiu-se em um curso de água bastante poluído e tipicamente urbano, recebendo esgotos domésticos e no seu curso inferior, que atravessa a cidade industrial de Curitiba, recebe considerável carga poluidora de origem industrial. Os dados utilizados no presente estudo foram coletados em quatro estações fluvio-sedimentométricas distribuídas ao longo do rio e foram tratados em conjunto para o estabelecimento da regressão. Não foi possível observar tendências distintas nas quatro estações avaliadas com relação à CSS.

Os rios Ipiranga, São João e Arraial por sua vez localizam-se na Serra do Mar e possuem nos locais estudados áreas de drenagem iguais a 49, 151 e 173 km², respectivamente. Estes rios, contrariamente ao rio Barigüi, possuem bacias de drenagem tipicamente rurais com baixa densidade de ocupação e carga poluidora desprezível. O rio Ipiranga no seu curso superior é utilizado para parte do abastecimento de água da cidade de Piraquara. Os dados utilizados foram coletados nas proximidades das barragens das usinas hidrelétricas Marumbi, Chaminé e Guaricana em três pontos distintos porém próximos entre si para cada usina, resultando em nove pontos amostrados. Também no caso dos rios da Serra do Mar não foi possível detectar tendências distintas nos três locais amostrados.

DADOS UTILIZADOS

No caso do rio Barigüi a coleta dos dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho foi feita no período de junho de 1998 a junho de 1999, em intervalos de dois meses. A Tabela 1 relaciona os valores observados nos quatro postos para a transparência (profundidade Secchi) e

sólidos totais. Observa-se que um total de 40 medições (10 medições em cada posto) estavam disponíveis.

Os postos de coleta de dados, chamados de P1, P2, P3 e P4, estão localizados nos seguintes locais, respectivamente:

- P1- Almirante Tamandaré, junto à ponte da rua Bertolino K. de Oliveira;
- P2 - Parque Tingüi, próximo à ponte na parte norte do parque;
- P3 - Parque Barigüi, junto ao vertedouro do lago; e
- P4 - Piá ambiental do bairro Fazendinha junto à rua Vereador Elias Karam.

Tabela 1 - Valores de Transparência (cm) e Sólidos Totais (mg/l) - Rio Barigüi

Posto P1		Posto P2		Posto P3		Posto P4	
Transp. (cm)	Sól. Tot. (mg/l)	Transp. (cm)	Sól. Tot. (mg/l)	Transp. (cm)	Sól. Tot. (mg/l)	Transp. (cm)	Sól. Tot. (mg/l)
188.00	165.00	289.00	181.00	225.00	184.50	15.00	206.00
13.00	916.00	13.00	1002.00	88.00	166.50	88.00	184.00
100.00	183.50	75.00	196.00	63.00	186.50	75.00	214.50
188.00	146.00	138.00	135.00	175.00	123.00	200.00	127.50
88.00	196.00	25.00	374.00	188.00	172.00	138.00	186.00
130.00	182.00	10.00	208.00	10.00	200.00	15.00	221.00
50.00	161.00	40.00	151.00	45.00	132.00	50.00	145.00
85.00	180.00	80.00	178.00	75.00	176.00	65.00	190.00
95.00	177.00	85.00	169.00	85.00	175.00	60.00	183.00
10.00	287.00	10.00	394.00	30.00	185.00	18.00	184.00

Fonte: Projeto PEN-04 CEHPAR

No caso dos rios da Serra do Mar, a coleta de dados foi realizada em julho de 1999 nos três locais já mencionados. Os valores da transparência (profundidade de Sechi) e sólidos totais estão relacionados na Tabela 2.

No caso do rio Ipiranga em dois locais não pode ser determinada a transparência dado o fato de que o rio era bastante raso (profundidade < 50 cm) e com o fundo visível. Desta forma, ficaram disponíveis para o estudo apenas sete pontos no caso dos rios da Serra do Mar.

