

## MEDIÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO E MAPEAMENTO DE SEÇÃO TRANSVERSAL UTILIZANDO MEDIÇÕES ACÚSTICAS

*Liege Wosiacki<sup>1</sup>; Heloíse Knapik<sup>2</sup>; Tobias Bleninger<sup>3</sup>*

**ABSTRACT** – Neste estudo foram realizadas estimativas de concentração e transporte de sedimentos através de medições acústicas com o ADP-M9 da Sontek/Xylem e pelo monitoramento convencional em uma seção transversal do rio Passaúna (divisa entre os municípios de Campo Largo-PR e Curitiba-PR) ao longo de 5 campanhas entre Fevereiro de 2017 e Outubro de 2018. Além de indicar uma boa correlação entre o sedimento obtido e o sinal acústico corrigido, a análise dos dados ao longo da seção transversal indica que a extrapolação dos dados na seção transversal é uma medida importante na obtenção correta das concentrações médias na seção. Além disso, fica evidente que a obtenção pontual de dados à meia seção em rios de baixas velocidades, sob a suposição de distribuição uniforme dos sedimentos na seção, negligencia o gradiente vertical de sedimentos que pode ser bastante pronunciado da superfície para o fundo.

**Palavras-Chave** – sedimentos; ADCP; mapeamento

### 1 - INTRODUÇÃO

Devido sua importância e complexidade na gestão de bacias hidrográficas, novos métodos de medição e estimativa de quantificação e transporte de sedimentos vêm sendo consideravelmente explorados, seja por esforços para sua determinação *in-situ* (Czuba *et al.*, 2017; Felix *et al.*, 2017 e Santos, 2018), análises convencionais (Carvalho, 2000) ou por determinação indireta, através da correlação com sensores (Baranya & Józsa, 2013; Guerrero *et al.*, 2016; Haun & Lizano 2018 e Szupiany *et al.*, 2019), sendo mais comuns os sensores ópticos (turbidímetros) ou acústicos (ADCPs).

Considerando os métodos indiretos, medidores acústicos tem sido bastante empregados para determinação de sedimentos em rios de forma contínua, pela instalação dos chamados “side-looking ADCPs” (Moore *et al.*, 2013; Wood and Teasdale, 2013 and Landers *et al.*, 2016), sob a suposição de que o sedimento é uniformemente distribuído ao longo de toda a coluna d’água e

<sup>1</sup> PPGERHA/UFPR, Caixa Postal 19011 - Jardim das Américas, Curitiba-PR, liegewosiacki@gmail.com

<sup>2</sup> PPERHA/UFPR, Caixa Postal 19011 - Jardim das Américas, Curitiba-PR, helogk@gmail.com

<sup>3</sup> PPERHA/UFPR, Caixa Postal 19011 - Jardim das Américas, Curitiba-PR, tobias.bleninger@gmail.com

também pela determinação discreta, através de medições com ADCPs verticais acoplados a barcos (Guerrero, *et al.*, 2011; Baranya & Józsa, 2013; Guerrero *et al.*, 2016; Haun & Lizano 2018 e Szupiany *et al.*, 2019).

Dessa forma, este trabalho visa obter a correlação entre o sinal corrigido do ADCP e da concentração de sedimentos em suspensão, bem como o mapeamento desse parâmetro ao longo da coluna d'água. Tal detalhamento permite subsidiar estudos para os quais a distribuição de sedimento ao longo da seção é importante, tais como: determinação da altura de captação de água para abastecimentos público ou dessedentação animal, operações de portos, dragagens, entre outros.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 - Área de Estudo

O Rio Passaúna (Figura 1) é o principal rio da bacia de mesmo nome e está localizado na fronteira oeste do município de Curitiba (PR) na Bacia do Alto Iguaçu. A seção de monitoramento está localizada na ponte da BR-277 e tem aproximadamente 15 m de largura e 1,5 m de profundidade, no ponto mais profundo do canal. Nesta seção também está localizada uma estação de monitoramento da ANA (Estação BR-277 Campo Largo, código: 65021800)<sup>4</sup>.

