

## **AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL EM RIOS**

*Teodorico Alves Sobrinho<sup>1</sup> & Jullian Souza Sone<sup>2</sup> & Jamil Alexandre Ayach Anache<sup>3\*</sup> & Isabel Kaufmann de Almeida<sup>3</sup> & Jéssyca Stanieski de Souza<sup>3</sup> & Glauber Altrão Carvalho<sup>3</sup> & Mariana Thais Rodrigues Godoy<sup>2</sup> & Rodrigo de Moraes Pompeu<sup>2</sup> & Camila Bolognes Couto<sup>4</sup>*

**Resumo** – O conhecimento sobre vazão e transporte de sedimentos em corpos hídricos é importante para a gestão e implantação de planos de manejo em bacias hidrográficas. Logo o uso adequado de métodos que estimem a descarga sólida total torna-se necessário. Objetivou-se, assim, medir a descarga sólida total da foz, em três eventos distintos, do Córrego Guariroba, e comparar os diferentes métodos de cálculo e assim inferindo o modelo que melhor se ajustou ao sistema estudado. Obtiveram-se os dados de vazão com molinete e de descarga sólida através de amostrador de sedimento em suspensão e de fundo, que tiveram a sua granulometria avaliada. A descarga sólida total medida diretamente é, em média, 24,3 ton/dia, sendo que o modelo de cálculo de transporte de sedimentos que melhor se ajustou para o cálculo da descarga sólida total do Córrego Guariroba foi Colby (1957).

**Palavras-Chave** – Métodos de Cálculo, transporte de sedimentos, hidrossedimentologia.

## **EVALUATION OF METHODS TO ESTIMATE TOTAL SEDIMENT YIELD IN RIVERS**

**Abstract** – The knowledge of the stream flow and its sediment load is important to the management and planning of drainage basins. Besides, the correct use of methods which can estimate the total sediment yield is necessary. This work aimed to measure the total sediment yield of three distinct events in Córrego Guariroba drainage basin and to compare using statistical analysis these results to the modeled values obtained from calculations methods to estimate the total sediment load. The flow values were obtained using a hydrometric vane and the sediment loads were measured using bed load and suspended load samplers. The bed material had its particles size evaluated. The measured total sediment yield is on the average of 24,3 ton/day, being the Colby (1957) method the one that fits better statically to calculate indirectly the total sediment load of the studied stream.

**Keywords** – Calculation methods, sediment transport, hydrosedimentology.

<sup>1</sup> Professor Associado do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), teodorico.alves@ufms.br.

<sup>2</sup> Alunos do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), julliansone@gmail.com, mariana.rdogodoy@gmail.com, rodrigopoompeu@hotmail.com.

<sup>3</sup> Pós-graduandos em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), jamil.anache@ufms.br, viaeng@uol.com.br, jessycassouza@gmail.com, galtrao@bol.com.br.

<sup>4</sup> Técnica de Laboratório e Pós-graduanda em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), camila.couto@ufms.br.

\* Autor correspondente.

## INTRODUÇÃO

Com intuito de manter esse recurso por longo período de uso, é imprescindível que se faça um estudo hidrossedimentológico responsável, tanto para determinar o tempo de assoreamento do reservatório, quanto o índice de qualidade de água. O estudo se inicia com a desagregação do solo na bacia; segundo Paiva et al. (2001) erosão é um conjunto de processos nos quais o material terroso ou rochoso é desgastado, desagregado e removido de algum lugar da superfície da terra, conseqüentemente, alterando-a localmente com diferentes taxas de mudanças.

O grau de erosão da bacia está diretamente ligado à quantidade de sedimentos transportada pelo corpo hídrico, esse é receptor das partículas mais finas que são facilmente transportadas. Atividades paralelas, ligadas ao estudo são fundamentais, como práticas conservacionistas acopladas ao plano de manejo causam diminuição das ocorrências de erosão além da interrupção dos processos já em estados acelerados de erosão.

