

# Uso do Perfilador Acústico (ADCP) para Medição do Transporte Sólido em Suspensão

F. R. Terabe, LACTEC, J. J. Ota, LACTEC, R. Mayerle, University of Kiel, E. R. Taniguchi, LACTEC e I. Santos, LACTEC

**Resumo** – Apesar da importância do transporte de sedimentos em suspensão, poucos são os dados disponíveis devido às dificuldades e custos para a obtenção de amostragens mecânicas convencionais. O perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) tem sido usado com sucesso em hidrometria. Como subproduto, ele apresenta possibilidades de quantificar a concentração de sólidos através da análise dos sinais acústicos refletidos pelos sedimentos. No entanto, o seu uso não é nem difundido nem apresenta histórico convincente capaz de dar segurança ao usuário. Este estudo visa validar o uso do aparelho como medidor de descargas sólidas em suspensão efetuando a conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos. Estudos de caso foram realizados com sucesso com dados coletados nos rios Piquiri e Ivaí (Paraná) e em áreas costeiras do Mar do Norte da Alemanha. O estudo confirma a eficiência do equipamento acústico na determinação de transporte sólido em suspensão.

**Palavras-chave** — ADCP – Medição acústica de sedimentos – Transporte de sedimentos.

## I. INTRODUÇÃO

A implantação de uma barragem modifica consideravelmente a dinâmica do transporte de sedimentos de um rio. A montante da barragem, o reservatório formado tenderá a reter a carga de sedimentos transportados pelo rio, pela diminuição da velocidade do fluxo. Ao passo que, a jusante da barragem, o fluxo menos carregado de partículas sólidas terá um potencial erosivo mais acentuado. Diversos problemas decorrentes dessa alteração na dinâmica do transporte de sedimentos já foram identificados, entre os quais pode-se destacar: a formação de deltas a montante dos reservatórios, impactos ecológicos a montante e a jusante do barramento e, principalmente, a perda da capacidade de armazenamento dos reservatórios, devido ao assoreamento. É importante considerar que, no Brasil, a energia elétrica é gerada, predominantemente, por usinas hidrelétricas com reservatórios sujeitos à sedimentação.

O primeiro passo no sentido de prevenir ou controlar os problemas causados por sedimentos é a quantificação da vazão sólida no escoamento de água em questão. No entanto, as medições de vazão sólida em rios brasileiros são mui-

to escassas, devido aos custos e dificuldades operacionais relativas às metodologias existentes.

Na natureza, a concentração de sedimentos em suspensão em cursos de água apresenta grande variação, podendo chegar a valores da ordem de  $10^5$  mg/l, como por exemplo, no rio *Puerco*, Novo México. Além disso, o tamanho das partículas sólidas e as condições de fluxo podem variar de um ambiente para outro, gerando dificuldades para quantificação precisa do transporte de sedimentos.

Durante a última década ocorreram avanços significativos no desenvolvimento de técnicas de medição de concentração de sedimentos em suspensão, entre as quais, destacam-se as baseadas em princípios ópticos e acústicos. Essas técnicas apresentam a grande vantagem de obter medições contínuas de concentração de sedimentos em suspensão. No entanto, ainda necessitam de amostragens com equipamentos mecânicos para o estabelecimento de curvas de calibragem.

O Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (ADCP) é um equipamento acústico bastante eficiente para medição de velocidades de escoamentos. O seu uso em medições de transporte de sedimentos em suspensão encontra-se ainda em estágio de desenvolvimento, porém com possibilidades muito promissoras. Em termos técnicos, a principal vantagem da aplicação do ADCP é possibilitar a realização de medições contínuas de perfis de concentração de sedimentos em suspensão, em conjunto com medições de perfis de velocidades, sem a necessidade de introduzir diretamente o equipamento no ponto de medição, isto é, sem perturbar as condições locais do escoamento.

A importância desse estudo deve-se ao fato de que o desenvolvimento do uso do ADCP propiciará a redução dos custos de levantamentos de campo em termos de transporte de sedimentos, permitindo a obtenção de grande quantidade de dados com boa resolução temporal e espacial. Portanto, essa técnica possibilitará a quantificação mais precisa do transporte de sedimentos em suspensão, permitindo a tomada de decisões corretas sobre como prevenir problemas com sedimentos, tornando mais preciso o cálculo da vida útil de reservatórios.

