

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DO *ACOUSTIC DOPPLER PROFILER*  
(ADP) PARA A ESTIMATIVA DA  
CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM  
SUSPENSÃO (CSS) E TURBIDEZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Aline Schuck**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

**UTILIZAÇÃO DO *ACOUSTIC DOPPLER PROFILER* (ADP)  
PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE  
SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) E TURBIDEZ**

**Aline Schuck**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Daniela Guzzon Sanagiotto**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**UTILIZAÇÃO DO *ACOUSTIC DOPPLER PROFILER* (ADP) PARA  
A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM  
SUSPENSÃO (CSS) E TURBIDEZ**

elaborada por  
**Aline Schuck**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Daniela Guzzon Sanagiotto, Dra.**  
(Presidente/Orientadora)

**Nilza Maria dos Reis Castro, Dra. (UFRGS)**

**João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 08 de março de 2013.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schuck, Aline  
UTILIZAÇÃO DO ACOUSTIC DOPPLER PROFILER (ADP) PARA A  
ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO  
(CSS) E TURBIDEZ / Aline Schuck-2013.  
108 p.; 30cm

Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil, RS, 2013.

1. Hidrologia 2. Sedimentos 3. Acoustic Doppler  
Profiler I. Sanagiotto, Daniela Guzzon II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Á **DEUS** pela vida e graça concedida para alcançar mais este objetivo.

A **minha família** pelo amor incondicional dedicado em todos os momentos, a força prestada pela busca dos meus sonhos, ao apoio concedido em momentos.

Ao **Julio Cesar Rech** pelo companheirismo, carinho, ao apoio e paciência dedicada a diversos momentos em não pude estar presente.

A minha Professora e Orientadora **Daniela Guzzon Sanagiotto** por aceitar o desafio conjunto da elaboração desta pesquisa, a atenção prestada a todo o momento, o coleguismo, a dedicação, a confiança, a amizade, a paciência e o apoio.

Aos **Demais Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil**, pelo ensino, o apoio, a dedicação e incentivo a minha formação.

A **Marília Goulart** pela amizade, atenção e ajuda prestada em todos os momentos burocráticos até a conclusão do mestrado.

Aos caros “mestrandos auxiliares” **Letícia Grutka, Alencar Rizzardi, Fábio Beling e os demais mestrandos, Deise Michelotti, Marieli Medeiros, Róbson Ilha, Sara Ceron Hentges, César Fensterseifer, Catiane Pelissari, Mirian Lago Valente, Ronaldo Kanopf de Araújo** obrigada pelos ensinamentos, às alegrias compartilhadas que por fim possibilitaram uma bela amizade.

Aos bolsistas, **Luciane Calheiro, Cristiane Pacheco** e aos técnicos **Alcides Sartori, José Astério Rosa do Carmo** e o Grupo de pesquisa “**GHidros**” pelo auxílio nas atividades experimentais.

Á **CAPES, FINEP, Projeto MATASUL, MCT, CT Hidro e a UFSM** pelo apoio financeiro, estrutura física e bolsas concedidas para o desenvolvimento desta e demais pesquisas realizadas pelo Grupo Ghidros.

E a todos aqueles que eu possa ter esquecido que passaram pela minha vida, fica aqui meu **MUITO OBRIGADO!**

## EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for à posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### UTILIZAÇÃO DO ACOUSTIC DOPPLER PROFILER (ADP) PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) E TURBIDEZ

AUTORA: ALINE SCHUCK

ORIENTADORA: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 08 de março de 2013.

Os equipamentos chamados de ADCP/ADP (Acoustic Doppler Current Profiler/ Acoustic Doppler Profiler) estão sendo amplamente utilizados na hidrometria para determinação de vazões, devido à rapidez de manuseio e na obtenção de inúmeras informações das seções transversais analisadas, em comparação aos métodos convencionais. Esse medidor de corrente hidrostático tem o funcionamento semelhante ao sonar e busca medir a velocidade da correnteza da água em intervalo tempo e profundidade. Seu funcionamento é baseado no princípio do efeito Doppler, emitindo ondas sonoras na corrente d'água, sendo que uma parcela desses feixes é refletida de volta para a fonte emissora e outra parte é absorvida pelos sedimentos em suspensão na água e/ou direcionada a pontos distintos da fonte. Utilizando desta premissa, pesquisadores investigam se há a possibilidade de relacionar as informações de intensidade sonora obtidos com o uso de ADP com a concentração de sedimentos em suspensão, CSS, fato que possibilitaria a determinação da descarga sólida em cursos d'água. A fim de contribuir para a pesquisa do tema, neste estudo buscou-se investigar esta incógnita em duas etapas distintas. A primeira etapa consiste na montagem de um aparato experimental composto de um reservatório preenchido de água e munido de um sistema de recirculação. Nesse reservatório foram introduzidas diferentes misturas, areias e solos previamente classificados, permitindo reproduzir artificialmente CSS. Com o uso de um ADP foram relacionadas às diferentes concentrações de sedimentos com a intensidade do sinal de retorno medido. Na segunda etapa investigativa, realizada no rio Vacacaí-Mirim, cujas condições de escoamentos são naturais, buscou-se a verificação do uso do ADP como um método alternativo para a avaliação da turbidez, que pode ser associada com a CSS. Os resultados gerais das análises em laboratório indicam que há uma relação entre a CSS medida e o eco medido pelo ADP, extraído da média dos transdutores. Somente os resultados obtidos nos testes com areias, apresentaram baixas correlações e registros de ecos medidos inferiores à todas as amostragens realizadas. Ao aplicar as equações de ajustes para os ecos medidos resultante das amostragens de areias e solos, o ajuste linear apresentou 76% e o ajuste exponencial 67% das CSS calculadas na faixa restritiva do Fator 2, ou seja, as CSS calculadas não ultrapassam duas vezes o valor de CSS medida seja para mais ou menos, indicando a possibilidade de futuras avaliações das concentrações de sedimentos serem obtidas a partir do eco medido pelo ADP. Para as investigações de campo, relacionando o eco com a turbidez, os resultados são promissores, houve boa correlação entre os dados, com ajuste linear 96% e exponencial de 87% entre as faixas restritivas do Fator 2, apesar de poucas amostragens. Nesta etapa foram identificadas limitações referentes ao valor máximo medido de turbidez e este fato incentiva novas pesquisas sobre tema.

**Palavras-chave:** Hidrometria Aplicada, Bacia Hidrográfica, Transporte de Sedimentos.

## **ABSTRACT**

Master Course Dissertation  
Professional Graduation Program in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **UTILIZATION OF THE ACOUSTIC DOPPLER PROFILER (ADP) TO ESTIMATE SUSPENDED SEDIMENTS CONCENTRATION (SSC) AND TURBIDITY**

**AUTHOR: ALINE SCHUCK**

**ADVISOR: DANIELA GUZZON SANAGIOTTO**

**Defense Place and Date: Santa Maria, March 08<sup>th</sup> of 2013.**

The equipment called ADCP / ADP (Acoustic Doppler Current Profiler / Acoustic Doppler Profiler) are being widely used in hydrometric for determining flow rates, due to faster handling and obtaining information from numerous cross sections analyzed in comparison to conventional methods. This current meter hydrostatic operation is similar to the search sonar and measuring the velocity of the stream of water on time interval and depth. Its operation is based on the principle of the Doppler effect, emitting sound waves in the water stream and a portion of these beams is reflected back to the source station and another part is absorbed by suspended sediments in the water and / or directed to points distinct source. Using this assumption, researchers are investigating if there is a possibility of relating information of sonorous intensity obtained by using ADP with SSC, thus enabling the determination of the solid discharge into waterways. To contribute to the research of the topic, this study sought to investigate this unknown in two distinct stages. The first step consisted of setting up an experimental apparatus consisting of a tank filled with water and a recirculation system. Different mixes of previously classified sands and soils were introduced into the reservoir, allowing for an artificially produced SSC. By using an ADP, concentrations were related to the different sediments while the intensity of the return signal was measured. The second stage investigation was conducted in the Vacacaí-Mirim River, which has natural flow conditions. It was sought to verify the use of ADP for turbidity, an alternative method for replacement of SSC. The general results of the laboratory analysis indicate that there is a relationship between the measure and the CSS echo measured by ADP, extracted from the average of the transducers. Only the results for Groups 1 and 2 showed low correlations and records echoes measured below the all samples collected. By applying the equations for the echos of adjustments resulting from measured samples of all groups, the linear fit showed 76% and 67% exponential fit of CSS calculated in the range of restrictive Factor 2, indicating the possibility of further assessment of sediment concentrations were obtained from eco measured by ADP. For field investigations, relating the echo with the turbidity, the results are promising, there was good correlation between the data with linear fit and 96% exponential 87% between tracks restrictive Factor 2, although few samples. In this step were identified limitations regarding the maximum value measured turbidity and this fact encourages further research on the subject.

**Key-words:** Applied Hydrometry, Basin, Sediment Transport.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese dos Métodos de Medição de carga, conforme Carvalho (1994). .....	23
Tabela 2 - Fator e faixa de variação de $r$ conforme Terabe (2003): .....	44
Tabela 3 - Síntese do trabalho experimental realizado. ....	55
Tabela 4 - Características e faixas de aplicação do ADP, segundo Sontek (2009). .....	58
Tabela 5 - Descrição do amostrador de integração vertical, segundo Carvalho (1994). 58	
Tabela 6 - Descrição resumida das coletas no reservatório. ....	60
Tabela 7 - Composição Mineral dos Solos. ....	63
Tabela 8 - Identificação e distribuição das unidades de solo ocorrentes na bacia hidrográfica Vacacaí Mirim de acordo com ANZOLIN & MUTTI (1988) <i>apud</i> Grutka <i>et al.</i> (2012). ....	71
Tabela 9 - Resultados das medições para os Grupos 1 e 2. ....	76
Tabela 10 - Resultados das medições para os solos classificados. ....	79
Tabela 11 - Resultados das medições de turbidez e eco. ....	89

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição de sedimentos na vertical do fluxo de escoamento.....	21
Figura 2 - Perfis de velocidades e de concentrações em uma seção típica.....	21
Figura 3 - Trajetória de partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico. .	22
Figura 4 - Emissão de onda sonora do transdutor. ....	27
Figura 5 - Detalhamento do Efeito Doppler com/sem perdas de retorno acústico; (a) a dispersão do eco causada pelas partículas presentes na água; (b) recepção do eco medido; .....	28
Figura 6 - Transdutores do ADP. ....	29
Figura 7 - Transdutor de 30 kHz. ....	31
Figura 8 - O primeiro ADP de medição vertical utilizado no Brasil. ....	32
Figura 9 - Ilustrações de ADP utilizados na Itaipu: (A) ADP horizontal 500 kHz; (B) ADP vertical 600 kHz. ....	32
Figura 10 - Propagações dos feixes acústicos horizontais e verticais. ....	33
Figura 11 - Distúrbios em ADP.....	36
Figura 12 - Curva de Rayleigh. ....	38
Figura 13 - Perfil transversal (A) Mostra o perfil da seção de Óbidos fornecido pelo do ADP e a representação dos pontos de amostragens em cinco verticais; (B) A identificação das áreas com as maiores velocidades através das linhas tracejadas. ....	40
Figura 14 - Concentração de sedimentos e a intensidade acústica. ....	46
Figura 15 - Correlação entre sinal de retorno e Concentração medida. ....	47
Figura 16 - Efeito da granulometria sobre o sinal de turbidez para diferentes concentrações.....	50
Figura 17 - Relação CSS e Turbidez. ....	52
Figura 18 - Relação dos dados obtidos entre a turbidez e eco do ADV. ....	53
Figura 19 - Comparação entre a turbidez, o eco e a profundidade. ....	54
Figura 20 - Aparato experimental: (A) Esquema do reservatório e dimensões; (B) Reservatório com sistema de recirculação instalado. ....	56
Figura 21 - Visualização do ADP e transdutores. ....	57
Figura 22 - Amostrador AMS 1 e a obstrução adaptada no bico. ....	59
Figura 23- Organização das etapas para os diferentes grupos.....	61
Figura 24 - Curvas Granulométricas das Areias.....	62
Figura 25 - Gráfico das frações granulométricas dos solos.....	64
Figura 26 - Ilustrações das areias e solos utilizados como misturas no reservatório experimental. ....	65
Figura 27 - Reservatório com a localização das verticais para os testes experimentais (corte longitudinal): (a) verticais para os grupos 1 e 2; (b) verticais para os grupos 3 ao 7.....	66
Figura 28 – Transdutores do equipamento com numeração do nº 1 à 4, referindo-se os transdutores inclinados a 25° e o nº 5 ao feixe acústico vertical.....	68
Figura 29 - Ecos gravados pelo transdutor 4 durante as amostragens do Planossolo. .	68
Figura 30 - Localização da bacia hidrográfica Vacacaí- Mirim.....	69
Figura 31 - Estação fluviométrica e hidrossedimentométrica MD IV.....	70
Figura 32 - Travessia com ADP na estação MD IV, durante períodos de cheias. ....	72
Figura 33 - O ADP em funcionamento: (a) travessia na seção analisada; (b) emissão dos ecos inclinados. ....	72
Figura 34 - Localização da sonda do turbidímetro na estação MD IV.....	73

Figura 35 - Relação Eco x CSS para os Grupos 1 e 2: (a) médias dos quatro transdutores; (b) transdutor estrategicamente posicionado.....	77
Figura 36 - Relação eco medido x CSS para os Grupos 3 a 7 (a) médias dos quatro transdutores; (b) transdutor estrategicamente posicionado.....	81
Figura 37 - Curva de ajuste para os Grupos 1 a 7 (a) Equação linear; (b) Correlação entre CSS medida e calculada para os Fatores:1,5; 2,0 e 3,0. ....	85
Figura 38 - Curva de ajuste para os Grupos 1 a 7 (a) Equação exponencial; (b) Correlação entre CSS medida e calculada para os Fatores:1,5; 2,0 e 3,0..	87
Figura 39 - Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste linear (b) correlação dos dados obtidos de turbidez medida e calculada.....	91
Figura 40 - Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste exponencial (b) correlação dos dados obtidos de turbidez verdadeira e calculada. ....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADDMS</i>	Acoustic Doppler Discharge Measurement Systems
<i>ADP/ADCP</i>	Acoustic Doppler Profiler/ Acoustic Doppler Current Profiler
<i>ADV</i>	Acoustic Doppler Velocimeter
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>CCR</i>	Centro de Ciências Rurais
<i>CAPES</i>	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;
<i>CESP</i>	Companhia Energética de São Paulo
<i>CT</i>	Centro de Tecnologia
<i>DGPS</i>	Differential Global Positioning System
<i>DNAEE</i>	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
<i>EUA</i>	United State of America
<i>GHidros</i>	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HiBAM</i>	Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica
<i>IRD</i>	Institut de Recherche Pour Le Développement
<i>Lab MFH</i>	Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica
<i>LabSed</i>	Laboratório de Sedimentos
<i>MD IV</i>	Menino Deus IV
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<i>NTU</i>	Unidade Nefelométrica de Turbidez
<i>PACED</i>	Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler
<i>PCM</i>	Power and Communication Module
<i>PPGEC</i>	Programa de Pós Graduação Em Engenharia Civil
<i>RDI</i>	RD Instruments
<i>RTK</i>	Real Time Kinematic
<i>S5</i>	Modelo de ADP
<i>SL</i>	Nível da Fonte do Transdutor
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ration
<i>UFMS</i>	Universidade Federal de Santa Maria
<i>UHE</i>	Usina Hidroelétrica
<i>US-DH 48</i>	United State, Depth and Hand 1948
<i>USGS</i>	United States Geological Survey

## LISTA DE SÍMBOLO

<i>a</i>	Coefficiente angular
<i>b</i>	Coefficiente linear
<i>C</i>	Velocidade do som propagado
<i>C<sub>estimada</sub></i>	Concentração estimada pela amostragem acústica
<i>C<sub>medida</sub></i>	Concentração medida através de amostragens mecânicas ou ópticas
<i>C<sub>i</sub></i>	Concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número “i”
<i>cm</i>	Centímetros
<i>Cr</i>	Concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibragem
<i>CSS</i>	Concentração de Sedimentos em Suspensão
<i>cv</i>	Cavalo vapor
<i>D<sub>50</sub></i>	Diâmetro de 50% do que passa por peneiras
<i>dB</i>	Decibel
<i>E<sub>ci</sub></i>	Intensidade do eco correspondente à célula de número “i”
<i>E<sub>cr</sub></i>	Intensidade do eco correspondente ao nível de referência
<i>EL</i>	Nível de erro
<i>F</i>	Frequência
<i>h</i>	Hora
<i>ka</i>	Relação diâmetro da partícula e comprimento acústico
<i>kg</i>	Kilogramas
<i>kHz</i>	Quilohertz
<i>KM</i>	Coefficiente de ajustes de Mayerle & Poerbandono
<i>km</i>	Kilômetro
<i>km<sup>2</sup></i>	Kilômetro quadrado
<i>m</i>	Metros
<i>m<sup>3</sup>/s</i>	Metros cúbicos por segundo
<i>mg/L</i>	Miligrama por litro
<i>MHz</i>	Megahertz
<i>min</i>	Minuto
<i>mm</i>	Milímetro
<i>n</i>	Expoente (1/6)
<i>NTU</i>	Unidade Nefelométrica de Turbidez
<i>Q</i>	Vazão
<i>R<sup>2</sup></i>	Coefficiente de determinação
<i>r</i>	Fator restritivo
<i>rpm</i>	Rotações por minuto
<i>SL</i>	Nível da fonte do transdutor
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ration
<i>S<sub>v</sub></i>	Força volume de eco das partículas
<i>Tu</i>	Turbidez
<i>TL</i>	Perda de Transmissão
<i>T° C</i>	Temperatura - Celsius
<i>U</i>	velocidade à distância “x” do leito
<i>V</i>	Velocidade
<i>Z</i>	Distância ao leito

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Problema e relevância da pesquisa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivo geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 Objetivos específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Processos - erosão, transporte e depósitos dos sedimentos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Alguns equipamentos utilizados para medições de vazão .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 Funcionamento dos perfiladores acústicos - ADP.....</b>	<b>26</b>
2.3.1 Histórico de usos com ADP .....	30
2.3.2 Fatores de interferências nas amostragens acústicas.....	34
2.3.3 Curva de Rayleigh.....	37
2.3.4 Equações para estimar CSS a partir de informações acústicas .....	39
2.3.5 Estudos com aplicações acústicas .....	44
<b>2.4 Sondas de turbidez .....</b>	<b>48</b>
2.4.1 Estudos relacionando a CSS, a turbidez e o eco medido .....	51
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Estudos elaborados em laboratório .....</b>	<b>55</b>
3.1.1 Aparato experimental.....	56
3.1.2 Acoustic Doppler Profiler - ADP .....	56
3.1.3 Amostrador – coletor pontual .....	58
3.1.4 Procedimentos dos ensaios realizados em laboratório.....	59
3.1.5 Areias e solos classificados.....	62
3.1.6 Determinação da CSS .....	67
3.1.7 Arquivos do ADP:.....	67
<b>3.2 Estudos realizados em campo .....</b>	<b>68</b>
3.2.1 Bacia hidrográfica Vacacaí-Mirim.....	69
3.2.2 Acoustic Doppler Profiler – ADP .....	71
3.2.3 Sonda digital- turbidez .....	73
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1 Resultados das amostragens em laboratório .....</b>	<b>75</b>
4.1.1 Resultados das amostragens com areias e solo superficial - Grupos 1 e 2 ....	75
4.1.2 Resultados das amostragens com os solos classificados - Grupos 3 a 7.....	79
4.1.3 Equações de ajustes para as amostragens de CSS .....	84
<b>4.2 Resultados das amostragens em campo .....</b>	<b>88</b>
4.2.1 Dados de turbidez e ecos medidos .....	88
4.2.2 Equações de ajustes para as amostragens de turbidez.....	90
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>97</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Problema e relevância da pesquisa

Os estudos relacionados à sedimentologia tem se intensificado no Brasil nas últimas décadas devido aos problemas observados, principalmente nas regiões mais habitadas do Centro ao Sul do País (BELLINASSO, 2002). Isso se deve a interferência antrópica e natural, devido ao mau uso dos solos, originando diversos problemas, entre eles a erosão, com depósitos em locais indesejáveis e assoreamentos de rios, lagos e reservatórios (TEIXEIRA *et al.*, 2009; PEREIRA, 2010).