O sucesso na estimativa do transporte de sedimentos de bacia hidrográfica depende do ajuste com dados de campo utilizando técnicas de análise estatística, para escolher o modelo mais eficiente para a área de estudo escolhida. É possível que o fluxo de sedimentos seja modelado a partir de métodos de cálculo indiretos de transporte de sedimentos, porém, para que os valores não sejam superestimados, os dados devem ser coletados criteriosamente (Ricker *et al.* 2008).

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, responsável por parte do abastecimento de água do município de Campo Grande, foi a área de estudo do presente trabalho. Esse possui como objetivos estimar diretamente a descarga sólida total do córrego Guariroba e comparar os resultados observados com os estimados por métodos de cálculo de transporte de sedimentos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Método direto de estimativa da descarga sólida total

Para obter a descarga sólida total do Córrego Guariroba em toneladas por dia, utilizou-se a Equação 1:

$$Q_{st} = Q_{ss} + Q_{sf} \quad (1)$$

Sendo  $Q_{st}$  a descarga sólida total,  $Q_{ss}$  a descarga sólida em suspensão e  $Q_{sf}$  a descarga sólida de fundo. Para tal era necessário o conhecimento da descarga líquida, sedimentos em suspensão e descarga sólida de leito. Então se realizou medições em três meses distintos com molinete universal Newton. Calculou-se utilizando o método da meia-seção, obtendo a velocidade (m/s) de acordo com DNAEE (1997) e as seguintes fórmulas, respectivamente (Equações 2 e 3), válidas para até 33 rotações e a partir de 34 rotações:

$$V = 0,01327657 + 0,24400607 \times n \quad (2)$$

$$V = -0,01473284 + 0,27776926 \times n \quad (3)$$

Obteve a amostra de material em suspensão com amostrador US DH-48, bico  $1/4$ , usando método de Igual Incremento de Largura (ILL). A concentração de sedimentos em suspensão na amostra é dada pela fórmula a seguir, em ppm (mg/l):

$$C_s = \frac{\{SED - (SDG \times VR/50)\}}{ASED} \quad (4)$$

Sendo:  $C_s$  é a concentração de sedimentos na amostra (ppm); SED é quantidade de sedimentos na amostra (mg); SDG é a quantidade de sólidos dissolvidos na amostra (mg); VR é o volume reduzido (ℓ); ASED é o volume total da amostra (ℓ). Assim o cálculo da descarga sólida em suspensão é dado por:

$$Q_{ss} = 0,0864 \times Q \times C_s \quad (5)$$

Por fim a amostragem da descarga sólida do sedimento de fundo foram feitas à vau, empregando o amostrador BLM – 84 (Halley-Smith), com amostragem por integração, posicionando-o em 3 pontos contabilizando tempo de 5 minutos em cada posição.

A quantidade de sedimentos de fundo obteve-se da fórmula:

$$Q_{sf} = \frac{p \times L}{E_{am} \times n \times l \times t} \quad (6)$$

Sendo:  $E_{am}$  (eficiência de amostragem) igual a 1,0 com saca até 30% de material; P é o peso seco da amostra, em kg; n é o número de pontos amostrados; t é o tempo de amostragem em minutos na vertical considerada; l é a largura da boca do amostrador, em m (igual a 7,5cm = 0,075m).

### Métodos indiretos de estimativa da descarga sólida total

Para o cálculo da descarga sólida total utilizou-se o Software WinTSR, desenvolvido por Paiva et. al.(2002).Utilizou-se os métodos de Ackers and White (1973), Colby (1957), Karim (1998) e Yang (1973). A descrição dos métodos, segundo Paiva (2001) e Scapin et. al. (2007), está apresentada na Tabela 1.

Nos métodos de estimativa indiretos necessita-se de parâmetros hidráulicos da seção do rio como a declividade, obtido automaticamente do Software ArcGIS, e características do material amostrado no leito do rio:  $D_{35}$ ,  $D_{50}$  e curva granulométrica.

Tabela 1. Métodos de cálculo indireto de transporte de sedimentos.