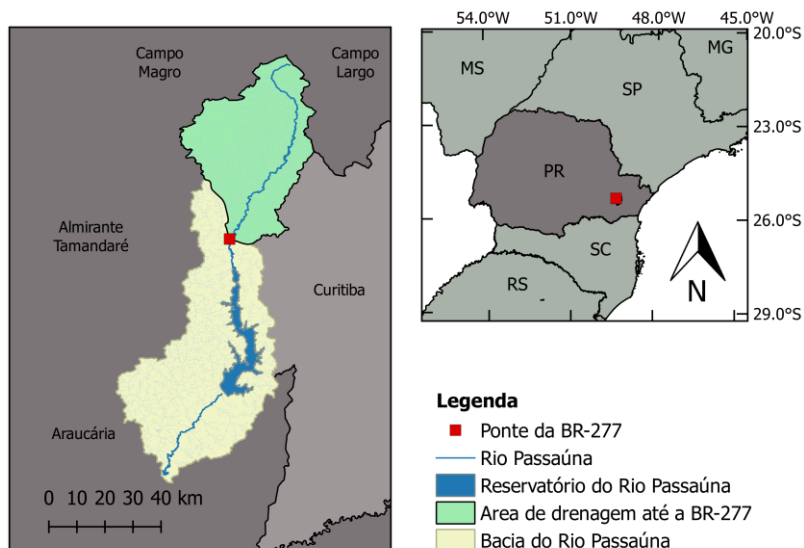


Figura 1 - Localização da Área de Estudo - Ponte da BR-277 sobre o Rio Passaúna.

(Fonte: Autoria Própria)

<sup>4</sup> Sistema de Informações Hidrológicas (SIH)

Foram realizadas 5 campanhas de monitoramento entre Fevereiro de 2017 e Outubro de 2018, sendo que as campanhas efetuadas em Outubro de 2018 ocorreram durante a passagem de um evento chuvoso extremo ao final da estação mais seca – em média a estação chuvosa vai de Outubro a Março e a estação mais seca vai de Abril a Setembro.

Foram realizadas medições com o Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (ADCP), modelo ADP-M9, da marca *Sontek-Xylem*, seguidas de amostragem de água e medição *in-situ* da granulometria com o equipamento de medição granulométrica *in-situ* LISST (*Laser In-situ Spectrometer*) da marca *Sequoia Scientific*. Maiores detalhes a respeito dos equipamentos e procedimentos são dados na seção a seguir.

## 2.2 - Equipamentos utilizados e procedimentos de campo

Durante as campanhas foram realizadas medições dinâmicas e estáticas com o ADCP (Figura 2a). Este equipamento é composto por uma sonda de 9 transdutores, sendo 4 transdutores operantes a 3 MHz, 4 operantes a 1 MHz e 1 transdutor vertical de 0,5 MHz utilizado para medição de profundidade.

As medições dinâmicas da seção transversal com o ADP-M9 servem para medir a vazão do local, sendo realizadas no mínimo 4 medições da seção transversal. As medições estáticas têm como objetivo a verificação da existência de fundo móvel, além de ser um dos passos primordiais para a correção e correlação do sinal medido com os sedimentos em suspensão. Todas as medições deste estudo foram conduzidas na frequência fixa de 3 MHz.

O fundo móvel resulta do transporte de sedimentos no fundo do rio, identificado pelo ADCP como se a embarcação estivesse se deslocando para montante, causando um aumento aparente na velocidade para montante e reduzindo a velocidade da água lida pelo ADCP e, portanto, a vazão.



Figura 2 – Equipamentos utilizados: (a) ADP-M9 da Sontek/Xylem, (b) LISST-200X da Sequoia Scientific, (c) Garrafa Van Dorn e (d) CTD da Sontek/Xylem.

(Fonte: Autoria Própria).