Conhecer a quantidade de sedimentos é de grande importância para gerenciamento de bacias hidrográficas e corpos d'água. Os corpos d'água apresentam sedimentos com uma imensa variabilidade granulométrica e na concentração, tanto ao longo da seção quanto ao longo do tempo.

Há vários métodos para a medição da descarga em suspensão, do leito ou total e estes são classificados em indiretos. Neste contexto, os pesquisadores buscam alternativas para a quantificação dos sedimentos transportados, para que o processo seja mais ágil, mais preciso e também barato.

Os equipamentos chamados comumente de ADCP/ADP (*Acoustic Doppler Current Profiler/ Acoustic Doppler Profile*), ou simplesmente de Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (PACED) são mundialmente conhecidos no meio hidrológico. Utilizados para medir as velocidades das partículas presentes nas correntes de água em diferentes profundidades, permitem determinar as áreas das seções transversais de rios, através do somatório dos perfis de corrente obtidos em tempo real, resultando nas vazões escoadas (GAMARO, 2006).

Originalmente, esses instrumentos foram desenvolvidos para medir correntes marítimas e a partir da década de 80, têm sido adaptados com sucesso, para medir vazões em cursos de água, especialmente em estuários e em grandes rios (CARVALHO, 2007; DORNELLES, 2009), com processamento automático dos dados.

O aparecimento dos medidores acústicos Doppler, possibilitou a medição de vazão em uma única travessia na seção do rio, através do registro contínuo do perfil da seção e das velocidades do escoamento. Como este equipamento avalia a velocidade de

deslocamento das partículas presentes na água, através do efeito Doppler, criaram-se expectativas de que este aparelho pudesse fazer o mesmo com a medição de sedimentos, ao transformar o retorno do eco em uma leitura de sedimentos de forma quantitativa (BENSI, 2006; GAMARO, 2008; DORNELLES, 2009).

Segundo Kostaschuk *et al.* (2004) e Dornelles (2009), embora seu uso em campo esteja em desenvolvimento e as informações disponíveis sejam escassas, esses equipamentos podem ser utilizados para a determinação da concentração de sedimentos, e a partir da análise da intensidade do seu retorno acústico, o eco medido ou também chamado de “*backscattering*” fornecido pelo ADP.

Segundo Dornelles (2009) o ADP poderia conduzir a obtenção das descargas líquidas e sólidas praticamente ao mesmo tempo, uma vez que as informações dos ecos de retorno gravados no equipamento após cada medição de vazão poderiam ser relacionadas a uma medição de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) executada antes ou depois da descarga líquida.

Para Kostaschuk *et al.* (2004) o ADP oferece vantagens em relação às técnicas convencionais de avaliação de sedimentos, pela facilidade de movimentação do equipamento, velocidade e medições de transporte de sedimentos, obtenção de perfis de velocidade tridimensional e de sedimentos suspensos, além da capacidade de mapear fluxos inteiros das fontes hídricas.

A utilização dos equipamentos acústicos pode proporcionar a redução dos custos de levantamentos de dados em campo, em termos de transporte de sedimentos, o método é rápido e possibilita uma grande redução no número de amostras de água coletada, permitindo a obtenção de maior quantidade de dados com resolução temporal e espacial. Esses equipamentos, no entanto, necessitam de mão de obra especializada, com hidrometristas treinados para realizarem as medições.

Durante as medições é necessário serem estabelecidos alguns cuidados essenciais, como a realização adequada da calibração do equipamento, a verificação das limitações dos aparelhos, evitando assim medições errôneas e conseqüentemente perdas de dados importantes (GAMARO, 2008). Outro cuidado essencial refere-se às aplicações de fórmulas empíricas para relacionar o CSS e informações acústicas. Algumas fórmulas foram criadas, mas por serem equações empíricas tem o seu uso limitado a condições muito particulares, que não podem ser extrapoladas para locais com características divergentes, sem a devida justificativa.

Para a quantificação dos sedimentos suspensos transportados ao longo dos cursos d'água são utilizadas metodologias convencionais que requerem uma grande demanda da mão de obra, durante a realização das coletas amostrais de água e sedimento. A utilização do ADP como uma possível substituição para as metodologias tradicionais torna-se uma medição rápida e prática para obtenção de informações precisas e descritivas.

Outra possível substituição evidenciada nos últimos anos para as coletas de sedimentos em suspensão refere-se à turbidez, obtidas através dos equipamentos ópticos, como os turbidímetros. Esses equipamentos calibrados em laboratório e campo possibilitam ampliar a quantidade de dados medidos, com relativa facilidade em relação aos amostradores mecânicos principalmente em períodos de cheias, onde ocorrem os maiores fluxos de transportes de sedimentos (MERTEN *et al.*, 2012).

A avaliação da turbidez da água em escoamento é um dos métodos indiretos para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão. O turbidímetro faz a determinação quantitativa da turbidez, que pode ser correlacionada com a concentração do material em suspensão (GUIMARÃES, 2010; DALBIANCO *et al.*, 2012). Essa possível relação de turbidez com a CSS permite que se investigue a correlação também entre os dados acústicos obtidos pelo ADP com a turbidez.

Assim, este trabalho apresentará duas fases distintas visando contribuir com informações necessárias para a compreensão da dinâmica do uso do ADP. A primeira etapa realizada em laboratório correlaciona o eco medido e a CSS para areias e solos de diferentes concentrações minerais. A segunda etapa visa à correlação do eco medido e a turbidez, fundamentando assim, a base para pesquisas futuras sobre as aplicações dessas metodologias nos cursos d'água com as características semelhantes aos testes de CSS e/ou que possuam instaladas sondas para registros de turbidez.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a utilização de um perfilador acústico por efeito Doppler para a quantificação de sedimentos em suspensão em um reservatório experimental, através da conversão do sinal acústico e os resultados da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) realizados por metodologias

tradicionais. Também se busca comparar os resultados de medições com o perfilador acústico com os registros de um turbidímetro, instalado nas proximidades de uma cabeceira de rio.

### **1.3 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, alguns objetivos específicos são definidos, dividindo em duas etapas:

Objetivos específicos relacionados às atividades desenvolvidas em laboratório:

- Montar um aparato experimental para permitir a homogeneização de diferentes misturas, incluindo areias e solos classificados;
- Realizar medições simultaneamente com amostrador pontual e o ADP, para obtenção de dados de concentração de sedimentos e dados acústicos;
- Após obtenção de CSS e eco medido, verificar se há correlação entre esses dados.

Objetivos específicos relacionados às atividades desenvolvidas em campo:

- Buscar relacionar o eco medido pelo ADP com a turbidez medida por uma sonda, para um mesmo período.

## **2. REVISÃO BIBLIGRÁFICA**

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão da literatura englobando assuntos importantes relacionados ao trabalho desenvolvido nessa dissertação. São relatadas informações sobre os processos erosivos, alguns métodos utilizados para a determinação da concentração de sedimentos transportados em suspensão pelos rios, medidores de vazão e a apresentação dos conceitos pertinentes ao método utilizado na elaboração deste trabalho, com enfoque nas avaliações utilizando velocímetros e perfiladores que trabalham por efeito Doppler.

### **2.1 Processos - erosão, transporte e depósitos dos sedimentos**

O estudo e a compreensão dos fatores que integram o processo de erosão do solo e a quantificação das perdas de solo são de grande importância, pois servem como ponto de partida para elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis, para que se possam evitar os efeitos negativos decorrentes da produção, transporte e deposição de sedimentos (BRANCO, 1998).

Iniciando este contexto, verifica-se que após os eventos das precipitações, uma parcela deverá infiltrar no solo repondo as reservas de água subterrânea, outra parcial retorna à atmosfera por efeito da evaporação e transpiração, e o excesso escoar pela superfície. Esse escoamento superficial opera tanto na forma de finos filetes ou riachos trançados, cuja espessa rede de ramificações cobre as encostas, quanto em forma de caudalosas correntes e torrentes encaixadas pelas ravinas, voçorocas e vale fluviais, ocorrendo inicialmente à erosão laminar, a erosão em sulco, ravinas ou voçorocas (MACIEL FILHO, 1997).

Em áreas desprovidas de vegetação, como as lavouras em início de plantação, estradas, escavações não recobertas, entre outros, intensificam-se os diversos condicionantes dos processos erosivos como o clima, relevo, cobertura vegetal, ação antrópica e a natureza do solo (MACIEL FILHO, 1997). Todos esses fenômenos que envolvem a produção do sedimento são processos naturais que sempre ocorreram através dos tempos geológicos, sendo responsáveis pela forma atual da superfície da

Terra. Muitos dos fenômenos podem ser mesmo visualizados, ou presenciados, mas são muitos complexos (PAIVA, 2003; PEREIRA, 2010). O deslocamento e o transporte do sedimento dependem da forma, tamanho, peso da partícula e das forças exercidas pela ação do deslocamento, também pode ser transitório ou permanente, como assoreamento.

O excesso ou falta de descarga sólida num rio provoca alterações diversas. Um fluxo de água com certa vazão tem a capacidade de transportar uma quantidade máxima de material sólido, que é conhecido como valor de saturação. Esse valor depende de algumas variáveis como: vazão, declividade do rio, granulometria e peso específico do sedimento. Caso a quantidade de material seja maior que o valor de saturação haverá formação de depósito (CARVALHO, 2008).

Há uma relação direta entre a forma do canal e o tipo de sedimento trabalhando por esse rio. Os sedimentos finos tendem a produzir canais profundos e estreitos, porém sedimentos grosseiros resultam em canais largos e rasos. Os canais anastomosados<sup>1</sup>, muito rasos e largos com ilhas temporárias, representam os casos extremos, resultantes da carga quase exclusiva de seixos e de cascalhos (MACIEL FILHO, 1997).

Em um canal reto a seção é simétrica e a maior velocidade encontra-se no meio da superfície e próxima a ela. Neste caso, durante uma enchente, a erosão se processa de maneira uniforme nos limites dessa seção e, após a cheia, haverá deposição em toda a seção. Contudo, um canal em curva, como meandros, a seção é assimétrica e a maior velocidade da água encontra-se próxima à margem côncava e à superfície. Neste caso, durante uma enchente, haverá maior erosão na margem côncava e, ao diminuir a vazão, deposição na margem convexa. Assim, o canal fluvial migra. Os canais curvos são os mais comuns; os retos são quase exceção (MACIEL FILHO, 1997). Para cada composição mineral, ocorre uma tendência para deposição no perfil dos rios, assim como é explicado na figura 1, abaixo.

---

<sup>1</sup> Excesso de cargas de sedimentos.

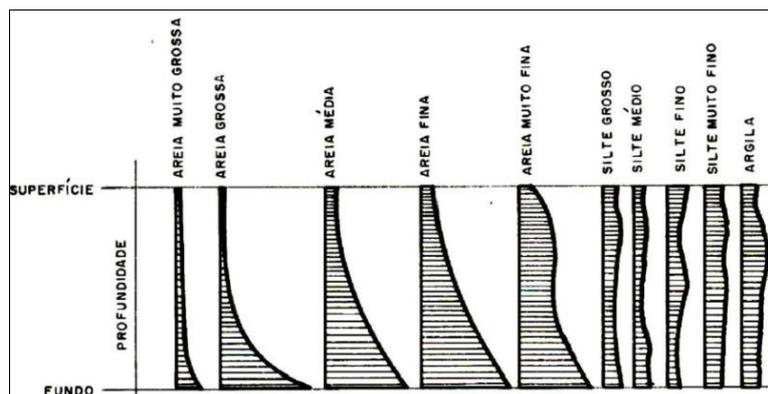


Figura 1 - Distribuição de sedimentos na vertical do fluxo de escoamento.

Fonte: CARVALHO (2008).

As partículas dos sedimentos sujeitas às ações da velocidade da corrente, e do seu peso variam de distribuição, apresentando um mínimo na superfície e um máximo perto do leito, para uma granulometria variada. As partículas mais grossas do sedimento em suspensão, geralmente areias, apresentam uma variação crescente da superfície da lâmina líquida para o leito. As partículas finas como siltes e argilas, têm uma distribuição aproximadamente uniforme na vertical (CARVALHO, 2008).

O perfil transversal do rio, normalmente apresenta os maiores fluxos de sedimentos e velocidade na região central do canal de escoamento assim, a figura 2, apresenta a junção destas duas informações importantes.

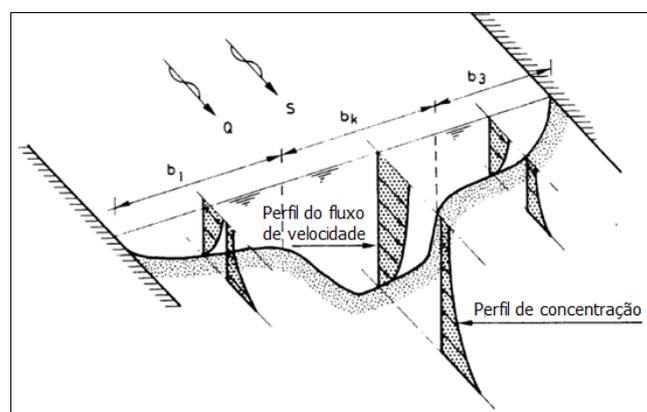


Figura 2 - Perfis de velocidades e de concentrações em uma seção típica.

Fonte: Adaptado de VAN RIJN (1993).

Conforme descrito por Carvalho (1994), os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrerão um processo de transporte variado de acordo com as condições locais do escoamento. As forças que atuarão sobre a partícula podem mantê-la em suspensão ou no fundo do rio, saltando do leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito. Essa situação é função do tamanho da partícula, do peso e forma. É também função da forma do escoamento, se laminar ou turbulento, da velocidade da corrente, dos obstáculos no leito e de diversas outras funções que estão inter-relacionadas, como declividade do leito, forma do canal, temperatura da água e outras (CASAGRANDE, 2004).

A erosão e o depósito dos sedimentos são os processos que mais se sobressaem pela maior importância de suas ocorrências e por seu papel-chave na redistribuição dos sedimentos dentro de uma bacia hidrográfica (MARCONDES, 2011). Na figura 3, apresenta a trajetória de partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico em um rio.

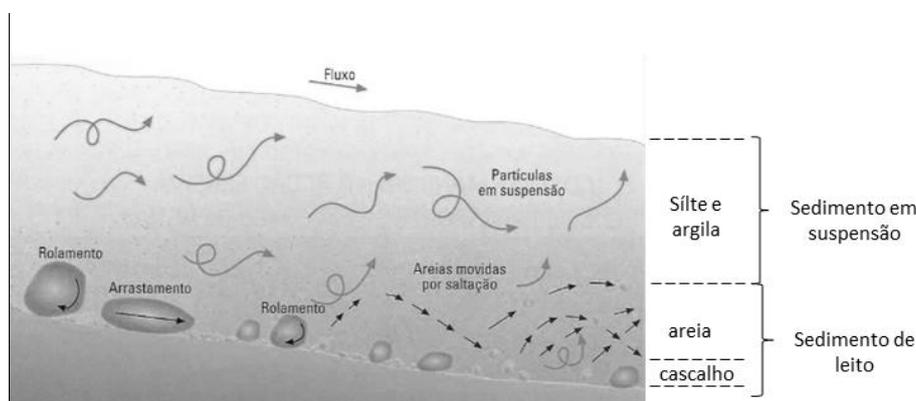


Figura 3 - Trajetória de partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico.

Fonte: MARCONDES (2011).

Os sedimentos transportados em rios podem ser divididos em três regiões distintas nas seções dos rios, dependendo do tamanho das partículas e da capacidade de transporte na corrente. O rolamento de sedimentos sobre a superfície do leito pode ser chamada de **carga sólida arraste**; a elevação para dentro do escoamento e posterior retorno à superfície do leito de **carga sólida saltante**; e a suspensão e suporte pelo

fluido envolvente durante todo o transporte, a **carga sólida suspensão**, segundo Carvalho (1994).

A concentração de sedimentos em suspensão (CSS) é um dos principais fatores para a determinação da taxa de deposição e do fluxo de massa na dinâmica dos sedimentos e a sua estimativa é essencial para o entendimento do comportamento dos sedimentos na coluna d'água e a previsão do seu transporte (XAVIER *et al.*, 2012). Segundo Scapin (2005) existem métodos que estimam apenas a carga de sedimentos de fundo, outros, a carga em suspensão, obtendo-se pela soma, a descarga total de sedimentos do rio. Alguns métodos são usados para estimar a quantidade de sedimentos transportada de maneira indireta, isto é, fazem uso de parâmetros hidráulicos da corrente na seção do rio considerada para estas medições e levam em conta também, as características do material amostrado no leito do rio.

O avanço tecnológico tem permitido o projeto de novos equipamentos tanto para medidas diretas quanto indiretas. Os equipamentos e metodologias citados na tabela 1 foram desenvolvidos para atendimento a diversas condições de trabalho no campo, incluindo tanto variações de concentrações quanto de granulometria do material.

Tabela 1 - Síntese dos Métodos de Medição de carga, conforme Carvalho (1994).

<b>Descarga sólida</b>	<b>Medição</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamentos ou metodologia de medida</b>
<b>Descarga sólida em suspensão</b>	<b>Direta</b>	Medições diretas no curso d'água da concentração ou outra grandeza como a turbidez ou ultra-som.	Medidor nuclear (portátil ou fixo); Ultra-sônico-ótico; Ultra-sônico Doppler de dispersão; Turbidímetro; ADP (Doppler).
		Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada).	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta).
	<b>Indireta</b>	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida.	Equipamentos de bombeamento, que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos pontuais por integração e integradores na vertical.
		Fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios.	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas.