Tabela 2 – valores de transparência e sólidos totais nos rios da Serra do Mar

Rio Ipiranga		Rio São João		Rio Arraial	
Transparência (cm)	Sólidos totais (mg/l)	Transparência (cm)	Sólidos totais (mg/l)	Transparência (cm)	Sólidos totais (mg/l)
-	41,0	55,0	78,0	80,0	63,0
250	42,5	45,0	82,5	45,0	86,0
-	41,5	80,0	61,0	80,0	50,5

Fonte: LACTEC

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter-se uma relação entre os valores referentes à transparência e a concentração de sólidos totais foi elaborado um gráfico em escala bilogarítmica para melhor visualização dos dados em questão. Escolheu-se o gráfico bilogarítmico por ser a regressão logarítmica um procedimento tradicional no estabelecimento de relações causais entre variáveis hidrológicas (p.ex., Benson, 1962, 1964; Thomas e Benson, 1970) e, além disso, outras formas de plotagens (mono-logarítmico e aritmético) estudadas apresentaram ajustes piores aos dados. Os resultados do ajuste são mostrados na Figura 2.

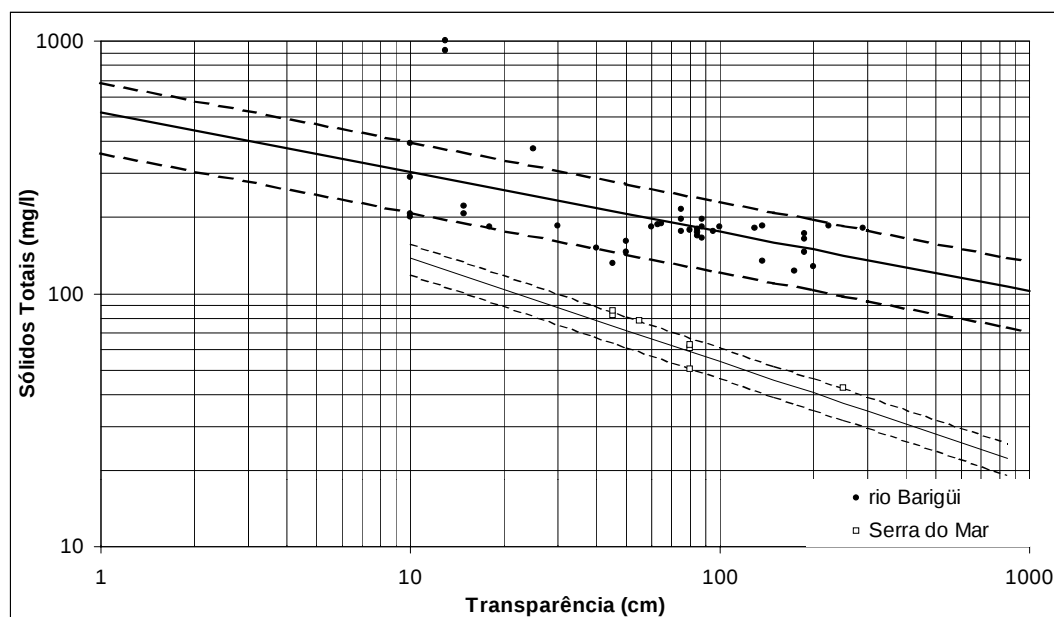


Figura 2 - Relação entre Transparência e Sólidos Totais

Através da análise visual da Figura 2, verificou-se que dois pontos referentes aos postos P1 e P2 (concentração de sólidos totais iguais a 916 e 1002 mg/l, respectivamente) estavam muito longe da tendência geral dos demais pontos. Além disso, na mesma data nos outros postos não ocorreu

uma concentração de sólidos muito elevada. Acredita-se que houve algum problema na coleta das amostras relativas a esses dois pontos (como por exemplo contato com o fundo) de modo que esses dois pontos foram eliminados da análise subsequente.

Adotando-se o modelo log-linear resulta uma equação do tipo:

$$C = A \cdot d^N \cdot e^\varepsilon \quad (1)$$

Onde: C - concentração de sólidos totais (mg/l);

d - transparência medida pela profundidade do disco de Secchi (cm);

A, N - parâmetros;

ε - erro do modelo; e

e - base dos logaritmos naturais (2,71828...).

Tomando logaritmos, esta equação pode ser transformada em:

$$\ln C = \ln A + N \cdot \ln d + \varepsilon \quad (2)$$

A equação (2) é uma regressão linear entre as variáveis $Y = \ln C$ e $X = \ln d$ e pode, portanto, ser representada por uma reta no papel bilogarítmico.

A estimativa dos valores de A e N através do procedimento padrão de ajuste por mínimos quadrados, não conduziu a resultados satisfatórios. Resolveu-se então adotar um procedimento não paramétrico, definindo uma faixa de ajuste delimitado por duas retas paralelas no gráfico bilogarítmico, excluindo-se 5% dos pontos observados (dois pontos de um total de 38 pontos, sendo um superior e outro inferior).