Adicionalmente, após a medição com o ADCP foram coletadas amostras de água com a Garrafa Van Dorn (Figura 2c) à meia profundidade no meio da seção transversal (à exceção do evento extremo, quando a coleta foi feita da margem, por medidas de segurança). As amostras foram acondicionadas e encaminhadas para posterior determinação da fração em suspensão (SST – sólidos

suspensos totais, APHA, 1999). Foram também realizadas análises de granulometria in situ com o equipamento LISST (Figura 2b), à mesma profundidade de coleta e medição da velocidade do som, a determinações de condutividade e temperatura com o auxílio do equipamento CTD (Figura 2d), também da marca Sontek-Xylem.

### 2.3 - Processamento de dados

O primeiro passo do processamento de dados levou em conta a correção do sinal acústico pela velocidade, obtida através da medição com CTD e então procedeu-se para o processamento em ambiente *Matlab* para a correção do sinal medido (SNR).

O algoritmo para extração do SNR e sua correção e correlação com a concentração de SST leva em conta o fato de que a onda sonora fica mais fraca à medida que se afasta do transdutor. Isso ocorre devido as atenuações provocadas pelo espalhamento geométrico da onda, pela absorção da água e pela absorção provocada pelas partículas em suspensão (SST).

A equação 1 descreve a atenuação a partir da descrição matemática desses fenômenos onde,  $SNR_{médio}$  é a média da medição dos 4 feixes do ADCP ao longo de cada vertical, (a 3MH)  $20\log_{10}(\psi R)$  é a atenuação pela geometria da onda,  $2R\alpha_w$  é a absorção pela água e  $2R\alpha_s$  é o parâmetro de atenuação pelo sedimento (função da SST, da massa específica e do diâmetro médio – D50).

$$SNR_{corrigido} = SNR_{médio} + 20\log_{10}(\psi R) + 2R\alpha_w + 2R\alpha_s \quad (1)$$

Na equação 1 o coeficiente  $\psi$  é a correção do fator que relaciona o efeito do espalhamento esférico da onda perto do transdutor,  $R$  é a distância inclinada a partir do transdutor até a célula medida.  $\alpha_w$  é o coeficiente de absorção pela água e  $\alpha_s$  é o coeficiente de atenuação pelo sedimento. As correções aplicadas nesse estudo seguem os modelos apresentados por Guerreiro *et al.* (2016).

Depois da aplicação de todas as correções é possível obter uma curva ajustada da forma apresentada na Equação 2, que correlaciona o  $SNR_{corrigido}$ , em *dB* com a SST em *mg/L*.

$$\log_{10}(SST) = a.SNR_{corrigido} + b \quad (2)$$

onde  $a$  e  $b$  são os coeficientes angular e linear da reta ajustada.

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros medidos e analisados ao longo das campanhas efetuadas. O evento extremo, em Outubro de 2018, apresentou uma vazão de aproximadamente  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  e concentração de SST de  $209 \text{ mg/L}$ , equivalente a 70% da concentração máxima observada por Rauhen *et al.* (2017) de  $294 \text{ mg/L}$ , que considerou séries históricas no período de dez/1985 a agoo/2015.

Com relação à granulometria, o equipamento LISST foi usado somente nas três últimas campanhas, sendo que em função às limitações do aparelho, no período extremo não foram produzidos dados de qualidade, sendo, portanto, consideradas somente duas medições: de 13/08/2018 e 20/10/2018. Nas demais campanhas esses valores foram preenchidos de acordo com regime pluviométrico e as semelhanças nas vazões<sup>5</sup>.

Tabela 1 – Parâmetros medidos ao longo das campanhas efetuadas: Vazão média (Q), Concentração de Sedimentos Suspensos Totais (SST) e Diâmetro médio do sedimento (D50).