<b>Descarga sólida</b>	<b>Medição</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamentos ou metodologia de medida</b>
	<b>Direta</b>	Amostradores/medidores portáteis de três tipos principais (a amostra é coletada em diversos pontos da seção transversal, determinada o seu peso seco, a granulometria e calculada a descarga de arrasto); o medidor fica apoiado no leito entre 2 min. a 2 horas de tal forma a receber no receptor 30% a 50% de sua capacidade.	Cesta ou caixa – medidores Muhlhofer, Ehrenberger, da Autoridade Suíça e outros; Bandeja ou tanque – medidores Losiebsky, Polyakov, SRIH e outros; Diferença de pressão – medidores Helly-Smith, Arnhem, Sphinx, do USCE, Károlyi, do PRI, Yangtze, Yangtze-78 VUV e outros.
		Estruturas tipo fenda ou poço – as fendas do leito do rio são abertas por instantes e coletadas o sedimento.	Medidor Mulhofer (EUA).
<b>Descarga sólida de arrasto</b>		Coleta de material do leito, análise granulométrica, declividade, da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga de arrasto e de material do leito por fórmulas (de Ackers e White, Colby, Einstein, Engelund e Hansen, Kalinske, Laursen, Meyer-Peter e Muller, Rottner, Schoklitsch, Toffaleti, Yang e outras).	Tipos de equipamento: 1) de penetração horizontal, tipos caçamba de dragagem e de concha; 2) de penetração vertical, tipos de tubo vertical, caçamba de raspagem, caçamba de escavação e escavação de pedregulho; 3) tipo piston-core que retém a amostra por vácuo parcial.
		Deslocamento de dunas – por medida do volume da duna que se desloca com uso de ecobatímetro de alta resolução.	Levantamentos batimétricos seguidamente ao longo da seção transversal; ao longo de seções longitudinais.
	<b>Indireta</b>	1) Traçadores radioativos; ou de diluição, sendo ambos os métodos com a colocação do traçador no sedimento e seu acompanhamento com equipamento apropriado (deve ser escolhido de tal forma a não poluir o meio ambiente).	Métodos: 1) por colocação direta do traçador no sedimento do leito do rio; 2) por coleta do sedimento, colocação do traçador no sedimento e seu retorno ao leito.
		Propriedades litológicas – uso das características mineralógicas dos sedimentos.	Coleta do sedimento do leito de afluentes, curso principal, determinação das características mineralógicas dos sedimentos e comparação por uso de equações adequadas a partir das quantidades dos componentes existentes nas amostras.
		Método acústico – utilizado para pedras que se chocam no medidor.	Pouco eficiente.
		Método fotográfico, de amostragem – utilizada para pedras.	Fotos de pedras submersas e pedras de leitos secos.
<b>Descarga sólida</b>	<b>Direta</b>	Uso de estruturas tipo blocos, no leito, para provocar turbulência e todo o sedimento ficar em	Faz-se a amostragem do sedimento e calcula-se como descarga em suspensão.

<b>Descarga sólida</b>	<b>Medição</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamentos ou metodologia de medida</b>
<b>total</b>		suspensão.	
		Levantamento topo-batimétrico de reservatório, determinação do volume dos depósitos e da eficiência de retenção de sedimentos no lago.	Para pequenos reservatórios permite o cálculo do sedimento do leito e grandes reservatórios permitem o cálculo do sedimento total.
	<b>Indireta</b>	Coleta de material em suspensão e leito, análise de concentração, granulométrica, medida da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga total – método modificado de Einstein; simplificado de Colby.	Diversos tipos de equipamentos – de bombeamento; garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos ou integração; integradores na vertical.

## 2.2 Alguns equipamentos utilizados para medições de vazão

As medições de vazão podem ser consideradas: estáticas, dinâmicas e pontuais. Os medidores de vazões são dispositivos que permitem de forma indireta determinar o volume de fluido que passa através de uma dada seção de escoamento por unidade de tempo. Existem inúmeros métodos, sejam eles simples ou rudimentares até os mais complexos, no entanto, será destacada a utilização de molinetes hidrométricos e os equipamentos com o princípio de funcionamento do efeito *Doppler: Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) e Acoustic Doppler Profiler (ADP)*.

Os molinetes hidrométricos possuem uso mais difundido, devido ao baixo custo de aquisição e à facilidade de operação. A realização das medições com estes equipamentos consiste em traçar a área da seção transversal e determinar a velocidade média do fluxo nessa seção. Medindo a largura do canal e a profundidade em diversos pontos, formando várias verticais de profundidade no decorrer da seção, obtém-se a área da seção transversal (AMORIM JUNIOR & ROCHA, 2012).

Em cada vertical de profundidade medida determinam-se pontos para medição das velocidades. A velocidade média em cada vertical pode ser então determinada por métodos analíticos e posteriormente gerar a vazão da seção analisada (GRISON *et al.*, 2008; RIOS *et al.*, 2011).

O ADV é um instrumento com um sensor acústico de forma intrusiva na água que realiza coletas de dados de velocidade no local inserido instantaneamente. O funcionamento ocorre da seguinte forma, um sensor emite o eco para a água no sentido horizontal, atingindo as partículas presentes que irão refletir e parte deste eco será captado por outro sensor, diferentemente dos medidores chamados de ADP que tem o eco captado pelos mesmos sensores e o sentido de emissão do eco é vertical (RIOS *et al.*, 2011; AMORIM JUNIOR & ROCHA, 2012). Assim o ADV poderá ser colocado em vários pontos em uma vertical, realizando medições semelhantes a do molinete hidrométrico.

Os equipamentos regidos pelo funcionamento do efeito Doppler (ADP) são sonares ativos, normalmente mono-estáticos (transmissor e receptor no mesmo ponto), que utilizam a energia acústica em um feixe estreito, e o efeito Doppler, para determinar a velocidade das correntes em diversas camadas (CARVALHO, 1999). Os molinetes hidrométricos sofrem influências dos vetores de velocidades (x, y e z), e neste caso o ADP realiza medições sem qualquer influência (AMORIM JUNIOR & ROCHA, 2012).

Os equipamentos Doppler são instrumentos primordialmente usados para medirem a velocidade destas partículas, mas eles também podem prover informações sobre a quantidade e o tipo de partículas que estão dando origem a esse sinal. Estas informações são medidas na forma de intensidade de reflexões recebidas e são gravadas como variações do padrão presente no instrumento gerador de arquivo de dados.

### **2.3 Funcionamento dos perfiladores acústicos - ADP**

O princípio Doppler foi descoberto pelo austríaco Christian Johann Doppler no ano de 1842 e relaciona a mudança na frequência de uma fonte em relação à velocidade da fonte e o observador. O som transmitido pelo ADP é o ultra-sônico, com frequência bem acima da capacidade de audição humana (frequências de 40 Hz a 24 kHz). As frequências destes perfiladores, comercializados pela organização científica USGS<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> A USGS é uma organização científica dos Estados Unidos (EUA) que fornece informações dos riscos naturais dos impactos do clima e do uso da terra, mudança e os sistemas centrais de ciências que ajudam a nos fornecer informação relevante e útil (disponível em <http://www.usgs.gov>).

(*United States Geological Survey*) para medições ribeirinhas estão entre 300-3000 kHz (Simpson, 2001).

Os perfiladores acústicos, no caso do ADP têm um sinal sonoro emitido pelo aparelho e refletido pelas partículas em suspensão que existem na água, movimentadas pela corrente, que permitem medir a velocidade existente, e gerar um somatório de verticais, formando o perfil transversal da seção. A diferença entre a frequência do sinal refletido por esses alvos em movimento é proporcional à velocidade dos alvos e, portanto a velocidade da própria corrente (KOSTASCHUK *et al.*, 2005; BENSI, 2006).

ADP é constituído por sensores (transdutores) que assumem as funções de emissor (fonte) e receptor de pulsos sonoros. Ao emitir uma onda sonora, os pulsos acústicos percorrem a coluna d'água, formando feixes sonoros. As partículas de sedimentos transportadas pela corrente de água, sujeitas aos feixes sonoros, refletem os pulsos que retornam para o instrumento (DORNELLES, 2009).

O equipamento recebe e registra essa frequência modificada pelo movimento das partículas, chamado de eco, retroespalhamento ou ainda *backscatters*. Na figura 4, na ilustração adaptada de Simpson (2001), é possível identificar o processo de emissão das ondas do transdutor e a visão ampliada do *backscatters*.

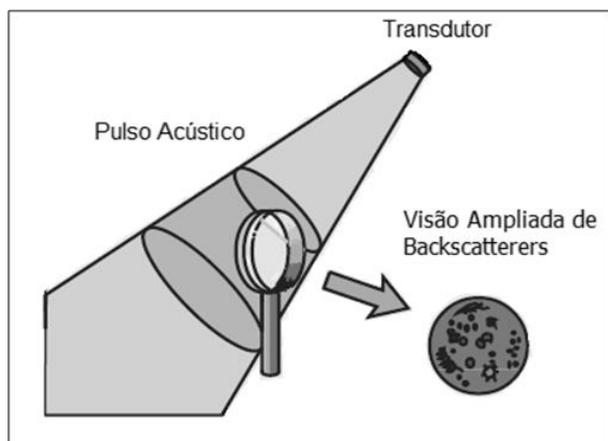


Figura 4 - Emissão de onda sonora do transdutor.

Fonte: Adaptados de SIMPSONS (2001).

O retorno acústico das frequências refletidas pelas partículas para transdutor é considerada baixa, a maior parte é absorvida e refletida em outras direções. Na figura 5-

a, a imagem mostra o espalhamento da frequência e o retorno acústico para o registro no transdutor, já na figura 5-b é mostrada uma descrição do Efeito Doppler, sem as perdas de frequências. Apenas parte do eco refletido é registrada pelo instrumento. Como o Efeito Doppler mede a velocidade radial, somente uma componente da velocidade da água é utilizada.

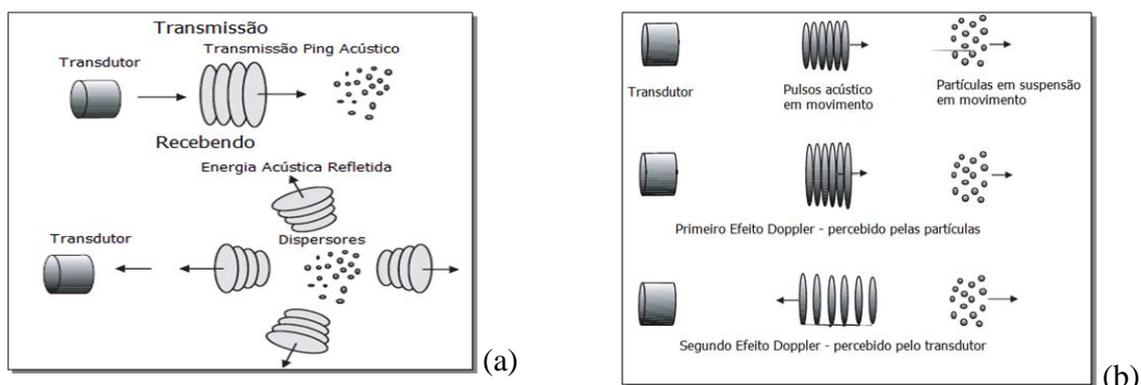


Figura 5 - Detalhamento do Efeito Doppler com/sem perdas de retorno acústico; (a) a dispersão do eco causada pelas partículas presentes na água; (b) recepção do eco medido;

Fonte: Adaptado de SIMPSONS, 2001.

O efeito Doppler é, portanto, baseado na diferença de frequência entre o sinal acústico emitido por um sensor e a frequência do mesmo, refletido por um objeto em movimento, conforme a equação 1 (BENSI, 2006):

$$F_{\text{Doppler}} = -2 F_{\text{emitido}} \left( \frac{V}{C} \right) \quad (1)$$

Onde:

F= frequência;

V= diferença de velocidade entre sensor e objeto;

C= velocidade do som no meio de propagação.

O deslocamento Doppler só funciona quando as fontes sonoras e receptoras se aproximam ou se afastam um do outro, formando assim o movimento radial. Por outro

lado, o movimento angular altera a direção entre a fonte e receptor, mas não a distância radial (RD *Instruments*, 1996).

Os ADP comercializados utilizam a transmissão de feixes de som da coluna d'água através de 3 a 8 transdutores, com saídas de frequências independentes, com diferentes larguras, usualmente de 2,5 graus, inclinados em 20 ou 30 graus de vertical (DORNELLES, 2009; GAMARO, 2011). A figura 6 ilustra um ADP com três transdutores e a inclinação de 25°.

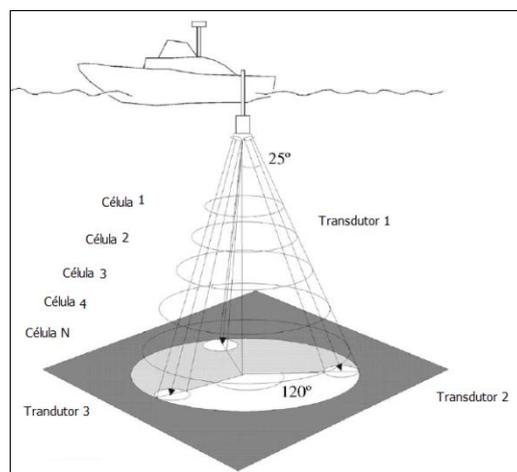


Figura 6 - Transdutores do ADP.

Fonte: Adaptado de KOSTASCHUK *et al.*, 2005.

O sinal recebido difere por um deslocamento de frequência Doppler proporcional à diferença relativa da velocidade entre transdutor e os espalhadores. Uma série rápida e contínua de transmissões permite um perfilamento<sup>3</sup> da coluna d'água, dividida em células. Os dados de cada célula são os componentes da velocidade nas direções x, y e z. As células são agrupadas em colunas de verticais, que são gravadas instantaneamente (DORNELLES, 2009).

Os primeiros ADP eram chamados de *narrow band* (banda estreita). Estes equipamentos possuíam limitações de profundidade mínima de 3,4 m (11,5 ft.) utilizados principalmente em rios e estuários (SIMPSON, 2001). Essas limitações de profundidade induziram os fabricantes a desenvolverem novos equipamentos acústicos,

<sup>3</sup> É emissão contínua de ondas sonoras sobre a seção transversal analisada.

surgindo os *broad band* (banda larga) otimizado para medições de vazão em águas rasas.

Assim, com o surgimento do *broad band*, os fabricantes puderam desenvolver novos equipamentos, como o *Workhorse* com a opção *botton tracking*<sup>4</sup> (rastreamento de fundo) e Rio Grande com a opção embutida *botton tracking* (GAMARO *et al.*, 2012). Totalizando então quatro tipos de ADP: *narrow-band*, *broad-band*, *Workhorse*, e Rio Grande.

### 2.3.1 Histórico de usos com ADP

O surgimento dos equipamentos chamados de “Sonar”, utilizados durante a segunda guerra mundial para localização de submarinos, incentivou-se o desenvolvimento de algumas pesquisas, para que adaptassem esses equipamentos em medições em mares e estuários, afinal a utilização do princípio do efeito Doppler estava dando certo<sup>5</sup>. Segundo Simpson (2001) inicialmente estes equipamentos eram denominados como *Acoustic Doppler Discharge Measurement Systemns* (ADDMS), após alguns anos de aperfeiçoamento este equipamento tem sua designação modificada passando a se chamar ADCP ou ADP conforme os fabricantes (todas as fábricas localizam-se nos EUA).

Os primeiros passos direcionados à obtenção de medições de corrente que fizessem uso do efeito Doppler, foram no início da década de 60. O funcionamento do ADP era através do uso de pulso curto com transmissor e receptores separados, utilizando uma frequência de 10 MHz (CARVALHO, 1999).

No ano de 1973, os equipamentos sofreram modificações tornando possível a utilização destes aparelhos na obtenção de informações das seções hídricas analisadas, desde que se tivessem informações básicas de concentração de sedimentos e a distribuição de tamanhos dos espalhadores na região de estudo (BENSI, 2006). Inúmeros outros trabalhos começam a ser desenvolvidos entre as décadas 70 e 80, os

---

<sup>4</sup> Permite a realização da batimetria da seção transversal.

<sup>5</sup> Anotações informais relatadas no Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu- PR (2012).

quais proporcionaram alterações nos equipamentos beneficiando ainda mais as medições.

Na figura 7 é ilustrado um dos primeiros transdutores utilizados nas medições, neste caso, o tamanho aproximado de uma pessoa adulta.

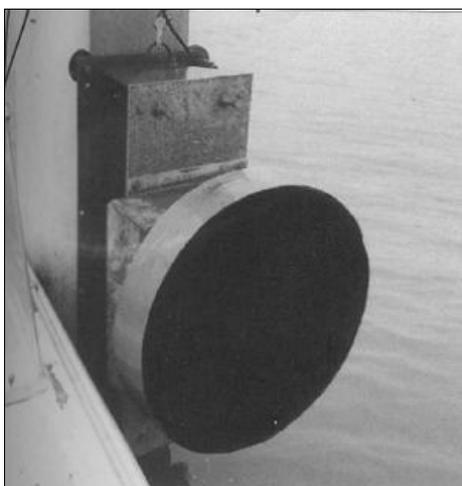


Figura 7 - Transdutor de 30 kHz.

Fonte: GAMARO (2012).

Após inúmeras mudanças em relação às frequências, formas e diminuição dos transdutores, tornaram-se comerciais os perfiladores acústicos de funcionamento Doppler. Após o aperfeiçoamento desta ideia inicial, foram incluídas pesquisas para desenvolver métodos alternativos para perfilagens de correntes hídricas, como Sistema Doppler Transverso, o Sonar Doppler Coerente e o Sonar de Correlação (BENSI, 2006).

A história dos medidores Doppler no Brasil se iniciou no ano de 1992, quando a RD *Instruments* realizou demonstrações de medições de vazões em dois locais: no rio Paraíba do Sul, perto da cidade de Volta Redonda (RJ), e no rio Solimões na cidade de Manacapuru (AM). Em 1993 realizou-se uma nova apresentação, desta vez na usina hidrelétrica de Itaipu (PR) com a presença de vários técnicos de empresas do Brasil, Paraguai e Argentina (GAMARO, 2012).

No ano seguinte, através da equipe Franco-Brasileira do projeto HiBAm (Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica) composta por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, atualmente conhecida por ANEEL

(Agência Nacional de Energia Elétrica) e do Instituto Francês IRD (*Institut de Recherche Pour Le Développement*) realizaram-se as primeiras medições de vazão com o ADP no País (FILIZOLA, 2004; GAMARO, 2012). A figura 8 ilustra a montagem do ADP em embarcação durante as medições realizadas pelo Projeto HiBAm que na época surgiu como umas das medições pioneiras no Brasil (BARBOSA, 2005).



Figura 8 - O primeiro ADP de medição vertical utilizado no Brasil.

Fonte: GAMARO (2012).

Existem diferentes modelos de ADP, entre eles destacamos os modelos de instalação horizontal e vertical. A Itaipu Binacional dispõe de inúmeros modelos adquiridos ao longo dos anos, entre eles, estão representados dois na figura 9.



(a)



(b)

Figura 9 - Ilustrações de ADP utilizados na Itaipu: (A) ADP horizontal 500 kHz; (B) ADP vertical 600 kHz.

Fonte: GAMARO (2012).

A figura 10 ilustra a simulação do posicionamento dos ADP e a propagação dos feixes acústicos nas colunas d'água.

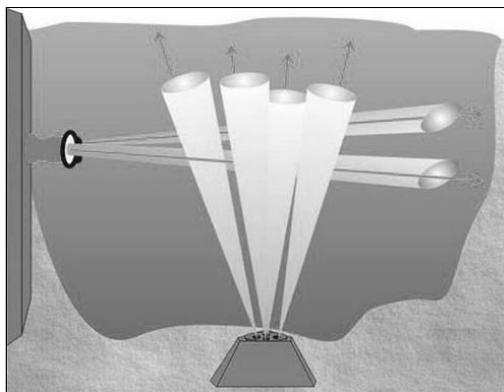


Figura 10 - Propagações dos feixes acústicos horizontais e verticais.