Descrição dos métodos de estimativa	Parâmetros avaliados
<p><b>Ackers and White (1973)</b> Ackers &amp; White consideram que sedimentos grossos são transportados principalmente como carga de leito e somente parte da tensão de cisalhamento causa seu movimento e sedimentos finos são transportados em suspensão devido à tensão de cisalhamento total, por tanto se utiliza para cálculo da descarga sólida: a granulometria, mobilidade e descarga sólida.</p>	<p>Velocidade média do escoamento; Declividade da linha d'água; Profundidade hidráulica; Viscosidade cinemática da água; Descarga líquida; Diâmetro característico do material de fundo (<math>D_{50}</math>);</p>
<p><b>Colby (1957)</b> Colby baseou-se no método modificado de Einstein, nesse método simplificado usam-se basicamente três ábacos para estimar a descarga não medida (descarga de arrasto) somando-a a descarga sólida medida obtendo, assim, a descarga sólida total.</p>	<p>Largura da superfície do canal; Velocidade média de escoamento; Profundidade hidráulica; Descarga líquida; Concentração de sedimentos em suspensão.</p>

Descrição dos métodos de estimativa	Parâmetros avaliados
<p><b>Karim (1998)</b> Esse método obtém a descarga sólida por unidade de largura, tendo como princípio a velocidade média do escoamento, a velocidade de atrito no fundo e a velocidade de queda das partículas como sendo as variáveis mais importantes.</p>	<p>Largura da superfície do canal; Diâmetro característico do material de fundo (<math>D_{50}</math>); Profundidade hidráulica; Declividade da linha d'água e Viscosidade cinemática da água.</p>
<p><b>Yang (1973)</b> Yang (1973) observou que potência unitária do escoamento é um fator dominante na determinação da concentração total de sedimentos. Suas equações podem ser usadas em canais com materiais não coesivos e para qualquer tipo de forma de fundo.</p>	<p>Diâmetro médio do sedimento; Velocidade média do escoamento; Descarga líquida; Viscosidade cinemática da água; Profundidade hidráulica e Declividade da linha d'água.</p>

### Critério de comparação dos métodos avaliados

Na avaliação para o ajuste dos métodos de cálculo de transporte de sedimentos foram utilizados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de massa residual (CMR), coeficiente de ajuste (CA), eficiência (EF) e raiz da média da soma dos quadrados dos desvios (RMSE), representados pelas Equações 7, 8, 9 e 10 conforme Zacharias et al. (1996) e Sentelhas et al. (1997).

$$CMR = \frac{(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (7)$$

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$EF = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (10)$$

Em que:  $O_i$  e  $P_i$  são, respectivamente, os valores observados e estimados,  $n$  é o número de observações e  $\bar{O}$  a média aritméticas das observações.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes à vazão segue abaixo, Tabela 2, com dados das medições aferidas ao longo dos três meses de campanha.

Tabela 2. Dados de descarga líquida do Córrego Guariroba.

Campanhas	24/11/2012	09/01/2013	05/03/2013
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	4,44	4,64	5,09
Área (m <sup>2</sup> )	8,12	8,10	8,31
Velocidade (m/s)	0,55	0,57	0,61

Campanhas	24/11/2012	09/01/2013	05/03/2013
Largura (m)	8,50	8,60	8,80
Profundidade (m)	0,96	0,94	0,94

Utilizou-se o método de ILL para integrar toda a seção e obter uma melhor amostragem dos dados. Esse método é de simples operação, não havendo necessidade de se conhecer as vazões parciais, realizadas em várias verticais. Juntamente com as medições de vazão e coleta de amostra de sedimentos em suspensão, foi realizada amostragem do leito com a coleta de material de fundo carreado pelo rio, importante para estimar diretamente a descarga de fundo. Seguem Tabela 3 e Figura 1:

Tabela 3. Descarga sólida medida diretamente.