	Campanhas				
	07/05/2017	23/04/2018	13/08/2018	18/10/18	20/10/2018
Q (m³/s)	0.95	1.59	0.52	11.30	1.93
D50 (µm)	93.17*	93.17*	93.17	37.22**	37.22
SST(mg/L)	10.3 ± 0.4	13.3± 1.6	17.7± 6.1	209 ± 1.4	77.8± 11.3

\*valores preenchidos com a medição do dia 13/08/2018

\*\*valor preenchido com a medição do dia 20/10/2018

Após a coleta e pós-processamento dos dados foi possível obter a curva de correlação entre o  $SNR_{\text{corrigido}}$  e a concentração de SST, conforme apresentado na Tabela 1/Figura 3. Observa-se da correlação uma boa aderência dos pontos à curva, com um  $R^2=0,9401$ .

Além da obtenção da curva de correlação, antes de tratar do mapeamento do sedimento na seção transversal é importante mencionar o fato de que o ADCP não mede a seção transversal por completo, descartando o sinal medido em áreas próximas à superfície, margens e fundo, devido ao fenômeno de *blanking* e *side-lobe*, descritos por Mueller et al. (2013). Para corrigir tal questão foram aplicadas extrapolações a essas áreas, sendo a extrapolação potencial ao fundo, triangular às margens e a simples repetição dos valores das células de superfície a área descartada.

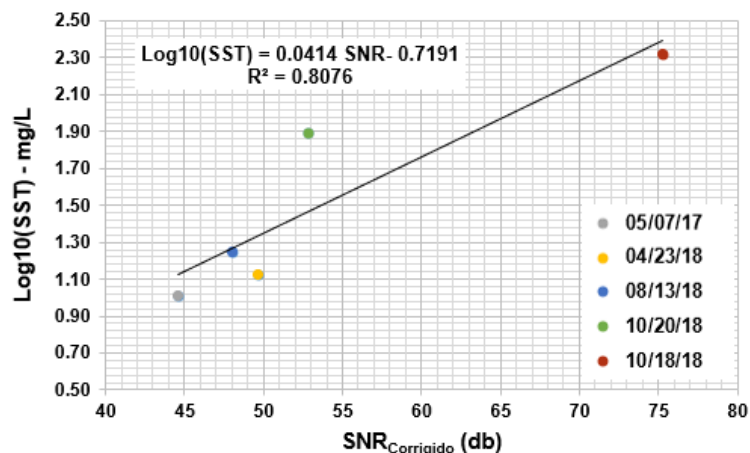


Figura 3 – Curva de correlação entre Log10(SST) e o sinal corrigido ( $SNR_{\text{corrigido}}$ ). Fonte: Autoria Própria.

<sup>5</sup> Embora existam incertezas associadas ao procedimento de preenchimento, essas não foram contabilizadas neste estudo.



Nas Tabelas 2 e 3 e na Figura 4 são apresentadas as comparações entre os dados laboratoriais e os valores médios das seções transversais, considerando os resultados extrapolados e não extrapolados de SST e Qss (descarga sólida).

Tabela 2 – Comparação entre SST obtido em laboratório e SST médio da seção transversal medida com o ADCP: sem extrapolação e com extrapolação.

	Campanhas					Média
	07/05/2017	23/04/2018	13/08/2018	18/10/2018	20/10/2018	
SST <sub>laboratorio</sub>	10.3000	13.3100	17.6700	209.0000	77.7500	-
SST <sub>Não-extrapolado</sub>	11.0593	17.8516	25.7027	214.7199	28.1118	-
SST <sub>Extrapolado</sub>	11.0663	17.8668	26.0775	233.4024	27.8000	-
Diferença*	-7%	-34%	-45%	-3%	64%	-5%
Diferença**	-7%	-34%	-48%	-12%	64%	-7%

\*Diferença entre SST<sub>laboratorio</sub> e SST<sub>Não-extrapolado</sub>

\*\* Diferença entre SST<sub>laboratorio</sub> e SST<sub>Extrapolado</sub>

Tabela 3 – Comparação entre Qss obtido em laboratório e Qss médio da seção transversal medida com o ADCP: sem extrapolação e com extrapolação.