## II. AMOSTRAGEM ACÚSTICA

### A. Perfilador Acústico ADCP

Provavelmente o equipamento acústico mais conhecido é o ADCP. Este equipamento, desenvolvido para medição de vazão, permite a determinação das componentes da velocidade do fluxo nas direções norte, leste e vertical, e da intensidade do sinal acústico refletido devido à concentração dos sedimentos em suspensão.

Para medição de velocidades do escoamento o ADCP utiliza o efeito Doppler, transmitindo uma onda sonora a uma

F. R. Terabe trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: terabe@lactec.org.br).

J. J. Ota trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e professor da Universidade Federal do Paraná (e-mail: ota@lactec.org.br).

R. Mayerle trabalha na University of Kiel (e-mail: rmayerle@corelab.uni-kiel.de)

E. R. Taniguchi trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: edie@lactec.org.br).

I. Santos trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: irani@lactec.org.br).

freqüência fixa e captando os ecos que retornam, refletidos por partículas em suspensão na água.

A medição da concentração de sedimentos em suspensão é baseada na reflexão das ondas de ultra-som pelas partículas em suspensão. O transdutor emite um pulso acústico curto (período de 10  $\mu$ s) de alta freqüência (1 a 5 MHz) [1]. Parte dessa energia acústica é refletida pelas partículas de sedimentos em suspensão e retorna para o transdutor. A magnitude do sinal acústico refletido é relacionada com a concentração, com o tamanho das partículas e com o tempo entre a transmissão e a recepção.

A amostragem acústica é em geral recomendada para partículas de areia (maiores que 50  $\mu$ m) e concentrações até 10.000 mg/l [1].

A relação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão é bastante dependente do tamanho das partículas. Por esse motivo, a correlação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão deve ser calibrada com medições de concentração de sedimentos feitas por outro equipamento (amostrador mecânico ou óptico) [2].

### B. Método de Deines

O método proposto por Deines (1999) considera a proporcionalidade entre incrementos de intensidade do sinal acústico e razão entre concentrações de sedimentos. As intensidades do eco registradas pelo ADCP são convertidas em concentrações de sedimentos através de uma correlação estabelecida a partir de uma intensidade do eco e uma concentração de sedimentos em suspensão correspondentes, determinadas simultaneamente no mesmo local, denominada nível de referência.

A equação para estimar a concentração de sedimentos em suspensão a partir dos registros de intensidades do eco é obtida a partir da seguinte formulação [3]:

$$C_v = 10 \log(C_i) \quad (1)$$

na qual,  $C_i$  é a concentração de sedimentos estimada, em mg/l, correspondente à posição  $i$  e  $C_v$  é determinado por (2), a partir das características do sistema, das intensidades dos ecos registrados pelo ADCP e da concentração de sedimentos medida no nível de referência. O logaritmo é decimal.

$$C_v = C + 20 \log(R_i) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R_i + K_c(E_i - E_r) \quad (2)$$

na qual, a constante  $C$  é definida por (3), com dados do nível de referência.

$$C = C_{vr} - 20 \log(R_r) - 2\alpha R_r + L_{DBM} + P_{DBW} \quad (3)$$

onde:

- $C_{vr}$  =  $10 \log(C_r)$ ;
- $C_r$  = concentração de sedimentos em mg/l, medida no nível de referência;
- $R_i$  = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até a profundidade na qual foi medida a intensidade do eco  $E_i$ ;
- $R_r$  = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até o nível de referência;
- $L_{DBM}$  =  $10 \log L$ ;
- $P_{DBW}$  =  $10 \log P$ ;
- $L$  = comprimento do pulso transmitido (m);
- $P$  = potência transmitida (W);

- $\alpha$  = coeficiente de absorção acústica da água (dB/m);
- $K_c$  = fator de escala de intensidade do eco (dB/counts);
- $E_i$  = intensidade do eco registrada pelo ADCP na posição  $i$  (counts);
- $E_r$  = intensidade do eco registrada pelo ADCP no nível de referência (counts).

Nas Equações (2) e (3), os termos  $20 \log(R_r)$  e  $20 \log(R_i)$  representam a perda logarítmica na intensidade do eco com o aumento da distância, devido à expansão do feixe acústico. Os termos  $2\alpha R_r$  e  $2\alpha R_i$  representam a redução na intensidade do eco causada pela absorção acústica na água.