Fonte: NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC - NOAA<sup>6</sup> (2012).

Os estudos com o ADP começam a ganhar destaque em algumas aplicações como: monitoramento de portos; em obras marítimas; na biologia marinha; medições direcionais das ondas e outra possibilidade a determinação da quantidade de sólidos em suspensão, a partir do espalhamento do feixe sonoro ocorrido na partícula presente em rios, lagos, represas, etc., (BARBOSA, 2005).

Segundo Carvalho (1999) pode-se citar algumas das múltiplas aplicações do ADCP:

- Oceanografia: circulação oceânica em geral; correntes de maré;
- Engenharia Ambiental: dispersão de poluentes
- Hidráulica Fluvial - medições de vazões;
- Portos: medição de correntes em águas rasas;
- Engenharia Costeira: determinação de correntes e transporte de sedimentos;
- Biologia: identificação de biomassa e organismos marinhos;
- Ondas: medição de ondas (altura e direção).

Segundo Gamaro (2012) no ano de 2010 o Brasil havia adquirido cerca de 150 aparelhos acústicos para as medições de vazão, e considera este valor muito inferior em

<sup>6</sup> NOAA é uma organização de comércio dos EUA e significa *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Disponível em: <http://www.noaa.gov>

comparação aos EUA, cuja hidrografia é semelhante e a agência americana USGS dispõe de mais de 700 aparelhos de todos os modelos e frequências.

A aplicação destes equipamentos na hidrografia brasileira vem sendo evidenciada nos últimos anos. Entre os pesquisadores brasileiros, destacamos o Engenheiro Paulo Everaldo Gamaro precursor do Grupo de discussão das técnicas de medição de vazão utilizando o efeito Doppler em rios, canais e estuários (disponível no acesso [vazao\\_com\\_adcp@yahoogrupos.com.br](mailto:vazao_com_adcp@yahoogrupos.com.br)). Este grupo possui aproximadamente 219 integrantes, visando estabelecer e discutir padrões comuns de operação para este relativamente novo e revolucionário método, garantindo com isto uma qualidade mínima dos dados obtidos com este equipamento.

### 2.3.2 Fatores de interferências nas amostragens acústicas

Para Gamaro (2008) o feixe acústico apresenta perdas ao longo da coluna de água, principalmente com a dispersão, a atenuação (absorção) e a emissão dos sinais. Segundo Rotaru *et al.* (2011) as influências envolvendo a intensidade da captação do eco dependem do ambiente analisado, envolvendo principalmente as características da água (temperatura, coeficiente de absorção, etc.), do equipamento acústico (frequência, feixe de espalhamento, etc.) e as propriedades das partículas hidroacústicas (tamanho e a concentração das partículas, coeficiente de absorção, etc.).

Gamaro (2012) relata que os erros podem ser causados por **fatores internos**: comprimento do pulso, frequência transmitidas, razão sinal- ruído (SNR) e ângulo; e **fatores externos**: turbulências, ondas internas, movimentação do instrumento, fatores da medição. Terabe (2003) e Barbosa (2005) explicam os principais fatores externos e do próprio equipamento que afetam os resultados das amostragens acústicas detalhadamente:

**-A Expansão do feixe acústico:** A emissão do feixe acústico é transmitido e atravessa à coluna de água, sua intensidade é diminuída devido à expansão do feixe acústico (formato de cone) e a profundidade da seção.

**-Absorção da energia acústica pela água:** os fatores que proporcionam essa absorção resultam da ocorrência de processos físicos e químicos na água, reduzindo a

intensidade do eco. A água salgada possui maior absorção que a água doce, devido às reações químicas presentes.

-Os **Sedimentos** presentes influenciam na perda da energia acústica devido à absorção e à dispersão causada pelo tamanho do sedimento. As partículas pequenas tendem a absorver energia acústica, já as partículas grandes dispersam. O fator mais influente é o tamanho do sedimento, entretanto, a densidade e a compressibilidade também afetam os resultados.

-**Outras Partículas** presentes na água como plânctons e também o grau de floculações dos sedimentos podem causar erros ou perdas acústicas. A **temperatura** e a **salinidade** ao longo da profundidade também proporcionam de perdas afetando principalmente o coeficiente de absorção de energia acústica da água e a velocidade do som na água.

-Os motores do barco criam **ruídos e vibrações** que interferem diretamente na captação dos sinais. Outros fatores também que influenciam referem-se à água passando na face do transdutor, bolhas de ar criadas pela fricção do casco com a água, ruídos no convés, tais como mover objetos, trepidação do eixo do motor, além de outros, que possivelmente afetam medições, quando direcionadas a sedimentos (GAMARO, 2012).

-Além dos fatores citados anteriormente, os **erros do próprio instrumento** produzem incertezas dos sinais acústicos, seja pelas estatísticas dos sinais realizadas pelo equipamento ou sua até mesmo a frequência. Outro fator relevante é a **frequência** e o **ângulo de emissão** dos ecos, influenciando direcionamento do eco refletido; o tamanho das células diferentes entre as verticais.

-O manuseio das **informações dos dados coletados**, para utilizar dos dados provenientes dos ecos, as informações acústicas devem ser processadas ou calibrações que devem ser informadas ao equipamento, seguindo a conversão das unidades internas dos cálculos; a coerência dos dados extraídos, para posterior utilização dos mesmos e a informações fornecidas pelos fabricantes sobre o equipamento.

A figura 11 apresenta um ADP da marca RD *Intruments*, com o objetivo de tentar diminuir a área próxima à superfície líquida não medida pelos equipamentos, chamada **blank**<sup>7</sup> (branco). Porém neste caso, este equipamento, apresentou distúrbios e algumas falhas.

---

<sup>7</sup> Designado à área subsequente a intrusão do ADP, onde há emissão e a não ocorre à captação do feixe sonoro.



Figura 11 - Distúrbios em ADP.

Fonte: GAMARO (2012).

Esta área denominada de *Blank*, é explicada por Barbosa (2005) desta forma: o transdutor que é usado na transmissão, também será usada na recepção. Faz-se necessário que ocorra um intervalo de tempo para que não haja a interferência mútua do sinal acústico (choque entre os feixes acústicos).

O ADP não mede toda a seção transversal do rio, pois para a elaboração do perfil necessitam de requisitos mínimos de profundidade para que possa formar um perfil da seção. Estas áreas não medidas são: as margens (inicial e final); a profundidade de montagem ou intrusão do ADP na água (chamada de parte superior), o leito do rio (células que alcançam o leito, cuja designação atribuída como célula contaminação parcial). A estimativa das vazões nas margens ocorre através da obtenção de uma média das verticais realizadas nas proximidades (usualmente 10 verticais), neste caso, ressalta-se a necessidade de manter o ADP estacionário pouco antes das medições. Existem algumas equações para extrapolações nas margens que possibilitam ser aplicadas em margens triangulares e retangulares.

Segundo Gamaro (2012) o cálculo da vazão ( $Q$ ) consiste em somar as células da  $Q$  estimada na superfície com a  $Q$  medida e a  $Q$  de fundo. Os métodos de extrapolação para estas áreas não medidas são descritos como a extrapolação da

superfície: constante, exponencial e três pontos; extrapolação para o fundo: constante, exponencial e no *slip*<sup>8</sup>.

Estas extrapolações são explicadas sucintamente a seguir (GAMARO, 2012):

- A **extrapolação constante** consiste em usar a última velocidade medida (fundo ou superfície) e admiti-la para os espaços não medidos.
- A **extrapolação exponencial** (equação) utiliza-se o expoente 1/6 e dependendo da forma dos dados, aplicam-se outros expoentes.
- A **extrapolação três pontos**, significa que a inclinação das últimas três células medidas será empregada nas células não medidas.
- A **extrapolação no *slip*** consiste em usar os 20% finais das células da profundidade para extrapolar na área não medida (necessidade mínima de 6 células).

A equação 2, extrapolação, aplicada ao funcionamento do ADP segundo o manual para a obtenção do perfil de Velocidade proposto por Gamaro (2012) *apud* Chen (1989):

$$\frac{U}{U^*} = 9,5 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n \quad (2)$$

Sendo:

U= velocidade à distância “x” do leito;

U\* = Velocidade de atrito ou fricção ao fundo;

z= Distância ao leito;

z<sub>0</sub>= Altura da rugosidade de fundo;

n= Expoente (1/6);

### 2.3.3 Curva de Rayleigh

O método de retroespalhamento sofre intervenções entre a frequência do equipamento e a granulometria presentes em meio líquido. A base de análise desta

---

<sup>8</sup> Não há tradução, devido à mudança de significado original.

relação é a teoria acústica do modelo de espalhamento de Rayleigh (BARBOSA, 2005; DORNELLES, 2009).

Essa forma de espalhamento é importante para a acústica submarina e os demais cursos hídricos avaliados, porque leva em conta que as partículas causadoras de espalhamento podem ser aproximadas a esferas geométricas. Desse modo podem-se estudar aspectos do espalhamento acústico, ligados a frequência de transmissão, tamanho, compressibilidade e densidade de corpos marinhos (CARVALHO, 1999).

O modelo de espalhamento de Rayleigh refere-se à dispersão da luz ou qualquer outra radiação eletromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda emitido, ou seja, espalhamento é o processo pelo qual as moléculas do meio e as pequenas partículas em suspensão no meio difundem a porção da radiação incidente em todas as direções. No processo de espalhamento, a intensidade da onda primária, ou incidente, decresce porque a energia absorvida da onda é re-emitida em todas as direções, resultando em uma efetiva remoção de energia da radiação primária. A figura 12 ilustra a curva de Rayleigh.

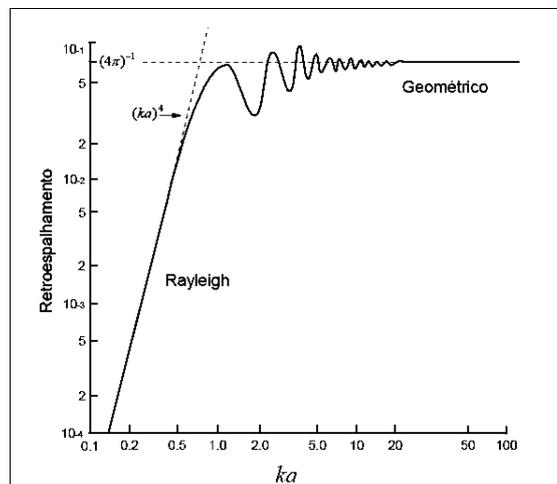


Figura 12 - Curva de Rayleigh.

Fonte: BARBOSA (2005).

Nesta curva são apresentadas as informações entre o raio da circunferência ( $a$ ) e o número de onda ( $k$ ), entretanto não são informados dados inferiores a unidade de  $ka < 1$ . Segundo Carvalho (1999) um fator importante que descreve o espalhamento de

qualquer pequeno corpo é o espalhamento de Rayleigh, caracterizado por  $(ka)^4$ . Quando  $ka$  é muito menor que 1, a função de espalhamento, sendo proporcional a  $k^4$ , será proporcional também a quarta potência da frequência. Quando a frequência acústica na região de  $ka$  é muito menor que a unidade e se  $e \geq 1,0$  o retroespalhamento é muito pequeno. Até  $ka = 1$  o espalhamento é dito de Rayleigh e a partir daí é considerado como espalhamento geométrico.

Para aparelhos acústicos de frequência de 1200 kHz, partículas de diâmetro de 0,4; 0,04 e 0,004 mm, correspondem a um produto entre o raio médio da partícula e o número de onda na ordem de 1,00; 0,1 e 0,01, respectivamente. Desta maneira, o método acústico é mais apropriado para distribuições de tamanho de partículas na ordem dos décimos e centésimos de milímetro. Por causa do inerente desacordo entre frequência e tamanho da partícula, sensores acústicos são mais apropriados para materiais em suspensão maiores que aqueles que os instrumentos ópticos são otimizados, devido os sensores acústicos são mais sensíveis às partículas grandes (proporcional ao volume), enquanto os ópticos, às partículas pequenas (proporcional à área da seção transversal) de acordo com Barbosa (2005).

#### 2.3.4 Equações para estimar CSS a partir de informações acústicas

Os sensores acústicos são rotineiramente usados nas medições de séries de velocidades da água, mas pesquisadores buscam utilizar como um medidor quantitativo para estimar o CSS a partir da intensidade do eco, como um produto das medições de velocidades. A vantagem adicional da técnica acústica é que o sinal de retorno não traz somente uma medição em um simples ponto, mas sim uma série de perfis de dados (BARBOSA, 2005).

Para relacionar o eco com a descarga sólida, Filizola (2004) relata a necessidade da divisão da seção do rio em um numero de células virtuais com uma área pré-definida, assim essa configuração estabelecida pelo usuário será de acordo com as condições ambientais, em que o equipamento mede as velocidades de corrente. Na figura 13, a identificação da seção com os pontos amostrais em cada vertical.

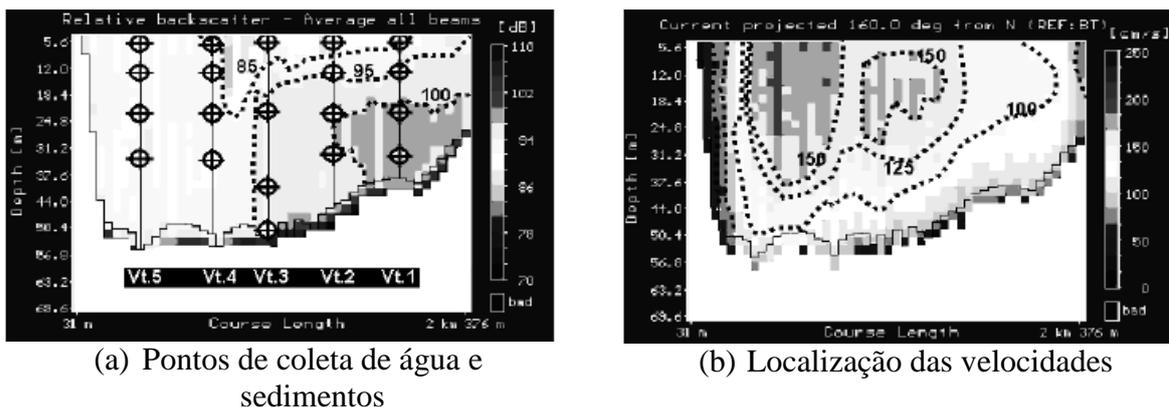


Figura 13 - Perfil transversal (A) Mostra o perfil da seção de Óbidos fornecido pelo do ADP e a representação dos pontos de amostragens em cinco verticais; (B) A identificação das áreas com as maiores velocidades através das linhas tracejadas.

Fonte: FILIZOLA (2004).

As medições quantitativas de sólidos em suspensão utilizando ADP exigem conhecimentos sobre o equipamento, processo de extração e interpretação dos dados obtidos para que sejam analisadas corretamente as correlações entre o retorno acústico e a CSS. Segundo Gamaro (2012) os ADP basicamente utilizam a equação modificada do sonar (equação 3), Urick (1975):

$$EL=SL-2TL+S_v+10 \log_{10}(V_e) \quad (3)$$

Sendo:

EL= Nível de erro;

SL= Nível da fonte no transdutor em dB;

2 TL= Duas vezes as perdas de transmissão (ida e volta);

$S_v$ = Força volume de eco das partículas em dB;

$V_e$ = Volume ensonificado<sup>9</sup> (célula);

A perda de transmissão envolve basicamente as perdas por espalhamento, dispersão, atenuação (absorção) e cavitação (Gamaro, 2008). Durante a propagação do feixe acústico na água, ocorrem perdas de energia sob forma de espalhamento

<sup>9</sup> Refere-se também ao valor do eco de retorno apresentado na célula “x”.

geométrico e atenuação devido à massa de água e à presença dos sedimentos em suspensão. Isso resulta em perdas na intensidade do sinal emitido, neste caso, chamadas de perdas de transmissão (TL). Essa perda pode ser calculada pela equação 4, abaixo (Gamero, 2012 *apud* Urick, 1975):

$$2TL=20 \log_{10} R+[2*\alpha *R] \quad (4)$$

Sendo:

R= Distância do volume ensonificado (célula) em m;

Termo  $\alpha$  = Coeficiente de absorção em dB/m

$20 \log_{10} R$ = Perda por espriamento<sup>10</sup>

$2 \alpha R$ = Perda por absorção (da água);

A partir desta relação “eco x CSS” pesquisadores começaram a desenvolver equações com os métodos: implícito, explícito e prático (relação direta entre estes fatores). Os dois primeiros diferem na metodologia de cálculo, mas a formulação é a mesma. No método implícito é necessário conhecer um dado de concentração para uma determinada profundidade e a partir desta informação extrapolar para as demais profundidades (BARBOSA, 2005). O método “explícito” desconsidera o coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) da água, logo que a concentração de sedimentos é baixa.

O método prático que é o objetivo principal deste trabalho permite a cálculo dos perfis de CSS, a partir de dados fornecidos pelo ADP e a aplicação de fórmulas de correlação. As pesquisas relacionadas com a aplicação deste método e em sua maioria, partem da equação desenvolvida por Deines (1999), estabelecida a partir das intensidades dos ecos, registradas pelo ADP, convertidas em decibéis (dB) e corrigidas a partir das perdas pela expansão do feixe acústico e à absorção acústica na água. Assim, tem-se a equação 5.

$$Ci = 10 \left[ \log Cr + \frac{(ECi - ECr)}{10} \right] \quad (5)$$

<sup>10</sup> Refere-se aos termos espalhamento e dispersão

Sendo:

$C_i$ = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_r$ = concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibragem ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{ci}$ = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB);

$E_{cr}$ = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB);

O método descrito por Deines (1999) considera a proporcionalidade entre incrementos de intensidade do sinal acústico e a razão entre as concentrações. As intensidades dos ecos registradas pelo ADP são convertidas em concentrações de sedimentos através de uma correlação estabelecidas a partir de uma intensidade do eco e uma concentração de sedimentos em suspensão correspondente. Esta medição requer dados simultâneos entre a intensidade do eco e o CSS.

A pesquisa desenvolvida por Mayerle & Poerbandolo (2002), parte do princípio de aplicação da equação desenvolvida pelo método de Deines (1999). Assim, estes pesquisadores perceberam que a inserção de um coeficiente (KM) multiplicado pelo incremento do eco, entre ( $E_{ci}-E_{cr}$ ), proporciona melhores resultados na conversão da intensidade acústica em relação ao CSS. Portanto Mayerle & Poerbandolo (2002) formularam a equação da seguinte forma (equação 6):

$$C_i = 10^{\left[ \log C_r + KM \frac{(E_{ci} - E_{cr})}{10} \right]} \quad (6)$$

Sendo:

$C_i$ = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_r$ = concentração de sedimentos medida no nível de referencia para calibragem ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{ci}$ = intensidade do eco correspondente a célula de número  $i$  (dB);

$E_{cr}$ = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB);

KM= coeficientes propostos pelos autores;

O coeficiente KM é um valor empírico, cujo objetivo é aprimorar a estimativa de concentração de sedimentos em suspensão. Entre os diversos “KM” testados, os valores recomendados pelos autores com melhor ajuste são 0,35 e 0,45.