	Campanhas					Média
	07/05/2017	23/04/2018	13/08/2018	18/10/2018	20/10/2018	
QSS <sub>laboratorio</sub>	0.8481	1.8296	0.7878	203.9606	5.2636	-
QSS <sub>Não-extrapolado</sub>	0.4893	1.3165	0.3791	116.3433	1.8331	-
QSS <sub>Extrapolado</sub>	0.8161	2.2052	1.3968	204.7376	4.1650	-
Diferença*	42%	28%	52%	43%	65%	46%
Diferença**	4%	-21%	-77%	0%	21%	-15%

\*Diferença entre QSS<sub>laboratorio</sub> e QSS<sub>Não-extrapolado</sub>

\*\* Diferença entre QSS<sub>laboratorio</sub> e QSS<sub>Extrapolado</sub>

Dos resultados é possível observar que em ambas as análises (SST e Qss) os resultados extrapolados apresentam menores diferenças médias em relação ao resultado laboratorial do que os resultados não extrapolados.

Embora em termos médios os valores extrapolados tenham ficado 7% e 15% (SST e Qss, respectivamente) mais próximos do valor observado, o mapeamento da seção indica que a amostragem à meia seção, feita através da suposição de uniformidade na coluna d'água, negligencia os gradientes de concentração em direção ao fundo.

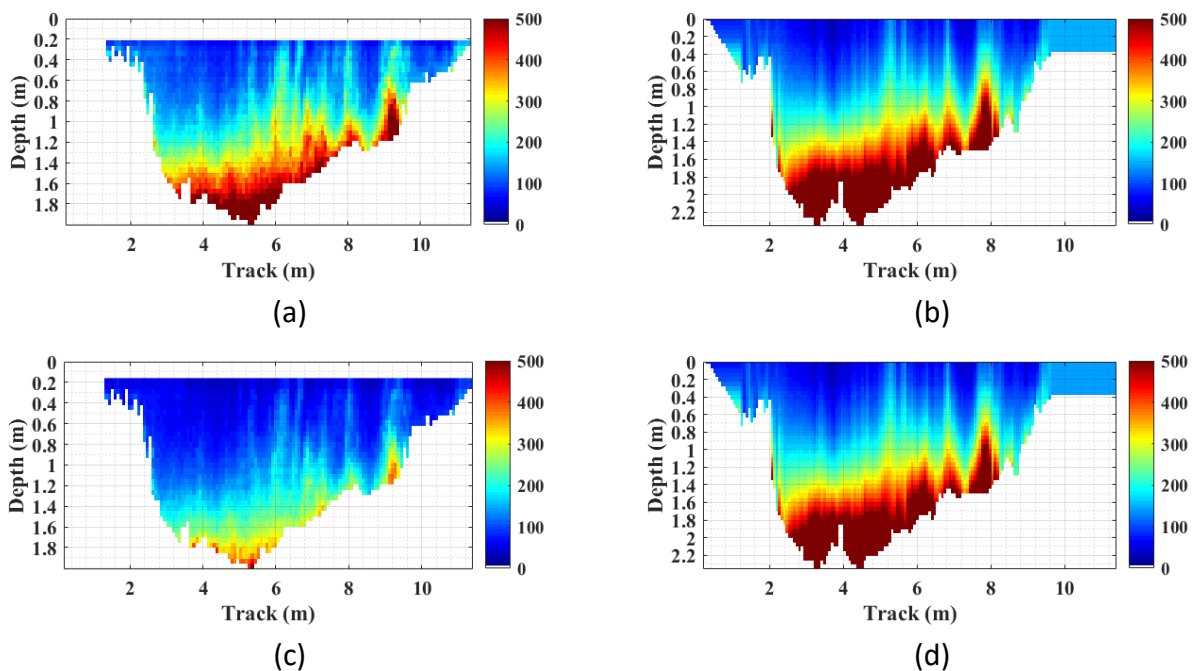


Figura 4 – Resultados do mapeamento da concentração de SST ao longo da seção transversal: (a) SST não extrapolado, (b) SST extrapolado e Resultado do mapeamento da descarga sólida: (c) Qss não extrapolado e (d) Qss extrapolado. Resultado das medições feitas na campanha de 18/10/2018 durante a passagem de um evento extremo de chuva. (Fonte: Autoria Própria).