Substituindo (3) em (2) e retornando a (1) obtém-se (4), que é usada para estimar as concentrações de sedimentos a partir das intensidades dos ecos, registradas pelo ADCP.

$$C_i = 10^{\left[ \log C_r + \frac{(E_i - E_r)}{10} \right]} \quad (4)$$

na qual:

- $C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão estimada na posição  $i$  (mg/l);
- $C_r$  = concentração de sedimentos em suspensão medida no nível de referência para calibragem (mg/l);
- $E_i$  = intensidade do eco correspondente à posição  $i$  (dB);
- $E_r$  = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB).

Através da análise de dados de campo, concluiu-se que os resultados do método proposto por Deines (1999) são significativamente melhores quando o incremento da intensidade do eco ( $E_i - E_r$ ) de (4) é multiplicado por um coeficiente, que no presente estudo será chamado de  $K_M$ , igual a 0,45, conforme indicado na seguinte equação:

$$C_i = 10^{\left[ \log C_r + \frac{K_M(E_i - E_r)}{10} \right]} \quad (5)$$

### III. DADOS COLETADOS E RESULTADOS OBTIDOS

O presente estudo foi desenvolvido a partir de dados coletados em rios e áreas costeiras, em condições naturais de escoamento com transporte de sedimentos. Os dados coletados incluíram concentrações de sedimentos em suspensão, determinados com amostradores mecânicos e ópticos, e amostras de intensidades de sinais acústicos, registradas com o perfilador acústico ADCP. As coletas de dados foram realizadas nos rios Piquiri e Ivaí, no estado do Paraná, e na região costeira do Mar do Norte da Alemanha.

#### A. Rios do Estado do Paraná

Nos rios Piquiri e Ivaí, a determinação das concentrações de sedimentos em suspensão foi feita com um amostrador mecânico pontual, e para amostragem acústica foi utilizado um ADCP modelo 1.200 kHz. As amostras foram coletadas em cinco verticais, igualmente espaçadas, ao longo das seções transversais dos rios estudados. Em cada vertical foram amostrados cinco pontos, nos quais foram determinadas as concentrações de sedimentos em suspensão simultaneamente com registros de sinais acústicos.

As concentrações de sedimentos medidas nos rios estudados apresentaram valores relativamente baixos. No rio Piquiri as concentrações variaram entre 14,5 mg/l e 27,0 mg/l e no rio Ivaí entre 8,0 mg/l e 15,0 mg/l. Os perfis

verticais de concentrações de sedimentos em suspensão determinados pela amostragem mecânica resultaram muito uniformes.

A análise granulométrica dos sedimentos em suspensão apresentou diâmetros bastante reduzidos, sendo o diâmetro  $d_{50}$  médio da ordem de 15,6  $\mu\text{m}$  no rio Piquiri e 16,5  $\mu\text{m}$  no rio Ivaí, justificando a uniformidade das distribuições de concentrações de sedimentos em suspensão ao longo das verticais.

O método de Deines (1999) foi aplicado aos dados coletados nos rios Piquiri e Ivaí. A conversão da intensidade do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão foi feita considerando como referência as concentrações medidas com amostrador mecânico. Foram considerados dois níveis de referência: um próximo ao fundo do rio a 0,60 m do leito e outro próximo à meia profundidade do escoamento.

Foram obtidos resultados satisfatórios para ambos os rios estudados. Considerando o nível de referência próximo ao fundo, 78% dos valores estimados resultaram dentro do fator 2 (faixa que corresponde ao dobro e à metade da concentração esperada), ao passo que, considerando o nível de referência a meia profundidade, 86% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2. A Figura 1 mostra a comparação entre as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas pela amostragem acústica, considerando o nível de referência próximo à meia profundidade, e as concentrações medidas simultaneamente com amostrador mecânico. As linhas paralelas indicadas nos gráficos correspondem ao fator 2.

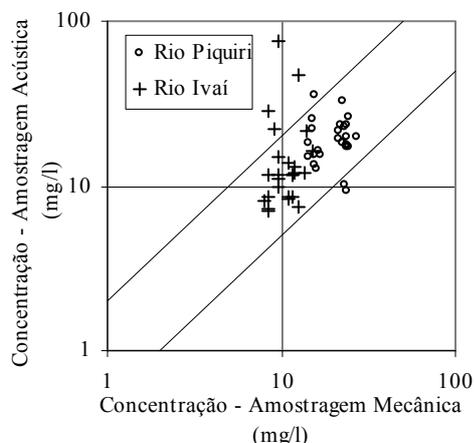


Figura 1. Resultados obtidos com (4), considerando o nível de referência próximo à meia profundidade.