Outro método aplicado é o desenvolvido por Gartner (2002), que sugere uma relação direta entre a CSS e o logarítmico da intensidade do eco, obtida por regressão, segundo a equação 7.

$$C_i = 10^{(E_{ci} * A + B)} \quad (7)$$

Sendo:

$C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{ci}$  = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB);

A e B são coeficientes angular e linear, a determinação deste coeficiente é no ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, assim determinados por regressão os valores correspondentes de intensidade do eco e concentração de sedimentos, medidos simultaneamente, em uma plotagem mono-log na forma da equação 8.

$$\log_{10}(C_i) = E_{Ci} * A + B \quad (8)$$

Nesta equação, são determinados os coeficientes A e B utilizando o conjunto de informações referente aos pontos medidos nas seções.

Após a aplicação dos cálculos para a estimativa de CSS, é necessário avaliar a eficiência da conversão (s) utilizada (s). Baseando-se na razão de discrepância definida por Van Rijn (1984) formou-se a seguinte equação 9:

$$r = \frac{C_{\text{estimada}}}{C_{\text{medida}}} \quad (9)$$

Sendo:

$C_{\text{estimada}}$  é a concentração estimada pela amostragem acústica;

$C_{\text{medida}}$  é a concentração medida através de amostragens mecânicas ou ópticas;

A avaliação é feita com base na porcentagem dos resultados obtidos que resultam dentro de uma determinada faixa de variação de  $r$ , chamada de fator. A relação entre o fator e a faixa de variação entre  $C_{estimada}$  e  $C_{medida}$ , esta descrita na tabela 2:

Tabela 2 - Fator e faixa de variação de  $r$  conforme Terabe (2003):

$r$	Fator 1,25	Fator 1,5	Fator 2,0	Fator 3,0	Fator 5
	0,8 a 1,25	0,75 a 1,5	0,5 a 2,0	0,33 a 3,0	0,2 a 5,00

Os pesquisadores Terabe (2003) e Dornelles (2009) aplicaram essas faixas relacionando a proximidade dos resultados entre as concentrações medidas e estimadas. Terabe (2003) considerou somente a faixa do fator 2 como limite entre seus resultados e Dornelles usou os fatores 1,5; 2,0 e 3,0 excluindo uma faixa bem restritiva no caso, o fator 1,25 e a outra bem abrangente, o fator 5. Neste trabalho serão aplicadas as faixas restritivas para as amostragens de eco medido e CSS e também para eco medido e turbidez, os fatores restritivos serão então: 1,5; 2,0; e 3,0.

### 2.3.5 Estudos com aplicações acústicas

Nas últimas décadas pesquisadores nacionais e internacionais, buscam relacionar as medições de vazão pelo ADP com a possibilidade de unir com a quantificação de sedimentos transportados pelos rios. As equações aplicadas a esta incógnita, relacionada ao sedimento variam e a cada nova aplicação algum fator é ajustado para obter melhores resultados.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos de destaque, relacionados a investigação do ADP para estimar a concentração de sedimentos:

Dornelles (2009) buscou quantificar a CSS transportada na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí no Rio Grande do Sul. Essas estimativas foram realizadas através da aplicação de métodos empíricos para a conversão do sinal acústico dos equipamentos em perfis do CSS. O autor aplicou quatro metodologias de cálculos diferentes: primeiramente a de Deines (1999); o método de Mayerle e Poerbandono (2002), neste método foi testado vários níveis de referências e coeficientes de ajustes (KM); Gartner

(2002), com a utilização de coeficientes determinados em dois modelos também descritos por este autor e a relação de comparação direta entre o sinal acústico emitido pelo equipamento e a concentração avaliada em laboratório. O trabalho realizado por Dornelles (2009) demonstrou que o método que obteve resultados adaptados a esta região, e que melhor estimou os valores de CSS foi o de Gartner (2002) e a comparação direta do CSS e eco, enquanto que o método que obteve o pior desempenho foi o método de Deines (1999).

Na região de Óbidos localizada a 800 km da foz da bacia Amazônica, Filizola (2004) realizou medições da descarga de vazão com o auxílio de um ADP e medições das descargas de sedimentos nesta estação. O equipamento acústico utilizado possuía a frequência de 300 kHz e o software de processamento foi o *Transect* da marca RD *Instruments*. O autor realizou quatro medições das vazões com o ADP instalado em um barco (duas medições iniciando da esquerda e duas iniciando da direita). Esse traçado transversal realizado pelo barco foi auxiliado por alvos instalados as margens do rio para referência de trajeto, assim, a descarga final foi calculada sob correção da velocidade do barco com a velocidade de escoamento na seção.

No Paraná, Terabe (2003) realizou medições de sedimentos em suspensão e acústicas nos rios Piquiri e Ivaí. As amostragens foram coletadas em cinco verticais igualmente espaçadas e simultâneas ao ADP. A conversão do eco pra CSS foi calculada utilizando método de Deines (1999). A aplicação da equação de Deines (1999) apresentou 78% dos valores estimados dentro da faixa restritiva de fator 2.0 para o nível próximo ao fundo dos rios e 86% na profundidade intermediária. Comparando os dados medidos e calculados pelo método de Deines (1999) com a inclusão de um “KM” descrito por Mayerle & Poerbadono (2002) os resultados passaram a 96 % de correlação. Na figura 14 podem ser visualizados os resultados das amostragens acústicas e CSS realizadas nos dois rios analisados por Terabe (2003).

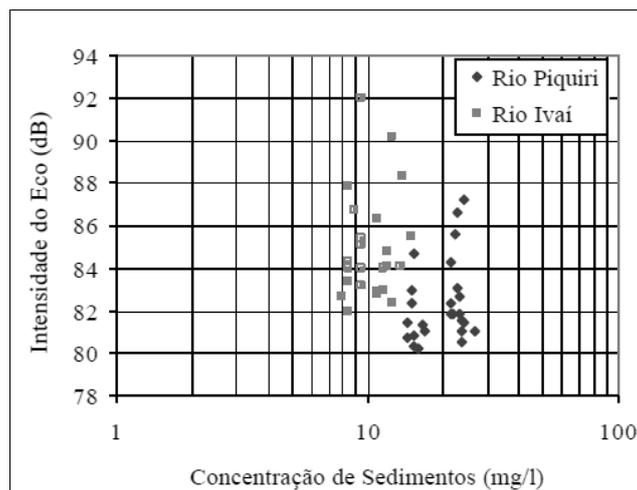


Figura 14 - Concentração de sedimentos e a intensidade acústica.

Fonte: TERABE (2003).

Os estudos realizados por Moore *et al.* (2011), às margens do rio Isere, na cidade de Romans sur Isere, na França, buscaram avaliar ADP comerciais operando com diferentes frequências. O local estudado está situado entre duas barragens (6 km a montante da La Vanelle Dam e 2 km a jusante de Pizançon), para verificação de quantidades de sedimentos. As três frequências acústicas utilizadas por Moore *et al.* (2011) foram: 300, 600 e 1200 kHz. Os equipamentos possuíam três defletores cada, este fato induziu a inativação de alguns defletores durante as amostragens, devido à instalação próxima dos equipamentos.

Para auxiliar nas medições dos fluxos de sedimentos em suspensão, instalou-se um medidor óptico (turbidez), e também um amostrador de bomba peristáltica ISCO 6712, programado e acionado durante os eventos. Ambos os aparelhos foram montados na profundidade de 0,5 m. Com as medições do ADP os autores verificaram que, durante as medições de baixo fluxo de sedimentos, os equipamentos de 300 e 600 kHz subestimaram condições reais de velocidade e concentração de sedimentos. A turbidez foi usada para determinar a relação entre a atenuação de sedimentos e concentrações suspensas, assim essas relações observadas por Moore *et al.*, (2011) possibilitaram reconstruir os dados de concentração por um espaço temporal de 24 h em um período chuvoso registrado.

As campanhas realizadas no projeto HiBAM do período de 10 anos (1995 a 2005) serviram para o pesquisador Barbosa (2005) utilizar para verificar de dados

acústicos e CSS. Foram realizadas medições de vazões, levantamentos de granulometrias e CSS em diversas estações ao longo de vários rios da Amazônia, entre eles o rio Solimões, rio Madeira e rio Amazonas. Os ADP utilizados foram modelos WorkHorse: 1200kHz para profundidades de máxima 20 metros; 600 kHz (máxima de 60 metros) e 300 kHz (máxima de 130 m). Barbosa (2005) juntou todas as medições realizadas comparando eco com a CSS, possibilitando assim a elaboração do gráfico disposto na figura 15 abaixo:

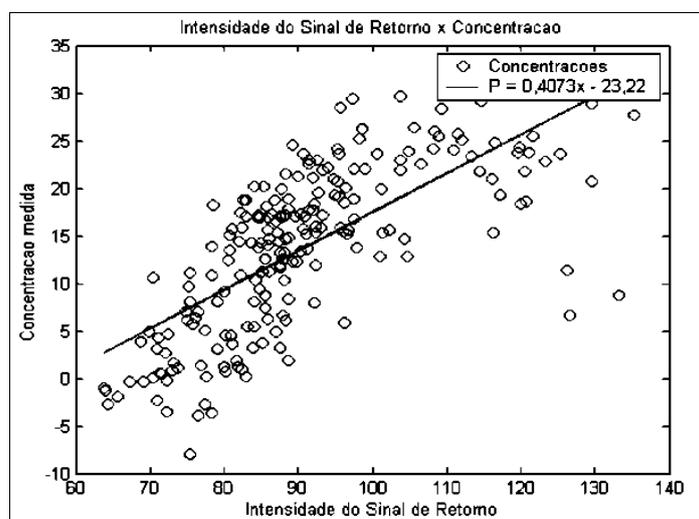


Figura 15 - Correlação entre sinal de retorno e Concentração medida.

Fonte: BARBOSA (2005).

Guerrero *et al.* (2011a) analisaram a concentração de sedimentos em suspensão e a granulometria destes, em 4 seções transversais do Rio Paraná, utilizando três ADP com frequências de 600, 1000 e 1200 kHz. Os autores utilizaram três ADP em sua pesquisa, sendo que dois equipamentos foram calibrados para concentrações granulométricas médias esperadas na seção analisada e o terceiro ADP (1000 kHz) não foi calibrado.

Este autor cita que estas calibrações devem ser suficientemente confiáveis para posterior comparação com o método de retroespalhamento e que pudesse relacionar com as concentrações e também poder extrapolar estes resultados. Os aparelhos apresentaram a sensibilidade esperada de acordo com os métodos utilizados e para a textura dos sedimentos em suspensão encontrados no rio, porém algumas limitações dos

próprios aparelhos para a granulometria. A adsorção ocasionada pelos sedimentos transportados não afetou a propagação do som, e nem a avaliação de concentração, constituídos basicamente de areia (GUERRERO *et al.* 2011a).

Após as medições realizadas de Guerrero *et al.* (2011a), no rio Paraná, Guerrero *et al.* (2011b) buscaram complementar o estudo validando em laboratório estas análises realizadas em campo. Os autores utilizaram ADP de frequências 600 e 1200 kHz. Os equipamentos foram posicionados na mesma coluna d'água para coletar informações de diferentes amostragens de areia de granulometrias diversas. Os testes de laboratório utilizaram uma torre para homogeneizar a mistura, constituída de água e quatro granulometrias conhecidas de areia no intervalo 50-700  $\mu\text{m}$ , inseridas em etapas diferentes. Cada ADP foi calibrado para uma faixa granulométrica específica, para posterior estimativa da CSS (GUERRERO *et al.*, 2011b). Essas calibrações usando concentrações diferentes demonstraram a possibilidade de determinar a relação linear entre o retroespalhamento de energia e a concentração de sedimentos. Observou-se um bom ajuste linear entre as granulometrias inseridas e analisadas entre 100-600  $\mu\text{m}$ .

Assim, os estudos apresentados anteriormente demonstram que a aplicação deste equipamento para a determinação de CSS expõe um significativo avanço em relação às outras técnicas convencionais usadas na obtenção destas determinações das amostras d'água, além de permitir novas oportunidades de estudo no processo de transporte de material carreado ao longo dos rios.

## 2.4 Sondas de turbidez

De uma maneira geral no Brasil, ainda são necessárias medições de CSS para a elaboração da curva-chave de sedimentos em uma seção hidrométrica. Os valores de CSS são obtidos através de campanhas de campo previamente estabelecidas em um calendário não hidrológico<sup>11</sup> (MERTEN *et al.*, 2012).

De acordo com Merten *et al.* (2012) essas medições agendadas no calendário não hidrológico acabam por não registrar o verdadeiro fluxo de sedimentos durante os eventos de cheia, períodos em que são transportadas as maiores concentrações de

---

<sup>11</sup> Período pré-definido por uma equipe ou agendamento para realização de campanhas de medições com/sem precipitações.

sedimentos. Dessa maneira, a determinação da CSS (têm maior representatividade no fluxo de vazão) deveria ser preferencialmente realizada durante as mudanças de nível do rio que ocorre durante os eventos de cheias (PERREIRA, 2010; CARDOSO *et al.*, 2012).

Os transportes dos sedimentos em suspensão variam preponderantemente com a vazão e o tempo, criando a necessidade de monitorar os seus fluxos das concentrações continuamente ou de forma estratégica, para caracterizar o transporte durante longos períodos (SCHMIDT *et al.*, 2012). Esta variação no tempo é intensificada em bacias menores, onde existe uma rápida resposta hidrossedimentológica (CARDOSO *et al.*, 2012; SCHMIDT *et al.*, 2012). Desta forma, é necessário realizar o monitoramento com alta frequência de amostragem dos sedimentos durante eventos (CARDOSO *et al.*, 2012).

Alguns métodos automáticos e indiretos são utilizados para estes fins, como usos dos sensores óticos ou sondas óticas de turbidez, propostas justamente para complementar à ausência de informações de CSS durante as cheias que quase sempre são difíceis de serem medidas manualmente (CARDOSO, 2012; MERTEN *et al.*, 2012). A turbidimetria<sup>12</sup> tem sido amplamente utilizada na hidrometria aplicada devido a sua representatividade, como uma opção complementar e eficiente para superar as limitações do monitoramento com CSS. As instalações das sondas de turbidez apresentam baixo custo para implantação, o aferimento da turbidez pode ser facilmente implantado *in situ* e possibilita o monitoramento contínuo na seção do rio (CASTRO & BORGES, 2012).

Neste caso, a turbidez é registrada continuamente e convertida em um registro da CSS usando uma relação empírica de calibração CSS para turbidez (NOGUEIRA *et al.*, 2012; SCHIMDT *et al.*, 2012). De acordo com as concentrações minerais dos solos carregados em rios, são apresentados valores de turbidez diferentes e ilustrados na figura 16, por Do Val *et al.* (2012).

---

<sup>12</sup> É um método que informa a redução da transmissão de luz em um meio em que há presença de partículas. É determinado através de um sistema ótico que mede a absorbância de um raio luminoso que atravessa a suspensão. O equipamento utilizado para realizar o teste chama-se turbidímetro.

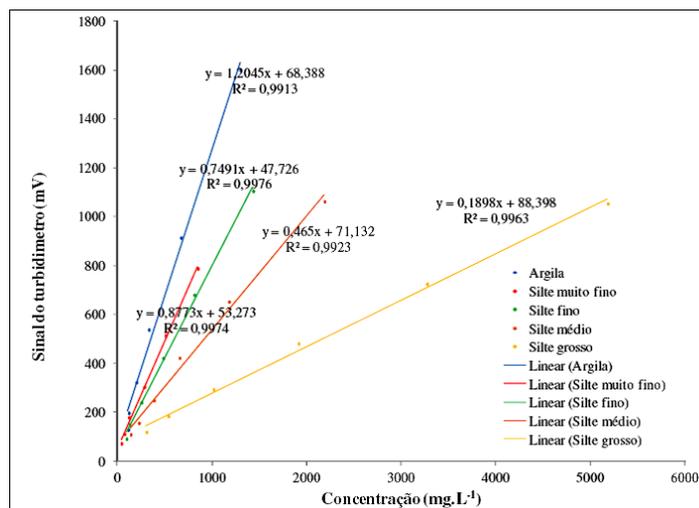


Figura 16 - Efeito da granulometria sobre o sinal de turbidez para diferentes concentrações.

Fonte: Do VAL *et al.* (2012).

A utilização da turbidez para o monitoramento e acompanhamento dos sedimentos geralmente requer o desenvolvimento de uma relação estatística entre as amostras, além de fatores importantes que podem causar influências nas medidas de turbidez, entre elas: a variação dos tamanhos das partículas, a composição, cor da água e a localização da sonda (CARDOSO *et al.*, 2012; GRUTKA *et al.*, 2012).

As principais limitações para a utilização do sinal refletido da luz em turbidímetros, para a determinação da CSS presentes na amostra são: o tamanho a forma, e a cor da partícula; a presença de bolhas de ar; a habilidade da partícula em refletir a fonte de luz; o comprimento de onda, o ângulo de detecção, o tamanho do feixe e a sensibilidade à cor da fonte de luz do turbidímetro; e alterações no pH que podem alterar as propriedades refletivas das partículas (Do VAL *et al.*, 2012; MERTEN *et al.*, 2012).

Outro fator relevante é a calibração do equipamento ou da sonda em toda a seção do rio, registrando a variabilidade da turbidez que ocorre no perfil transversal. Esta calibração ainda é pouco realizada nos estudos e pode gerar erros quando houver a correlação entre CSS e a turbidez (MERTEN *et al.*, 2012).

#### 2.4.1 Estudos relacionando a CSS, a turbidez e o eco medido

Alguns estudos foram realizados visando relacionar a turbidez e a CSS. Entre inúmeros trabalhos desenvolvidos sobre o tema, serão citados: Manz *et al.* (2010); Grutka *et al.* (2012); Dalbianco *et al.* (2012), Merten *et al.* (2012). Os coeficientes de determinação entre a turbidez e a CSS encontrados por estes autores superam 80 % de correlação, indicando a estreita proximidade dos resultados das medições e que CSS podem ser estimadas a partir dos dados de turbidez.

Os estudos descritos por Manz *et al.* (2010) referem-se ao monitoramento do transporte de sedimentos em suspensão através do registro automático de turbidez, por um sensor ótico (DTS -12- FTS), um sensor de nível do tipo transdutor de pressão e um Data logger H-500 XL (WaterLOG), programado para fazer leitura com frequências de 10 minutos. As medições ocorreram na bacia hidrográfica do Rio Sagrado-PR localizada na Serra do Mar. A relação entre a turbidez e a CSS foi calibrada para as características locais com 13 amostras coletadas em diferentes condições de vazão, obtendo-se um coeficiente de determinação de 0,98. Assim, utilizou-se uma série de vazões sólidas calculadas a partir dos dados da CSS obtidos por leituras automáticas de turbidez para posterior comparação com uma série de vazões sólidas da curva chave de sedimentos para o mesmo período. Comparando-se os dois métodos, a série de vazão sólida obtida pelo monitoramento automático apresentou uma média 27,4% inferior e coeficiente de determinação 0,80 com diferenças significativas principalmente nos picos e recessões dos sedimentogramas<sup>13</sup>.

Outra pesquisa sobre turbidez que apresentou resultados satisfatórios relacionando turbidez com CSS é a de Grutka *et al.* (2012). Os aparelhos utilizados foram o ISCO- Modelo 3700 e o amostrador USDH-48 ou AMS1 para a determinação da CSS e uma sonda digital (DTS 12) para turbidez, obteve um ajuste linear de aproximadamente 0,977, na estação fluviométrica MD IV na bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim (figura 17).