Local	Data da medição	Descarga Sólida em Suspensão (ton/d)	Descarga Sólida de fundo (ton/d)	Descarga Sólida Total (ton/d)
Foz	24/11/2012	8,9996	12,4239	21,4235
Foz	09/01/2013	8,1462	15,2857	23,4319
Foz	05/03/2013	9,9257	18,0224	27,9481

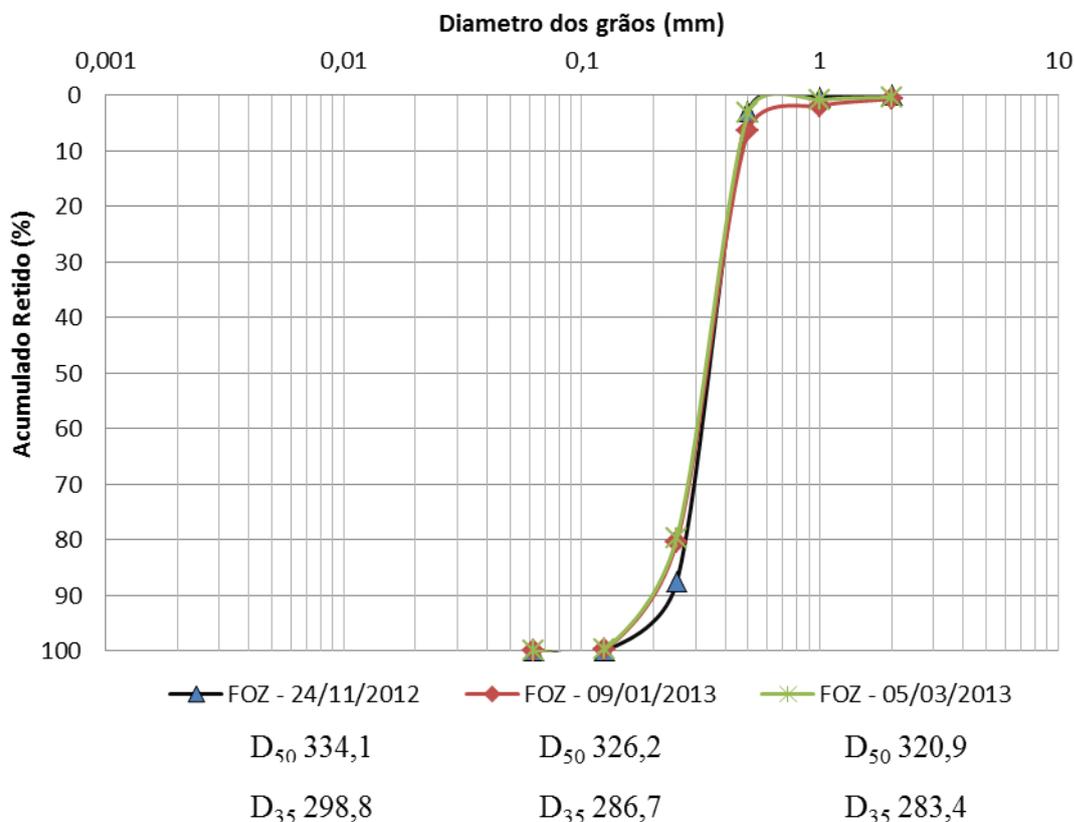


Figura 1. Distribuição granulométrica do material de leito.

Existem vários métodos para a estimativa de carga de material de fundo, outros a carga de sedimento em suspensão, obtendo pela soma de carga de fundo com carga em suspensão a descarga sólida total. Foram selecionados 4 métodos que calculam de maneira indireta a descarga sólida total, sendo que o Colby (1957) estima de forma indireta a descarga sólida de fundo e direta a descarga sólida em suspensão, fazendo-se uso da concentração de sedimentos suspensos para se obter a descarga. Abaixo os resultados obtidos de descarga sólida na Tabela 4:

Tabela 4. Descarga sólida calculada indiretamente.