Aplicando (5) com coeficiente  $K_M$  igual a 0,45, os resultados da amostragem acústica foram significativamente melhores, considerando que 96% das concentrações resultaram dentro do fator 2, independentemente do nível de referência considerado, conforme mostrado na Figura 2.

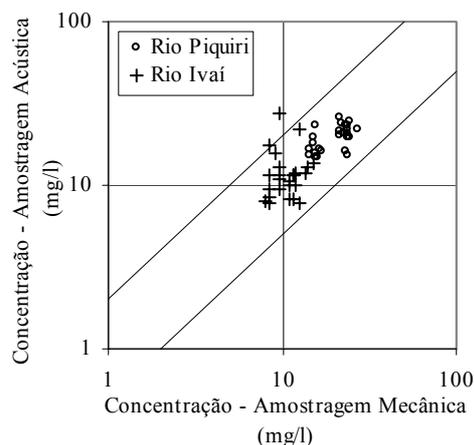


Figura 2. Resultados obtidos aplicando (5) com  $K_M$  igual a 0,45 – nível de referência próximo à meia profundidade.

Até o presente momento, o método de conversão foi aplicado para estimar as concentrações de sedimentos em suspensão ao longo da vertical, considerando uma concentração de referência medida na mesma vertical. No presente estudo foi verificada a aplicação para estimar as concentrações de sedimentos em suspensão em cinco verticais amostradas da seção transversal dos rios Piquiri e Ivaí, usando como referência a concentração de sedimentos medida em um único ponto da seção. Foi aplicada (5) com o coeficiente  $K_M$  igual 0,45, considerando o nível de referência próximo à meia profundidade. Os resultados obtidos foram tão bons quanto os observados nas aplicações convencionais, mostrados na Figura 2. Observa-se na Figura 3 que, neste caso, todas as concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2.

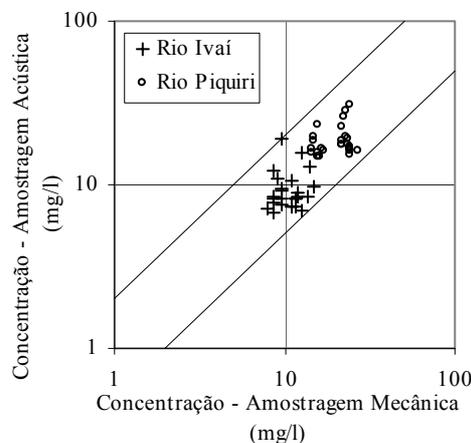


Figura 3. Comparação entre concentrações estimadas por amostragem acústica e concentrações obtidas por amostragem mecânica

É importante considerar que os resultados apresentados na Figura 3 foram obtidos para condições com granulometria dos sedimentos relativamente uniforme ao longo de toda seção transversal dos rios.

A referência [4] descreve em mais detalhes o estudo nos rios Piquiri e Ivaí.

#### B. Sedimentos Medidos no Mar do Norte da Alemanha

As amostragens foram realizadas nos canais Suedrepiep e Piep, localizados na costa da Alemanha, nos quais as condições de escoamento são dominadas principalmente por efeitos de marés.

Foram medidos perfis verticais de concentrações de sedimentos em suspensão com amostrador óptico (transmissômetro), simultaneamente com medições de sinais acústicos registrados com um ADCP modelo 1.200 kHz.

As condições de escoamento apresentaram velocidades entre 0,1 m/s e 0,9 m/s e as profundidades variaram de 4 m a 20 m. Os sedimentos em suspensão apresentaram diâmetros entre 5  $\mu\text{m}$  e 90  $\mu\text{m}$ .

As concentrações de sedimentos em suspensão apresentaram valores entre 60 mg/l e 750 mg/l. Os perfis verticais de concentrações apresentaram distribuições uniformes e não uniformes, sendo que em alguns casos apresentaram variação superior a 250 mg/l ao longo da vertical.

Aplicando (4) e considerando o nível de referência próximo ao fundo 88% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, e considerando o nível de referência próximo à meia profundidade 94% das estimativas resultaram dentro do fator 2, conforme indicado na Figura 4.