---

<sup>13</sup> São gráficos que apresentam comparações entre a Descarga sólida (tonelada/dia), tempo (horas) e precipitações (mm);

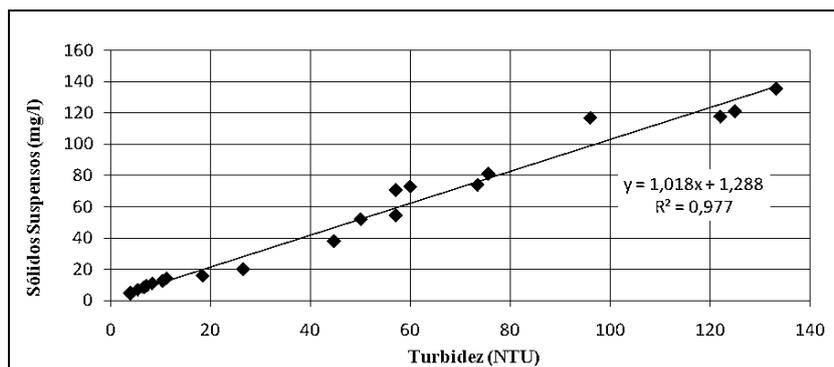


Figura 17 - Relação CSS e Turbidez.

Fonte: GRUTKA *et al.* (2012).

A equação de ajuste linear proposta por Grutka *et al.* (2012) pode ser descrita da seguinte forma (equação 10):

$$\text{CSS} = 1,018 \cdot \text{Tu} + 1,288 \quad (10)$$

Sendo:

CSS = Concentração de sedimentos em suspensão ( $\text{mg/L}^{-1}$ );

Tu = Dados de turbidez (NTU).

Nogueira *et al.* (2012), desenvolveu sua pesquisa buscando avaliar o transporte dos sólidos em suspensão, os sólidos totais dissolvidos e a turbidez em quatro afluentes do reservatório da UHE (Usina Hidroelétrica) Barra dos Coqueiros- GO em um período de agosto de 2010 a junho 2011. Os autores descreveram que as precipitações são responsáveis pelo aumento significativo de turbidez e as vegetações presente nas margens da seção estudada, próximas a instalação da sonda pode afetar dados importantes.

Do Val *et al.* (2012) realizaram a pesquisa no Rio Miranda, na região do Passo da Lontra (MS), utilizando uma sonda de turbidez para determinar a curva granulométrica de sedimentos finos (siltes, areias e argilas). Comparando os resultados obtidos pelo turbidímetro e pelo método da pipetagem para realização da granulometria, os autores verificaram resultados semelhantes entre ambos os parâmetros com 95 % de

correlação. Os melhores resultados encontrados para a estimativa da granulometria pela turbidez foram para os minerais: siltes finos e médios.

Após a apresentação de resultados satisfatórios, abordados nos estudos anteriores para relacionar a turbidez com a CSS, alguns estudos buscam correlacionar à intensidade acústica dos equipamentos de funcionamento a partir do Efeito Doppler com a turbidez, entre eles a pesquisa de Chanson *et al.* (2007).

Assim, a partir da possibilidade proposta entre turbidez e eco, Chanson *et al.* (2007) desenvolveu sua pesquisa em um estuário subtropical chamado de Eprapah Creek no leste da Austrália. Os equipamentos utilizados na pesquisa foram um micro ADV (16 MHz) e uma sonda de turbidez instalados a 5 cm a partir do leito do estuário durante 10 horas. Os resultados encontrados nas medições são apresentados na figura 18.

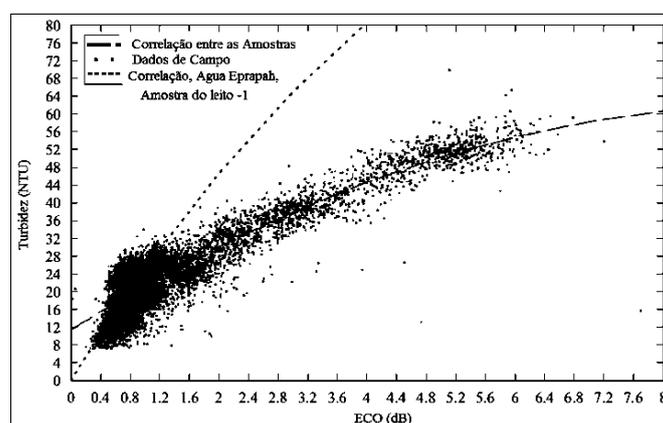


Figura 18 - Relação dos dados obtidos entre a turbidez e eco do ADV.

Fonte: CHANSON *et al.* (2007).

Chanson *et al.* (2007) registrou dados de turbidez e eco medido em um período de 10 h com elevada concentração de sedimentos. Durante a medição, o autor destaca que em um período de 2h foi possível registrar a amplitude do sinal acústico, que apresentou boa correlação com a turbidez medida. Na figura 19 é ilustrada a correlação dos dados de turbidez e eco medido durante as 10h de medição.

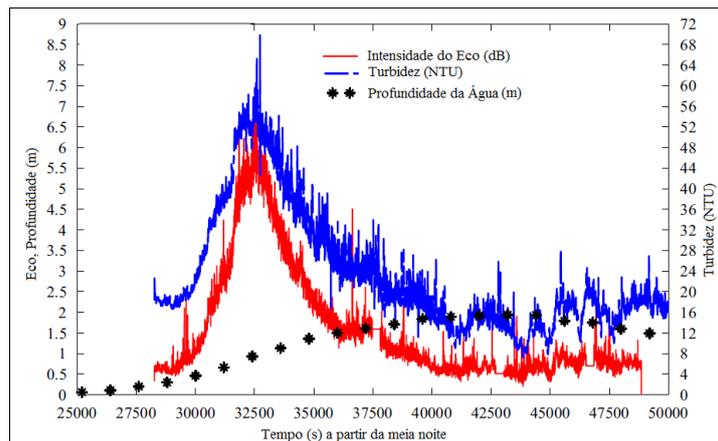


Figura 19 - Comparação entre a turbidez, o eco e a profundidade.

Fonte: CHANSON *et al.* (2007).

O próximo capítulo apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento desta pesquisa com a utilização de dados amostrais coletados com equipamentos acústicos (ADP) e amostrador pontual (AMS 1) para estimativa de CSS.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre os testes realizados em laboratório e em campo; os equipamentos utilizados neste trabalho e as metodologias dos procedimentos experimentais e de análise. Para maior entendimento, a tabela 3 apresenta de forma resumida as etapas do trabalho.

Tabela 3 - Síntese do trabalho experimental realizado.

<b>Localização</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>Investigação</b>	<b>Mistura</b>
<b>Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica</b>	-Amostrador AMS 1 -ADP	Relação CSS com o retorno do eco captado pelo ADP	-Areia; -Solo Superficial não/e classificado
<b>Estação Fluviométrica MD IV</b>	-Sonda/ Turbidímetro -ADP	Relação da turbidez com o retorno do eco captado pelo ADP	-Água e sedimento do Rio Vacacaí- Mirim

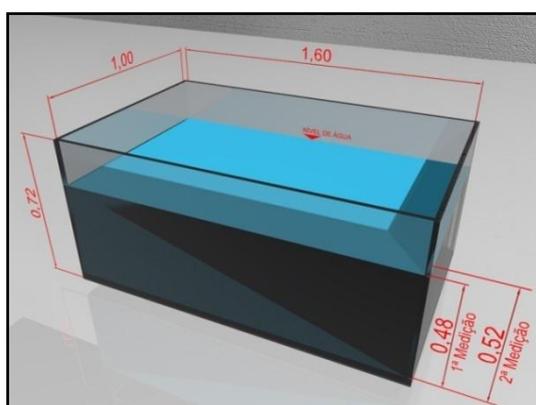
Na sequência apresenta-se a metodologia segmentada de acordo com a divisão proposta na tabela 3.

#### 3.1 Estudos elaborados em laboratório

Neste item, serão abordados os procedimentos realizados no laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica (Lab MFH) no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, CT-UFSM, incluindo o aparato experimental, os equipamentos utilizados nas investigações, procedimentos dos ensaios e processamento dos dados coletados.

### 3.1.1 Aparato experimental

O aparato experimental é constituído por um reservatório de amianto, retangular, com as seguintes dimensões: largura de 1 m, altura de 0,72 m e comprimento igual a 1,60 m. A figura 20 detalha o sistema completo do reservatório e a bomba para a recirculação. A figura 20-a ilustra as dimensões do reservatório e a figura 20-b o sistema do reservatório com a montagem de recirculação de água.



(a) Dimensões do reservatório



(b) Reservatório com a montagem da bomba

Figura 20 - Aparato experimental: (A) Esquema do reservatório e dimensões; (B) Reservatório com sistema de recirculação instalado.

O reservatório foi preenchido parcialmente com água e conectado a uma bomba de potência de 1,2 cv para garantir a movimentação contínua da água, em um circuito fechado, através de tubulações de diâmetro interno de 25 mm, (figura 20-b). O preenchimento de água no reservatório variou entre as profundidades de 0,48 e 0,52m, com volume aproximado entre 0,560 e 0,607 m<sup>3</sup> (figura 20-a).

### 3.1.2 Acoustic Doppler Profiler - ADP

O ADP utilizado para os experimentos é fabricado pela empresa americana Sontek YSI. O modelo utilizado no experimento é o *River Surveyor S5*, que possui uma

combinação de medição de velocidade pelo efeito Doppler aliada a um conjunto de softwares compatíveis com o sistema *Windows*, permitindo a visualização e coleta de dados em um computador portátil ou serviço de telefonia móvel. O software de processamento dos dados é o *River Surveyor Live*. Para o funcionamento do equipamento, é necessária a conexão do módulo de alimentação e comunicação (PCM - *Power and communication module*) ao ADP e pela opção *Bluetooth* se transmite informações do equipamento durante as medições para um computador ou aparelho celular (SONTEK, 2009). A figura 21 ilustra os transdutores do ADP.



Figura 21 - Visualização do ADP e transdutores.

Durante as medições no laboratório houve algumas adaptações na montagem do equipamento para a realização das medições. O reservatório experimental possui pequenas dimensões e o tamanho da prancha *Hidroboard* (suporte original do ADP) dificultaria as medições, apesar de serem estacionárias. Assim, adaptou-se o ADP a um suporte de isopor, simulando a prancha original sem alterar a profundidade de intrusão dos transdutores na água. Outra mudança foi à exclusão do PCM (fonte de energia) e o sistema *Bluetooth*, permitindo a conexão direta do ADP ao computador. A fonte de energia utilizada para o equipamento foi a eletricidade. Somente para algumas medições utilizou-se o PCM e o sistema de *Bluetooth* para verificar se haveria mudanças na captação do eco durante as amostragens.

O ADP, modelo *River Surveyor S5* possui algumas características específicas que estão citadas na tabela 4, com as informações de potencial e limitações para sua utilização.

Tabela 4 - Características e faixas de aplicação do ADP, segundo Sontek (2009).

Item	Característica / faixa de utilização
Modelo	<i>River Surveyor S5</i>
Transdutores	Possui 4 transdutores para perfil (3.0 MHz) e angulação de 25° e 1 transdutor para feixe vertical referentes à profundidade (1.0 MHz);
Medições de Velocidade	De 0,2 a 5,0 m de profundidade
Medição de Vazão (utilizando o <i>Botton Track</i> )	Até 5,0 m
Tamanho das células	0,02 a 0,50 m
Número de células fornecidas	Acima de 128 células
Carcaça de Delrin (tamanho)	Diâmetro de 13 cm (5") afunilando para 8,1 cm (3,2")

### 3.1.3 Amostrador – coletor pontual

O amostrador de integração vertical utilizado para as coletas de água e sedimentos no reservatório experimental foi o US-DH-48<sup>14</sup>, denominado nacionalmente como amostrador AMS 1, ideal para seções transversais com características de baixa profundidade. A tabela 5 apresenta a descrição do amostrador utilizado nas coletas de água e sedimentos realizadas em laboratório.

Tabela 5 - Descrição do amostrador de integração vertical, segundo Carvalho (1994).

Denominação Original	Denominação Nacional	Diâmetro do Bico Calibrado	Peso do Amostrador	Comprimento do Amostrador	Modo de Uso	Distância do Bico ao leito	Profundidade de Amostragem
US- DH-48	AMS-1	1/4"	3,0 kg com haste	32 cm	Haste	9 cm	1,5 m

<sup>14</sup> A denominação de US-DH 48 significa: **U**nited **S**tate referenciando aos Estados Unidos da América, e **D**epth (profundidade) para a integração vertical, **H**and para medições manuais (vau) e **48** número correspondente ao ano 1948.

Para a realização das coletas de água e sedimento no reservatório, na abertura deste bico foi inserida uma obstrução com material plástico que pode ser retirada do bico quando acionado um fio de nylon preso nesta obstrução e assim realizar a coleta pontual (figura 22). Essa adaptação teve um bom funcionamento em todas as amostragens. Durante as amostragens a garrafa foi preenchida completamente.



Figura 22 - Amostrador AMS 1 e a obstrução adaptada no bico.

#### 3.1.4 Procedimentos dos ensaios realizados em laboratório

Para a realização dos testes simulando as CSS artificiais buscou-se utilizar diferentes misturas e quantidades inseridas no reservatório. Foram realizadas 72 coletas distribuídas em 7 grupos, utilizando-se sedimentos provenientes de areia comercial, areia do leito de rio e solos superficial. Para a compreensão das etapas, as amostras foram separadas em grupos. A tabela 6 ilustra resumidamente esses grupos, números de coletas realizadas em cada grupo, as quantidades de mistura, altura da lâmina líquida, e as posições de coletas.

Tabela 6 - Descrição resumida das coletas no reservatório.

Grupos	Número das Coletas	Composição (Mistura)	Quantidade de mistura (kg)	Profundidade de água no Reservatório (m)	Posição de medição a partir da superfície livre (m)	Posição de medição a partir de um dos lados do tanque (m)
1	1a	Areia comercial	1,334	0,48 m	0,2 m A partir da superfície d'água	0,20 (12,5%); 0,60 (37,5%); 1,00 (62,5); 1,20 (75,0%) Direção: Direita para a esquerda.
	1b	Areia comercial + solo s.	1,334 (areia) + 0,304 (solo)			
	1c	Areia comercial + solo s. + solo s.	1,334 (areia) + 0,304 (solo) + 0,550 (solo)			
2	2a	Areia do rio Vacacaí Mirim	1,191	Visualizar a figura 27-a, pg.66 para melhor entendimento.		
	2b	Areia do rio Vacacaí Mirim + solo s.	1,191 (areia) + 0,558 (solo)			
	2c	Areia do rio Vacacaí Mirim + solo s. + solo s.	1,191 + 0,558 (solo) + 0,618 (solo)			
3	3a	Planossolo	0,300	0,52 m	0,2 m A partir da superfície d'água	0,35 (22%); 0,70 (44%); 1,05 (65%) Direção: Direita para a esquerda.
	3b	Háplico Eutrófico	+ 0,300			
4	4a	Argissolo Vermelho Distrófico	0,300			
	4b		+0,300			
	4c		0,300			
	4d		+0,300			
5	5a	Cambissolo Háplico Tb Distrófico	0,300			
	5b		+0,300			
6	6a	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	0,300			
	6b		+0,300			
7	7a	Latossolo Vermelho Distrófico	0,300			
	7b		+0,300			
	7c		0,00			
	7d		+0,150			
	7e		+0,300			
	7f		+0,300			

\*solo s. designação de solo superficial

As análises iniciavam da seguinte forma, com o reservatório preenchido parcialmente com água, adicionava uma porção de solo ou areia e acionava a bomba de recirculação, a fim de homogeneizar o meio. Em seguida realizavam-se as coletas acústicas e de água com sedimentos para serem encaminhadas ao laboratório. Para a mesma água presente no reservatório, adicionava uma segunda dosagem de solo, repetindo a homogeneização e as coletas, e, quando houvesse uma terceira dosagem,

realizava os mesmos procedimentos. A figura 23 ilustra um fluxograma dos procedimentos, desta forma descrevem-se as etapas de cada fase e os detalhes das coletas das amostras no reservatório.



Figura 23- Organização das etapas para os diferentes grupos.

Através do acionamento da bomba por aproximadamente 2 minutos, tempo também citado por Guerrero *et al.* (2011 b), realizou-se a homogeneização dentro do

reservatório experimental. Em seguida, após o desligamento da bomba, realizaram-se as coletas de amostras de água e sedimento, registradas simultaneamente as medições com o ADP.

Para os Grupos 4 e 7 que se referem aos testes com os solos Argissolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho Distrófico, respectivamente, foram realizadas repetições de amostragens. Essas repetições visaram conferir se os resultados iniciais com os solos conferem com as repetições, utilizando os procedimentos padrões no reservatório. Ao final das coletas de cada grupo, o reservatório era esvaziado e limpo, logo após esse procedimento, realizava o preenchimento parcial com água limpa iniciava novos testes.

### 3.1.5 Areias e solos classificados

Os testes referentes aos Grupos 1 e 2 utilizaram concentrações e misturas diferentes. No Grupo 1-a, as análises procederam com volume de areia comercial, e o Grupo 2-a, utilizou-se de areia mais fina originária do Rio Vacacaí Mirim e retirada nas proximidades do exutório da Bacia do Vacacaí Mirim localizado no município de Restinga Seca- RS. Na figura 24 são ilustradas as curvas granulométricas das areias, comercial e do Rio Vacacaí Mirim.

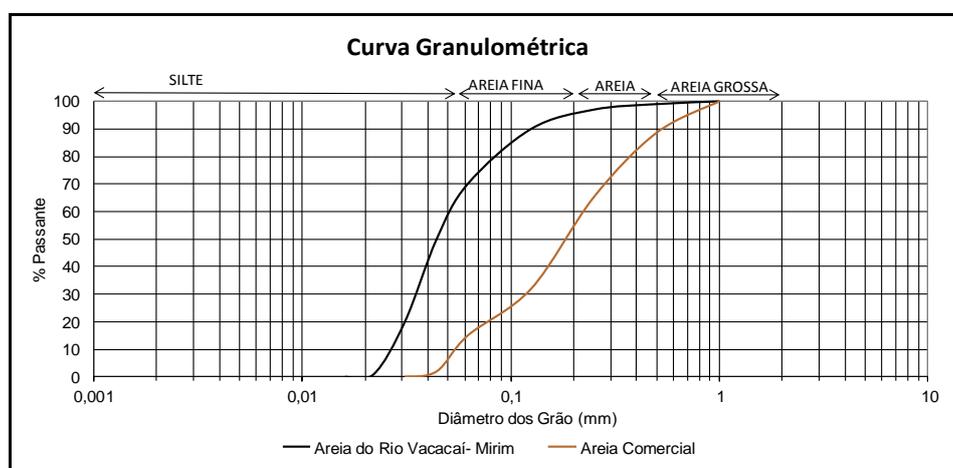


Figura 24 - Curvas Granulométricas das Areias.

Para a determinação das curvas granulométricas das areias, foram utilizados 1 kg de cada amostra e foram inseridas em peneiras ordenadas da maior para a menor de acordo com a malha passante: 1 mm, 500 µm, 250 µm, 230 µm e 125 µm. A agitação das peneiras foi realizada manualmente. O solo utilizado nos Grupos 1 e 2 é superficial, de horizonte A, coletadas na profundidade de 0 a 0,10 m, sem classificação, peneirado a 1 mm (para obter material fino) e inserido no reservatório. Os solos classificados, identificados nos Grupos 3 a 7 utilizados neste estudo foram fornecidos pelo Laboratório do Centro de Ciência dos Solos CCR - UFSM. As concentrações minerais de cada pedogênese estão apresentadas na tabela 7, abaixo:

Tabela 7 - Composição Mineral dos Solos.