## 4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi obtida a curva de correlação entre o sinal corrigido do ADCP e a concentração de SST e consequente mapeamento da concentração de sedimentos e descarga sólida ao longo da seção transversal, considerando a área medida (não extrapolada) e a área extrapolada.

A realização de um maior número de campanhas e diferentes situações hidráulicas torna o modelo mais robusto, garantindo sua aplicação ao longo do tempo sem que seja necessário lançar mão das medições convencionais da concentração de SST em todas as idas a campo, permitindo o aumento da resolução temporal e espacial dos valores de SST. Além disso, o uso do ADCP possibilita a obtenção de informação em períodos extremos (quando é perigoso ir a campo). Como desvantagem, tem-se o preço do equipamento, vazão e incertezas relacionadas a locais muito rasos ou de baixa com pouca concentração de sedimento e/ou muito turbulento.

De maneira geral, mesmo considerando-se tais desvantagens, o estudo de novas tecnologias poderá ajudar a melhorar tanto as medições quanto os planos de monitoramento, considerando a combinação com os métodos convencionais, já estabelecidos, de forma a aumentar a qualidade e a quantidade dos dados obtidos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), ao Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto (LABEAM), ao Instituto Tecnológico de Transporte e Infraestrutura (ITTI) e a coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte através das bolsas de estudo.

## BIBLIOGRAFIA

- APHA (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. [S.l.]: Amer Public Health Assn, 1999. ISBN 0875532357.
- BARANYA, S.; JÓZSA, J. (2013) Estimation of suspended sediment concentrations with ADP in Danube river. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Walter de Gruyter GmbH, v. 61, n. 3, p. 232–240, sep 2013.
- CARVALHO, N (2008). *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: Editora Inter ciência. ISBN 9788571931817
- CZUBA, J. A. et al. Comparison of fluvial suspended-sediment concentrations and particle-size distributions measured with in-stream laser diffraction and in physical samples. *Water Resources Research*, v. 51, p. 320–340, 2015
- FELIX, D.; ALBAYRAK, I.; BOES, R. In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (lisst) and vibrating tube densimetry. *International Journal of Sediment Research*, v. 33, p. 3–17, 2017.
- GUERRERO M, RÜTHER N, SZUPIANY R, HAUN S, BARANYA S, LATOSINSKI F. (2016). The Acoustic Properties of Suspended Sediment in Large Rivers: Consequences on ADP Methods Applicability. *Water*; 8(1):13.
- HAUN, S.; LIZANO, L.(2018) Sensitive analysis of sediment flux derived by laser diffraction and acoustic backscatter within reservoir. *International Journal of Sediment Research*, p. 18–26.
- Landers, M.N., Straub, T.D., Wood, M.S., and Domanski, M.M. (2016). Sediment acoustic index method for computing continuous suspended-sediment concentrations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. C5, 63 p., <http://dx.doi.org/10.3133/tm3C5>
- MOORE SA, LECOZ J, HURTHUR D, PAQUIER A.(2013). Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. *Journal of the Acoustical Society of America* 133: 1959–1970.
- MUELLER, D.S., AND WAGNER, C.R. (2013). Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A–22, 72 p. (available online at <http://pubs.water.usgs.gov/tm3a22>).
- RAUEN, W. B.; CASTRO, C. O. de; SILVA, M. G. da. Caracterização hidrossedimentologica do rio passauna, pr, brasil, a partir de dados históricos. In: *XX Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.: s.n.], 2017.
- SANTOS, B. B. D. et al. Evaluation of the laser diffraction method for the measurement of suspended sediment concentration in mogi-guassu reservoir/sp. brazil. *International Journal of River Basin Management*, Informa UK Limited, v. 17, n. 1, p. 89–99, mar 2018.
- WOOD, M.; TEASDALE, G. N. (2013) Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington. [S.l.].