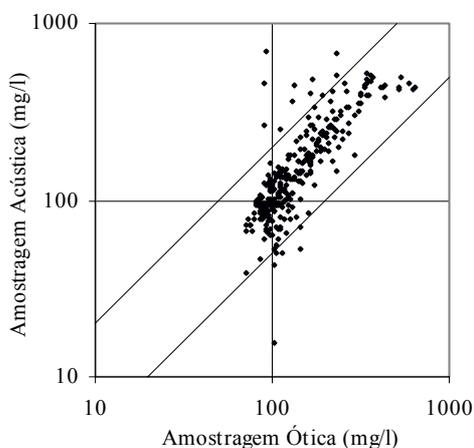


Figura 4. Resultados obtidos aplicando (4), considerando o nível de referência próximo à meia profundidade.

Analogamente aos resultados obtidos nos rios Piquiri e Ivaí, a aplicação de (5) com  $K_M$  igual a 0,45 conduziu a resultados melhores. Considerando o nível de referência próximo ao fundo 95% das concentrações estimadas pela amostragem acústica resultaram dentro do fator 2, ao passo que, com o nível de referência próximo à meia profundidade 98% dos valores estimados resultaram dentro do fator 2, conforme mostrado na Figura 5.

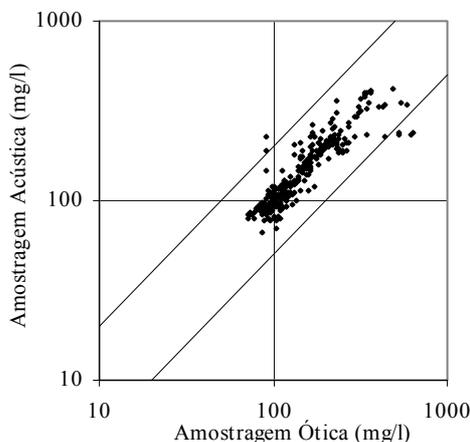


Figura 5. Resultados obtidos aplicando (5) com  $K_M$  igual a 0,45 – nível de referência próximo à meia profundidade.

#### IV. CONCLUSÕES

Este estudo está ainda em desenvolvimento, mas os resultados obtidos até o presente momento permitem tecer algumas conclusões.

Embora os sedimentos encontrados nos rios Piquiri e Ivaí tenham apresentado diâmetros bem abaixo do tamanho recomendado em [1] para aplicação da amostragem acústica, os resultados obtidos no presente estudo confirmaram a eficiência da amostragem acústica e do método de conversão para a determinação das concentrações de sedimentos em suspensão.

Foram conseguidos resultados consideravelmente melhores adotando-se  $K_M$  igual a 0,45 em (5).

Os perfis de concentração de sedimentos em suspensão resultantes apresentaram boa concordância com os perfis medidos pelas amostragens mecânica e óptica.

Os resultados obtidos revelaram que no caso de distribuições uniformes de concentrações a eficiência do método de conversão não depende do nível de referência considerado. Porém, no caso de distribuições não uniformes observou-se uma melhora nos resultados com o nível de referência considerado próximo à meia profundidade.

Considerando razoável aceitar a hipótese de que a distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão não varia muito ao longo da seção transversal de rios de médio porte, conclui-se, a partir dos resultados apresentados na Figura 3, que o ADCP pode ser utilizado para determinar o transporte de sedimentos em suspensão, considerando como referência somente uma concentração, medida com outro equipamento (amostrador óptico ou mecânico), o que torna bastante prático esse trabalho de medição.

#### V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio dado pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL e ao Programa de P&D, ciclo 2001/2002.

#### VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. C. Van Rijn, "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas". Amsterdam: Aqua Publications, 1983.
- [2] L. R. Gordon, "Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of operation, a practical primer. 2<sup>nd</sup> edition for broadband ADCPs". RD Instruments, San Diego, USA, 1996.
- [3] L. K. Deines, "Backscatter estimation using broadband Acoustic Doppler Current Profilers". In: S. P. Anderson, E. A. Terry, J. A. R. White, A. J. William, (Ed.). Working Conference on Current Measurement, 6, 1999, San Diego. Proceedings, San Diego, 1999. p. 249-253.
- [4] F. R. Terabe, "Estudo sobre o uso do perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) para medição do transporte de sólido em suspensão". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.