Grupos	Classes dos Solos	Cidades de origem dos solos (RS)	Profundidade (m)	Areia Total (%)	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
3	Planossolo Háplico Eutrófico	São Gabriel	0 – 0,10	49,5	9,2	40,3	37,2	13,3
4	Argissolo Vermelho Distrófico	São Gabriel	0 – 0,10	72,4	16,3	56,1	15,6	12,0
5	Cambissolo Háplico Tb Distrófico	São Gabriel	0 – 0,10	40,6	6,9	33,7	44,6	14,8
6	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Santa Maria	0 – 0,10	51,77	11,41	40,36	31,44	16,79
7	Latossolo Vermelho Distrófico	Passo Fundo	0 – 0,10	46,4	8,5	37,9	28,6	25,0

A determinação da textura esta de acordo com a descrição EMBRAPA (2006). A determinação da granulometria foi feita por peneiras e pelo método da pipeta descrito pela EMBRAPA (1999). A visualização da composição de cada amostra de solo é apresentada na figura 25.

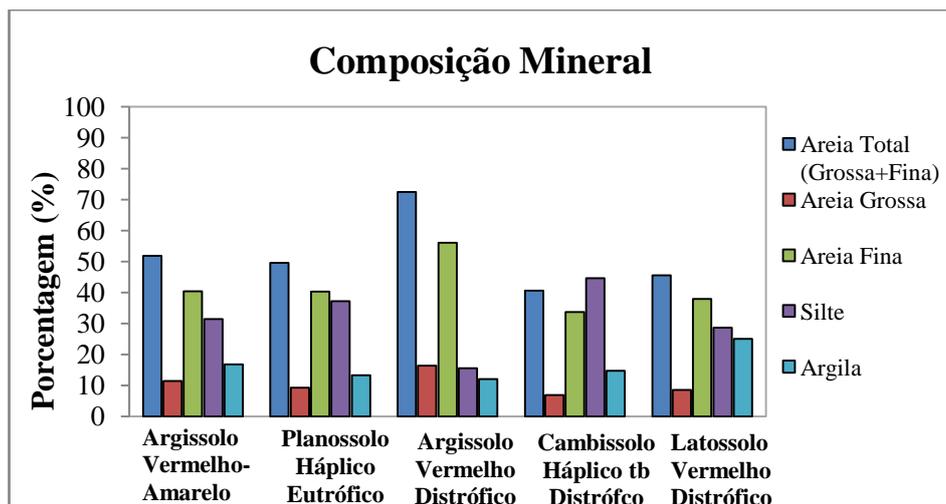


Figura 25 - Gráfico das frações granulométricas dos solos.

A figura 26 apresenta a identificação das misturas testadas, incluindo as areias e os solos designados em grupos, antes do processo de trituração e peneiramento para posterior inserção no reservatório.



(a) Areia Comercial – Grupo 1.



(b) Areia Rio Vacacaí Mirim- Grupo 2.



(c) Solo superficial Grupos 1 e 2



(d) Planossolo - Grupo 3.



(e) Argissolo Vermelho - Grupo 4.



(f) Cambissolo - Grupo 5



(g) Argissolo Vermelho Amarelo - Grupo 6



(h) Latossolo Vermelho - Grupo 7.

Figura 26 - Ilustrações das areias e solos utilizados como misturas no reservatório experimental.

Entre os solos utilizados como mistura no reservatório, o Planossolo, o Argissolo Vermelho e o Latossolo Vermelho apresentaram mais coesão estrutural, ou seja, a fração argilosa do solo está em forma de torrões ou blocos. Quando os solos não apresentam coesão, como areias e pedregulhos, destorroam-se facilmente ao serem cortados ou escavados (ALMEIDA, 2005).

A figura 27 exhibe o sistema completo com reservatório, bomba e ADP instalado. Foram definidos os pontos de coleta de água e sedimento para os Grupos 1 e 2, em 4 verticais para coleta das amostras, distantes de um dos lados do tanque de 0,20; 0,60; 1,00 e 1,20 m e todas à 0,20 m a partir da superfície livre com a realização de uma coleta em cada vertical (figura 27-a).

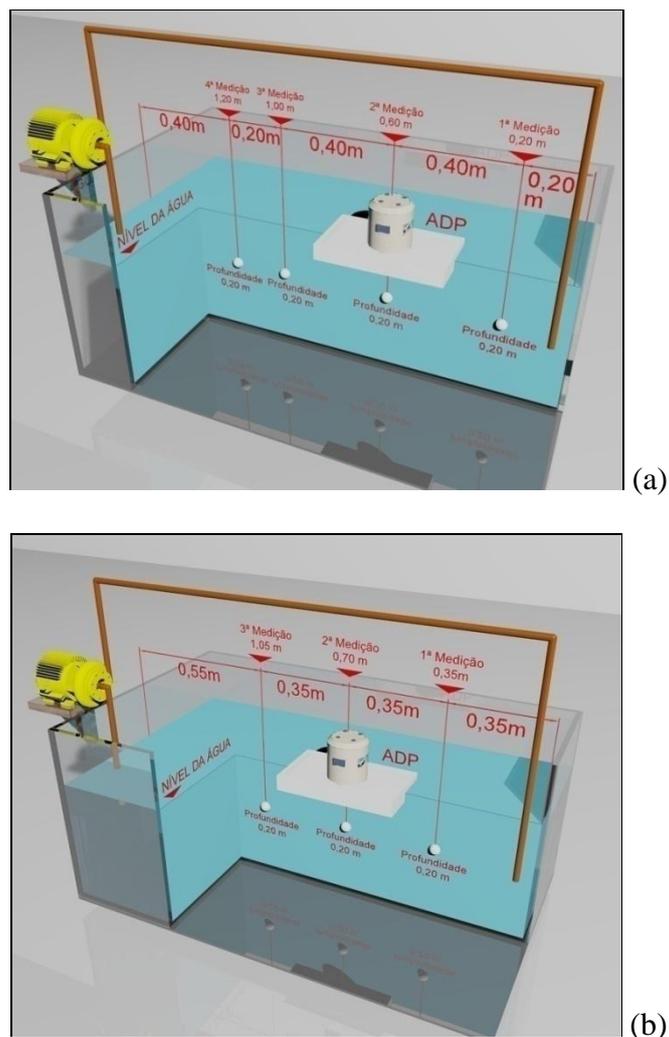


Figura 27 - Reservatório com a localização das verticais para os testes experimentais (corte longitudinal): (a) verticais para os grupos 1 e 2; (b) verticais para os grupos 3 ao 7.

Os procedimentos de agitação e coleta são os mesmos descritos para todos os grupos, porém para os Grupos 3 a 7 os números de verticais coletadas foram reduzidos, quatro verticais para três verticais no reservatório (visualizar a figura 27-b). As distâncias passaram a ser espaçadas de um dos lados em 0,35; 0,70 e 1,05m, todas as coletas foram realizadas a 0,20m a partir da superfície livre.

Todas as amostragens neste estudo foram realizadas a 0,20 m de profundidades a partir da superfície e após o desligamento da bomba de recirculação para evitar que bolhas de ar e ruídos pudessem afetar o eco medido durante as coletas. Este procedimento foi realizado neste estudo, pois Guerrero *et al.* (2011b) que relata que

existiam variações no eco medido com o acionamento da bomba, para os ADP de frequência 600 e 1200 kHz.

### 3.1.6 Determinação da CSS

Após as coletas das amostras de água e sedimentos, os recipientes foram encaminhados para o Laboratório de Sedimentos da UFSM para a realização da determinação da CSS, pelo método da filtração.

Os resultados das análises de CSS apresentaram valores até 376,9 mg/L, assim optou-se em manter o método de filtração, como padrão para todas as amostragens apesar de Carvalho (2008) recomendar este método para concentrações de até 200 mg/L. A membrana utilizada para filtração é constituída de microfibras de vidro, possui retenção nominal de 0,8 a 8,0 µm com 47 mm de diâmetro. A metodologia seguida para a determinação da CSS está descrita por Carvalho (2008).

### 3.1.7 Arquivos do ADP:

O software *River Surveyour Live* realiza o processamento de todos os dados recebidos pelos transdutores do ADP durante a travessia de uma margem a outra do rio gerando a seção transversal da seção. No reservatório o ADP foi posicionado sobre a mesma vertical de coleta, mantendo-o estacionário a modo de registrar os ecos no ponto de coleta do amostrador de água e sedimento.

Deixando o ADP estacionário sobre o ponto de coleta de água e sedimento foi possível obter os registros acústicos captados pelos transdutores, entre eles o transdutor estrategicamente posicionado. Esse transdutor é posicionado na direção do amostrador pontual, assim como citado no estudo de Dornelles (2009) que avaliou esta possibilidade. O transdutor estrategicamente posicionado para o Grupo 1 e 2 foi o nº 3 e para os grupos 3 a 7 foi o nº 4. A figura 28 ilustra o posicionamento dos transdutores do ADP.



Figura 28 – Transdutores do equipamento com numeração do nº 1 a 4 referem-se os transdutores inclinados a 25° e o nº 5 ao feixe acústico vertical.

Fonte: Sontek (2009) adaptado pelo autor.

O eco medido a 0,20 m de profundidade será relacionado com a CSS da amostra de água e sedimentos resultante da mesma profundidade. A figura 29 ilustra o perfil de ecos registrados pelo ADP durante as amostragens do Planossolo como mistura na água dentro do reservatório experimental.

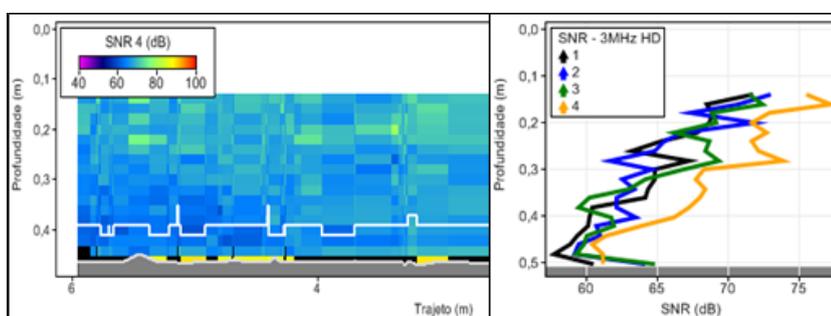


Figura 29 - Ecos gravados pelo transdutor 4 durante as amostragens do Planossolo.

### 3.2 Estudos realizados em campo

Neste item, serão abordados os procedimentos realizados na estação Menino Deus IV localizada no rio Vacacaí-Mirim em Santa Maria, incluindo os equipamentos

utilizados nas investigações, procedimentos dos ensaios e processamento dos dados coletados.

### 3.2.1 Bacia hidrográfica Vacacaí-Mirim

A bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim está localizada na região central do Estado do Rio Grande do Sul abrangendo áreas de cinco municípios, Santa Maria, Restinga Seca, Itaara, São João do Polêsine e Silveira Martins. Tem seu percurso natural em paralelo com a bacia hidrográfica do Vacacaí e em contexto geral, dentre a hidrografia do estado é considerada de pequeno porte, mas de grande importância econômica para a região.

Está situada entre as coordenadas geográficas  $53^{\circ}46'30''$  a  $53^{\circ}49'29''$  de longitude Oeste e  $29^{\circ}36'55''$  a  $29^{\circ}39'50''$  de latitude Sul, abrangendo uma área total de  $1.145,7 \text{ km}^2$  (BELING, 2010). A figura 30 apresenta a localização da bacia no perante a demarcação do estado do Rio Grande do Sul.

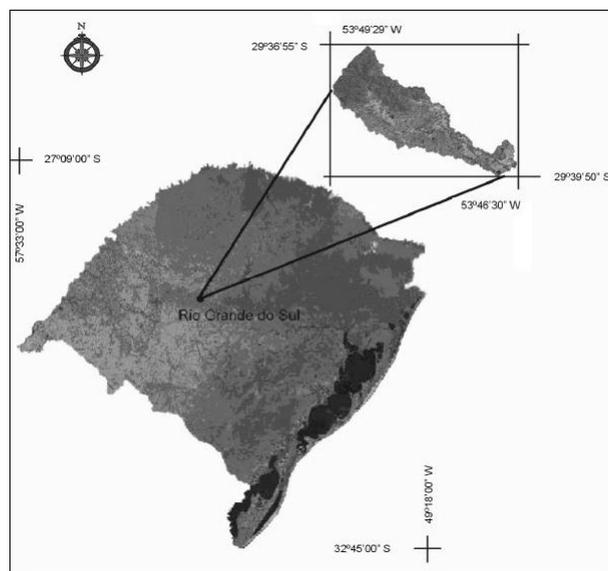


Figura 30 - Localização da bacia hidrográfica Vacacaí- Mirim.

Fonte: Casagrande (2004).

O rio Vacacaí Mirim tem sua nascente no município de Itaara, seguindo em direção à região do município de Santa Maria. No bairro Campestre do Menino Deus está localizado a estação fluviométrica e hidrossedimentométrica Menino Deus IV - MD IV (figura 31).



Figura 31 - Estação fluviométrica e hidrossedimentométrica MD IV.

A estação é monitorada pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHidros) da UFSM e está localizada nas coordenadas geográficas 29°39'29'' de latitude Sul e 53°47'24'' de longitude Oeste com área de drenagem de 18,796 km<sup>2</sup>.

Segundo Medeiros *et al.* (2012) a bacia hidrográfica MD IV é caracterizada como rural e possui indícios de degradação ambiental, devido a retirada da cobertura vegetal e agricultura em locais próximos aos cursos d'água, com predomínio de 53,56% de mata nativa e 37,26% de campo. Os principais solos encontrados nas proximidades da estação MD IV serão apresentados na tabela 8, segundo ANZOLIN & MUTTI (1988) *apud* Grutka *et al.* (2012).

Tabela 8 - Identificação e distribuição das unidades de solo ocorrentes na bacia hidrográfica Vacacaí Mirim de acordo com ANZOLIN & MUTTI (1988) *apud* Grutka *et al.* (2012).

<b>IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Neossolo Litólico Distrófico relevo ondulado	1,12	5,95
Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico	8,43	44,82
Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico	2,79	14,82
Cambissolo	0,72	3,97
Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios	5,91	31,46

A estação possui características divergentes para períodos com e sem precipitação. A formação geológica da bacia possibilita rápido escoamento na área e a conseqüentemente a descarga no rio. Esses fatores instigam a necessita de um levantamento de informações sobre as concentrações de sedimentos transportados neste rio durante estes períodos.

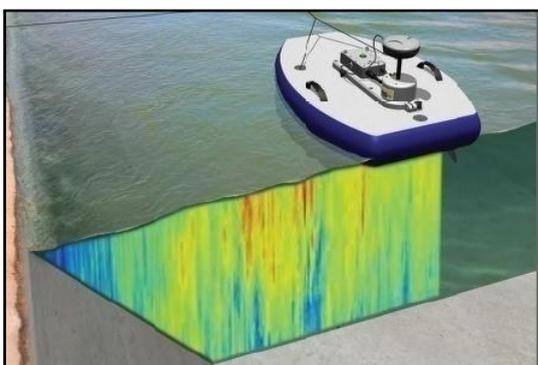
### 3.2.2 Acoustic Doppler Profiler – ADP

O ADP utilizado nas medições na estação fluviossedimentométrica MD IV é o mesmo citado anteriormente, descrito para medições em laboratório. Em campo o ADP foi montado na prancha *Hidroboard*, permanecendo com o PCM como fonte de energia e o sistema *Blootooth* transmitindo informações do ADP ao computador. Não houve necessidades de adaptações. A figura 32 ilustra o rio em períodos de cheias.



Figura 32 - Travessia com ADP na estação MD IV, durante períodos de cheias.

O software *River Surveyour Live* em sua face de abertura, quando o ADP é deslocado de uma margem a outra apresenta o perfil transversal da seção, composto por inúmeras verticais com registros de velocidades, conforme ilustrado na figura 33-a. Cada vertical é composta por inúmeras células que apresentam tamanhos e registros de ecos variados (figura 33-b). Com o perfil transversal do rio Vacacai Mirim será possível identificar as verticais e os ecos medidos para comparar com dados de turbidez.



(a) travessia na seção analisada



(b) inclinação da emissão dos ecos

Figura 33 - O ADP em funcionamento: (a) travessia na seção analisada; (b) emissão dos ecos inclinados.

### 3.2.3 Sonda digital- turbidez

A sonda digital responsável pelo registro de turbidez foi instalada dentro da água, nas proximidades da margem esquerda do rio, distante 1,20 m dessa margem e está localizada à cerca de 0,10 m do leito do rio para superfície. A sonda digital DTS 12 registra de forma programada a turbidez de 10 em 10 minutos e esses dados são armazenados no equipamento chamado de Data logger<sup>15</sup> HDL-1. Na figura 34 é possível identificar a localização da sonda do turbidímetro, devido à baixa profundidade da lâmina d'água na seção MD IV.



Figura 34 - Localização da sonda do turbidímetro na estação MD IV.

Neste estudo, considerou-se em todas as amostragens o posicionamento fixo da sonda a 0,10 m a partir do leito do rio, mesmo que em determinado período chuvoso possibilitasse alguma alteração na profundidade devido à movimentação das pedras no leito. Uma observação importante, a cada período pré-determinado e após os períodos de chuvas, os arquivos com dados de turbidez eram extraídos do Data logger para um computador e era verificado o estado de conservação da palheta rotativa da sonda

---

<sup>15</sup> Equipamento capaz de armazenar leituras realizadas por outros instrumentos de medição desde que estes transmitam a informação de alguma forma (analógica ou digital). Os dados adquiridos são visualizados posteriormente com a utilização de um computador com um software específico de processamento.

(verificação se havia galhos presos, etc.). A palheta rotativa é responsável pela limpeza da lente do sensor a cada 10 minutos.

A sonda DTS-12 possui faixa de medição de 0-1500 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) e uma resolução de 0,01 NTU. A precisão desse equipamento na faixa de 0-499,99 NTU possui um erro aproximado em média de 2%, e entre 500-1500 NTU o erro passa para a média 4% (PEREIRA, 2010). Duas etapas básicas foram realizadas para a calibração dos equipamentos, a primeira envolveu a utilização de uma substância padronizada, a Formazina, para o teste dos equipamentos e para confirmar a eficiência do sensor e da estabilidade. Já a segunda consiste na relação de sedimentos em suspensão e a turbidez registrada em campo.

Segundo o estudo de Grutka *et al.* (2012) o coeficiente de determinação encontrado entre a CSS e a turbidez na estação MD IV é satisfatória, com  $R^2$  de 0,997 o que possibilita a investigação da relação turbidez e ecos medidos. Esta correlação alta entre os dados de CSS e a turbidez incentivou esta pesquisa a buscar a correlação do eco medido e a turbidez.

Assim, foram correlacionados a turbidez (registro pontual) e os ecos registrados na célula referente à mesma localização da sonda DTS 12. As informações de turbidez registradas pela sonda DTS 12 são armazenadas pelo equipamento Data logger e posteriormente serão relacionadas diretamente com o eco captado pelos transdutores do ADP, resultantes do mesmo ponto.