No caso do rio Barigüi, os limites superior e inferior originam as equações $C = 684d^{0,236}$ e $C = 360 d^{0,236}$, respectivamente. Note que o parâmetro N é igual nas duas equações, condição imposta pelo paralelismo das retas.

Em seguida definiu-se a reta de ajuste médio pela média aritmética dessas duas equações resultando:

$$C = 522 d^{0,236} \quad (3)$$

Nota-se que a faixa que abrange 95% dos pontos observados corresponde à uma variação de 31% em relação ao ajuste médio para mais ou menos. Isto significa que o erro da estimativa da concentração de sólidos totais, obtido a partir da observação da transparência é inferior a 31% em 95% dos casos.

Para o caso dos rios da Serra do mar o mesmo procedimento conduziu à equação (4), com um erro inferior a 14%.

$$C=356 d^{-0,41} \quad (4)$$

Este erro é bastante inferior ao erro cometido ao se estimar a vazão sólida a partir da regressão com a vazão líquida, pela técnica da curva-chave de sedimentos, como pode ser visto comparando-se as Figuras 1 e 2. No caso da curva-chave mostrada na Figura 1 a faixa correspondente a 95% dos pontos representa uma variação de $\pm 76\%$ em relação ao ponto médio, ou seja, mais do que o dobro da dispersão obtida com os valores de transparência mostrados na Figura 2.

Fica evidente que, o estabelecimento de regressões entre transparência (profundidade Sechi) e concentração de sólidos totais deve ser feito individualmente para cada bacia ou grupo de bacias similares em termos de transporte de sedimentos.

Entretanto, talvez o estudo sistemático de muitas bacias poderá indicar alguma possibilidade de regionalizar estes resultados a partir de características de solos, cargas poluentes e uso do solo nas bacias.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo mostra que, para um dado rio ou grupo de rios, situado em áreas similares em termos de erosão, transporte e propriedades óticas de sedimentos, a avaliação da concentração de sólidos em suspensão a partir de medidas de transparência pelo disco de Sechi é tecnicamente viável e economicamente atraente. A medida de transparência é tão simples e rápida que poderia ser feita pelo próprio observador de estação sedimentométrica e certamente produzirá estimativas de vazão sólida superiores às obtidas pela curva-chave de sedimentos, que é o procedimento tradicional (p. ex., COPEL, 1978; Carvalho *et al.*, 2000) na análise do transporte de sedimentos e assoreamento de reservatórios.

Recomenda-se ampliar as conclusões deste estudo para outras bacias com vistas a uma tentativa de regionalização buscando-se uma relação entre os parâmetros da equação (1) com características fisiográficas, meteorológicas e pedológicas das bacias. Cabe também analisar com mais profundidade a viabilidade do treinamento dos observadores das estações fluviométricas e a instalação de passarelas ou outros dispositivos para a realização sistemática (diária) da medida da transparência pelo disco de Sechi.

Cabe também lembrar que existem atualmente no mercado vários tipos de medidores eletrônicos de turbidez, os quais podem ser instalados nas estações automáticas já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benson, M. A. 1962. Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain. USGS Water Supply Paper 1 580-B.
- Benson, M. A. 1964. Factors affecting the occurrence of floods in the southwest. USGS Water Supply Paper 1 580-D, US Govt. Printing Office, Washington.
- Carvalho, N. O. 1994. Hidrossedimentometria prática. CPRM - ELETROBRAS, Rio de Janeiro, 1994.
- Carvalho, N. O. *et al.* 2000. O assoreamento de um pequeno reservatório - Itiquira, um estudo de caso. RBRH, vol. 5, nº 1, 69-79.
- COPEL, 1978. Usina hidrelétrica de Salto Caxias, estudo de viabilidade. Vol. 1
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S. & Greenberg, A. E. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC.
- Esteves, F. A. 1988. Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência FIINEP.
- LEWIS, J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. Water Resour. Res., 32(7), 2299-2310, 1996.
- LEWIS, J. e EADS, R. 1998. Automatic real-time control of suspended sediment sampling based upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity. *In*: Proceedings Federal Interagency Workshop: Sediment Technology for the 21st Century. St. Petersburg, FL, February 17-19.
- MORRIS, G. L. e FAN, J. 1997. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. McGraw-Hill, New York.
- THOMAS, D. M. e M. A. BENSON. 1970. Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. USGS Water Supply Paper 1775. US Govt. Printing Office, Washington DC.