Data	Descarga sólida total a partir dos métodos adotados (ton/d)				
	Ackers & White (1973)	Colby (1957)	Karim (1998)	Yang (1973)	Estimativa Direta
24/11/2012	147,2139	25,1336	170,3046	426,6605	21,4235
09/01/2013	184,8431	24,5711	194,9566	466,0520	23,4319
05/03/2013	242,1643	30,9534	249,6372	577,7017	27,9481

Na Tabela 5 observam-se os indicadores estatísticos a fim de fundamentar as comparações feitas em relação à descarga sólida por medição direta:

Tabela 5. Parâmetros estatísticos para ajuste dos métodos indiretos de cálculo de descarga sólida.

Métodos estudados	C.A.	C.R.M.	E.F.	R.M.S.E.
Ackers & White (1973)	0,000253	-6,887346	-3928,882	171,0434
Colby (1957)	0,490436	-0,107887	-0,079	2,8340
Karim (1998)	0,000221	-7,446000	-4509,395	183,2415
Yang (1973)	0,000034	-19,197027	-29656,788	469,8789

Analisando o C.M.R., nota-se que todos os métodos se apresentam com valores negativos, indicando que superestimam a descarga sólida por medição direta. O de Colby (1957) apresenta desvio próximo de zero, indicando que tal método apresenta melhor ajuste para a seção do Córrego em estudo. O método de Yang (1973) é o menos indicado para estimar o total de sedimentos transportados, por apresentarem desvio elevado, comparado aos demais.

Os índices C.A. e E.F. apresentaram o melhor resultado para o Método de Colby (1957), pois, de todos os métodos, apresentou o valor mais próximo de 1.

O R.M.S.E. representa a acurácia dos modelos avaliados, e dentre eles, o mais acurado em relação aos dados observados também é o Método de Colby (1957).

O pior desempenho dentre os métodos de estimativa da descarga total, na seção estudada, analisando todos os índices estatísticos, foi apresentado pelo Método de Yang (1973).

## CONCLUSÃO

Embora a estimativa direta apresente maior confiabilidade, a indireta utilizando o método de Colby (1957) tem ajuste satisfatório em relação aos outros métodos de cálculo, sendo método indicado para corpos hídricos em que não se pode medir a descarga de fundo diretamente com equipamento.

## REFERÊNCIAS

- ACKERS, P. & WHITE, W.R. (1973). Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 99, No.HY 11, Nov., pp.2041-2060
- CARVALHO, N.O. (2008). *Hidrosedimentologia Prática*. 2a. Ed. Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 599 p.
- COLBY, B.R. *Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity*. Transactions, Amer. Geophy. Union. Vol . 38, n. 5, oct, pp.708-719. 1957
- DNAEE. (1997) *Normas e recomendações hidrológicas, sedimentológicas*. Departamento Nacional de Energia Elétrica
- KARIM, F. (1998) *Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, n. 6, Jun., pp.597-604
- PAIVA, J. B. D. (2001). Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios.; In *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Org. por Paiva, J. B. D. e Coiado, E. M., ABRH, Porto Alegre – RS, pp. 313 – 353
- PAIVA, J.B. D. de, Beling, F.A e Rosa, L.H. da. WinTSR – Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios. HDS-CT- UFSM. 2002 ( Software não publicado)
- RICKER, M. C.; ODHIAMBO, B. K.; CHURCH, J. M. (2008). *Spatial analysis of soil erosion and sediment fluxes: a paired watershed study of two Rappahannock River tributaries, Stafford County, Virginia*. Environ Manage, v. 41, n. 5, p. 766-78, May 2008. ISSN 0364-152X (Print) 0364-152X (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18320265> >
- SCAPIN, J.; PAIVA, J.B.D.; BELING, F.A. (2007). Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V. 12 n.4, pp. 05-21
- SIMÕES, S. J. C. (2001). Processos Erosivos.; In: *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Org. por Paiva, J. B. D. e Coiado, E. M., ABRH, Porto Alegre – RS pp. 283 – 293
- YANG, C.T. (1973). *Incipient Motion and Sediment Transport*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.99, n. HY10, Oct., pp.1679-1701