## **4. RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao desenvolvimento deste estudo, abrangendo os dados obtidos pelos equipamentos acústicos e pelo amostrador pontual; às análises realizadas; a avaliação individual e coletiva dos transdutores do ADP durante as repetições de amostragens de areia, solo superficial não classificado e solo classificado; resultados de CSS, de turbidez e também as correlações realizadas.

### **4.1 Resultados das amostragens em laboratório**

As amostragens estão separadas em grupos de acordo com as concentrações dos materiais de mistura visando facilitar a compreensão dos resultados (de acordo com a tabela 6, pg.59). Nas tabelas serão apresentados os valores dos ecos medidos e as CSS de cada coleta proveniente dos materiais de mistura.

#### **4.1.1 Resultados das amostragens com areias e solo superficial - Grupos 1 e 2**

Inicialmente o ADP foi posicionado em dois pontos verticais no reservatório para a verificação da medição acústica (ecos medidos) para a água limpa. A água utilizada para o preenchimento do reservatório experimental em todos os testes é água proveniente do abastecimento da universidade. Os resultados encontrados nestes dois pontos apresentaram média de 10,5 e 11 dB para uma CSS da água de 3,02 mg/L.

Para as demais medições realizadas para todos os grupos a CSS inicial da água variava entre 4,05 a 6,00 mg/L. Os resultados obtidos das medições com o ADP e as CSS para os Grupos 1 e 2 são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados das medições para os Grupos 1 e 2.

Grupos	Nº das Coletas	Distância (m)	Profundidade (m)	Transdutores (dB)				Média dos Transdutores (dB)	CSS (mg/L)
				1	2	3	4		
1	1a	0,2	0,2	69	84	72	68	73,3	7,2
		0,6	0,2	54	58	55	63	57,5	10,6
		1,0	0,2	59	54	56	60	57,3	11,2
		1,2	0,2	58	61	59	56	58,5	9,8
	1b	0,2	0,2	60	64	61	64	62,3	97,8
		0,6	0,2	59	58	57	65	59,8	138,2
		1,0	0,2	62	65	59	67	63,3	125,8
		1,2	0,2	65	64	67	69	66,3	82,0
	1c	0,2	0,2	72	73	74	75	73,5	169,4
		0,6	0,2	71	68	69	71	69,8	376,9
		1,0	0,2	68	67	62	69	66,5	333,7
		1,2	0,2	64	65	66	68	65,8	296,3
2	2a	0,2	0,2	59	60	55	60	58,5	14,6
		0,6	0,2	65	65	62	67	64,8	9,8
		1,0	0,2	55	60	60	61	59,0	10,6
		1,2	0,2	51	51	51	57	52,5	11,6
	2b	0,2	0,2	59	60	55	60	58,5	144,0
		0,6	0,2	65	65	62	67	64,8	150,4
		1,0	0,2	55	60	60	61	59,0	132,8
		1,2	0,2	51	51	51	57	52,5	166,4
	2c	0,2	0,2	65	64	62	69	65,0	250,0
		0,6	0,2	65	64	64	70	65,8	333,2
		1,0	0,2	65	66	66	72	67,3	324,8
		1,2	0,2	66	69	71	70	69,0	328,8

Notas:

-A tabela 9 apresenta os resultados das amostragens com as areias e solo não classificado a localização das verticais e a profundidade de cada amostragem. Para auxiliar a compreensão da obtenção destes dados recomenda-se a visualização da figura 27, pg. 66;

- O Grupo 1 inicia com a coleta 1-a e resultante da inserção de areia comercial na água do reservatório, prosseguindo os testes com a mesma água de mistura e acrescentando volume de solo superficial, resultando na 1-b coleta e mais uma inserção de solo 1-c coleta;

- O Grupo 2 procede da mesma forma que foi realizada as amostragens no Grupo 1, porem a 2-a coleta utiliza a areia proveniente do Rio Vacacaí Mirim, seguindo com o acréscimo de solo superficial, 2-b coleta e mais uma inserção de solo 2-c coleta;

Para o processamento dos dados obtidos durante os testes, juntaram-se os resultados das três coletas de cada Grupo 1 e 2, apresentados na figura 35, e assim pode-



apresentou valores bem variados e não uniformes quando comparados os valores da média resultantes dos quatro transdutores.

Observando-se os valores das coletas 1-a e 2-a, resultantes de amostragens com as areias, notou-se que não houve variações significativas nos resultados de CSS, em função da diferença granulométrica das misturas, a média de 10,7 mg/L e os valores gravados do eco foram considerados relativamente baixos. A média do eco registrado do transdutor nº 3 foi de 58,8 dB, inferior ao registrado pela média total de 60,2 dB. O baixo valor de CSS deve-se ao fato de que o material testado, a areia, tende a se depositar no fundo do reservatório rapidamente sem agitação constante, permanecendo suspenso o material fino, como também relatado por Guerrero *et al.* (2011b).

As curvas granulométricas destas areias testadas indicam que a areia da coleta 1-a possui  $d_{50}$  de 0,045 mm e para 2-a é 0,2 mm. Apesar desta diferença granulométrica não houve variação entre as amostragens. O pesquisador Guerrero (2011a) encontrou coeficiente de determinação máximo de 0,9 para as relações entre eco e CSS para grãos de areias médias de 300  $\mu\text{m}$  (0,3 mm), ao contrário do que foi encontrado nos testes realizados nos Grupos 1 e 2, em que se obteve baixa correlação.

Nas coletas 1-b e 2-b, diferentemente das coletas citadas anteriormente, com o acréscimo de solo no reservatório houve boa uniformidade na dispersão do material no reservatório. As CSS elevaram-se consideravelmente nos quatro pontos coletados e a média superou 129 mg/L nas duas coletas. O retorno acústico apresentou média de 60,8 dB e a média do transdutor 3 foi de 59 dB, novamente apresentou valores inferiores aos obtidos pela média entre os quatro transdutores.

Prosseguindo-se com as coletas 1-c e 2-c, ainda nos grupos 1 e 2, a nova inserção de solo aumentou a concentração de sedimentos totais na água e assim esperava-se um incremento do eco, para um meio líquido mais concentrado (com mais sedimentos inserido). As médias das CSS passaram para 301,6 mg/L, resultando no aumento dos valores registrados pelo ADP, com média dos quatro transdutores de 67 dB e o transdutor 3 com média 66,8 dB.

Com o aumento da concentração de partículas finas presentes na água, ocorreram dispersões e absorções do eco no processo de reflexão para os transdutores

do ADP. Segundo Gamaro<sup>16</sup> as partículas maiores dispersam o eco e as partículas menores absorvem, este fato é intensificado quando o sedimento está floculado.

#### 4.1.2 Resultados das amostragens com os solos classificados - Grupos 3 a 7

Dando sequência aos testes, na tabela 10 são apresentados os resultados dos ecos medidos e CSS dos Grupos 3 ao 7, designados os diferentes solos classificados:

Tabela 10 - Resultados das medições para os solos classificados.

(continua)

Grupos	Nº das Coletas	Distância (m)	Profundidade (m)	Transdutores (dB)				Média dos Transdutores (dB)	CSS (mg/L)
				1º	2º	3º	4º		
3	3a	0,35	0,2	69	56	67	68	65,0	80,9
		0,7	0,2	64	52	68	72	64,0	77,1
		1,05	0,2	69	53	70	68	65,0	88,3
	3b	0,35	0,2	68	53	68	75	66,0	157,7
		0,7	0,2	69	53	69	73	66,0	167,3
		1,05	0,2	66	55	67	72	65,0	155,3
4	4a	0,35	0,2	65	47	62	64	59,5	93,5
		0,7	0,2	67	51	67	68	63,3	113,7
		1,05	0,2	61	45	64	66	59,0	101,9
	4b	0,35	0,2	63	65	62	61	62,8	199,5
		0,7	0,2	68	56	68	72	66,0	247,5
		1,05	0,2	67	63	70	70	67,5	263,5
	4c	0,35	0,2	65	47	70	71	63,3	91,5
		0,7	0,2	64	43	68	70	61,3	93,1
		1,05	0,2	64	46	62	70	60,5	118,5
	4d	0,35	0,2	66	50	70	71	64,3	245,5
		0,7	0,2	66	47	69	72	63,5	227,7
		1,05	0,2	67	49	70	69	63,8	199,7
5	5a	0,35	0,2	61	39	62	69	57,8	49,9
		0,7	0,2	64	49	63	67	60,8	58,1
		1,05	0,2	67	48	64	70	62,8	50,1
	5b	0,35	0,2	65	50	69	73	64,3	83,9
		0,7	0,2	63	49	69	75	64,0	95,9
		1,05	0,2	66	47	69	73	63,8	90,5

<sup>16</sup> Informações repassadas no minicurso “Medição de sedimento com ADP” apresentado pelo Engenheiro Paulo Everaldo Gamaro no Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos- X ENES, 03 a 07 de dezembro de 2012 em Foz do Iguaçu- PR.

(conclusão)

Grupos	Nº das Coletas	Distância (m)	Profundidade (m)	Transdutores (dB)				Média dos Transdutores (dB)	CSS (mg/L)
				1º	2º	3º	4º		
6	6a	0,35	0,2	60	39	61	68	57,0	66,1
		0,7	0,2	64	47	63	67	60,3	76,5
		1,05	0,2	65	47	64	70	61,5	83,1
	6b	0,35	0,2	65	50	69	73	64,3	172,1
		0,7	0,2	62	57	64	66	62,3	175,5
		1,05	0,2	65	57	69	73	66,0	206,9
7	7a	0,35	0,2	60	50	59	60	57,3	90,3
		0,7	0,2	62	42	64	56	56,0	56,1
		1,05	0,2	62	47	59	62	57,5	78,1
	7b	0,35	0,2	62	50	63	65	60,0	155,7
		0,7	0,2	65	51	66	67	62,3	189,1
		1,05	0,2	62	49	61	63	58,8	154,9
	7c	0,7	0,2	25	12	27	32	24,0	5,4
		1,05	0,2	22	15	25	30	23,0	4,8
		7d	0,7	0,2	65	50	68	70	63,3
	1,05		0,2	66	52	65	69	63,0	39,0
	7e	0,7	0,2	65	47	66	72	62,5	70,1
		1,05	0,2	64	50	67	70	62,8	57,2
7f	0,7	0,2	70	52	71	74	66,8	78,5	
	1,05	0,2	69	55	68	70	65,5	210,0	

Notas:

- A localização das verticais e a profundidade de cada amostra estão discretizadas na figura 27, pg. 66;
- Os resultados dos Grupos: 3, 4, 5, 6 e 7 referem-se aos resultados de coletas de dados após a inserção dos solos classificados: Planossolo, Argissolo Vermelho, Cambissolo, Argissolo Vermelho- Amarelo e Latossolo respectivamente. Para os Grupos 4 e 7 (Argissolo vermelho e Latossolo) foram realizadas repetições dos solos.

Os solos são diferenciados em grupos devido às diferentes concentrações de minerais e também a extração em locais distintos do estado do Rio Grande do Sul. O processamento dos dados obtidos para os Grupos 3 ao 7 serão apresentados na figura 36-a, a qual relaciona a média dos transdutores com os valores obtidos de CSS e a figura 36-b o transdutor estrategicamente posicionado e CSS. A análise dessa figura evidencia que o uso da média dos 4 transdutores é melhor do que utilizar apenas o valor do transdutor estrategicamente posicionado.

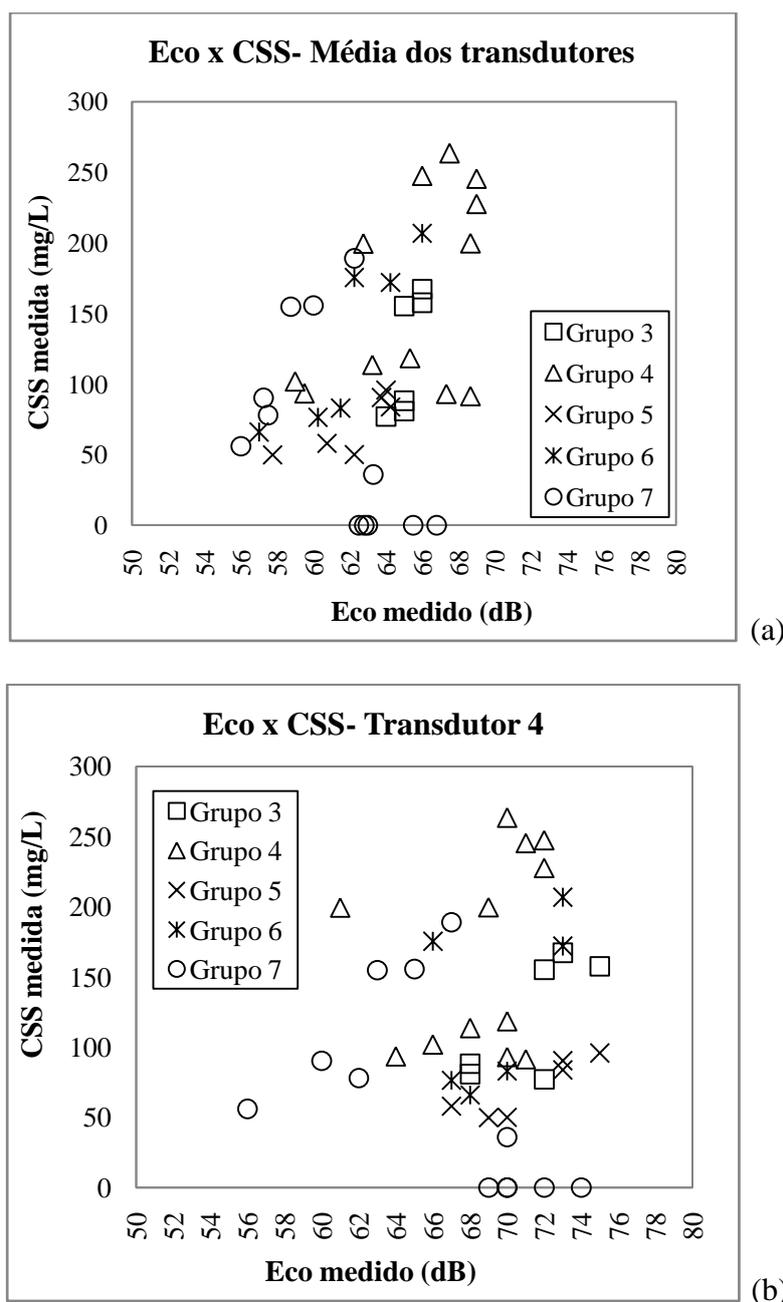


Figura 36 - Relação eco medido x CSS para os Grupos 3 a 7 (a) médias dos quatro transdutores; (b) transdutor estrategicamente posicionado.

O transdutor nº 2 durante as amostragens dos grupos 3 ao 7 apresentou registros acústicos inferiores aos demais transdutores e merece mais atenção nos próximos estudos. Entretanto, apesar dos valores baixos, neste trabalho optou-se em manter estas informações e juntá-los a média dos demais transdutores.

A temperatura da água medida antes dos testes variou de 22 a 25 °C. O Oxigênio Dissolvido (OD) medido variou entre 6,9 a 7,2 mg/L antes e depois das

coletas. A medição do OD foi importante para saber se não ocorria formação de micro bolhas, as quais poderiam interferir nos ecos medidos.

Observando-se os valores apresentados na figura 36-a, a média dos transdutores permaneceu entre 56 e 70 dB, valores inferiores aos registrados pelo transdutor 4, com ecos medidos entre 56 a 76 dB. Assim como os resultados dos Grupos 1 e 2, os valores registrados pelo transdutor estrategicamente posicionado não tem boa correlação com a CSS. O transdutor nº 4 apresentou os ecos medidos superiores em todas as amostragens realizadas no reservatório experimental.

As proporções de minerais que integram cada solo são distintas, e isso proporcionou que cada solo apresentasse uma dispersão diferente no reservatório. Para a inserção de 300g de solo no reservatório verificou-se uma faixa de CSS medida entre 49,8 mg/L (coleta 5-a) e 113,65 mg/L (coleta 4-a). Para os ensaios com 600g a mínima registrada foi de 155,3 mg/L (5-b) e a máxima de 263,5 mg/L (4-b). Os solos que apresentaram CSS elevadas também apresentaram o eco superior a 70 dB.

Essa dispersão das partículas minerais no reservatório e aumento do eco medido pode ser entendida de acordo com Moore *et al.* (2011), que descreve que o ADP registra basicamente as partículas primárias dos sedimentos em suspensão, neste caso, siltes com um pouco de argila e areia fina. Essas partículas finas foram registradas nas medições de Terabe (2003), que através da análise da granulometria em quatro verticais dos Rios Ivaí, identificou sedimentos com diâmetros  $d_{50}$  de 0,0149 à 0,0172 mm (diâmetro média 16,5  $\mu$ m), que também observou aumento do eco medido em função da concentração de cada vertical.

O Grupo nº 4 contém as maiores concentrações de areia (grossa e fina), já o Grupo nº 5 têm as elevadas porcentagens de silte e o Grupo nº 7 detêm a argila. No processo experimental, entre a etapa de mistura do solo na água e a etapa de coleta de amostras, que ocorre com a bomba de recirculação desligada, observa-se que os solos com maior percentual de areia tendem a sedimentar rapidamente, o que resulta em valores mais baixos de CSS para uma mesma fração de solo inserido no reservatório. Os resultados das coletas nº 7-d, apresentaram média acústica de 63,2 dB. Esse registro acústico é superior a coleta nº 7-e que a média foi de 62,7 dB onde houve um volume maior de misturas. Possivelmente este valor anômalo em relação às demais amostras, deve representar algum erro experimental, já que para as demais coletas do Grupo 7, há um incremento de CSS e eco para maiores percentuais de solo inserido.

Dentre os grupos analisados, o Grupo 4 apresentou as maiores CSS, média de 102,0 mg/L para concentrações de 300 g e 230,6 mg/L para 600 g. As coletas 4-c e 4-d são repetições das coletas 4-a e 4-b. Essas repetições com as mesma condições de processamento e coletas dos dados acústicos e de concentrações indicam resultados semelhantes. O eco registrado pelo ADP não depende somente da CSS, mas também de outras propriedades do sedimento, neste caso a distribuição granulométrica das partículas no reservatório. De acordo com Gamaro (2008) o formato e a dimensão das partículas presentes em águas podem influenciar na reflexão do eco para o ADP.

Entre as coletas que apresentaram possíveis variações, destacam-se os resultados obtidos das coletas nº 7-d. Nesta coleta a média acústica registrada foi de 63,2 dB e estes valores de ecos medidos são superiores aos registrados durante a coleta nº 7-e, em que a média é de 62,7 dB. A coleta 7-e resulta de uma amostragem com volume maior de inserção de mistura. Possivelmente este valor anômalo em relação às demais amostras, deve representar algum erro experimental, já que para as demais coletas do grupo 7, há um incremento de CSS e eco para maiores percentuais de solo inserido.

O transdutor nº2 durante as amostragens dos grupos 3 a 7 apresentou alterações nos registros acústicos, fornecendo ecos medidos inferiores aos registros dos demais. Entretanto, apesar dos valores baixos, neste trabalho optou-se por manter estas informações e juntá-los a média dos transdutores. Os ecos medidos pelo transdutor podem ser visualizados na tabela 11. De acordo com Guerrero *et al.* (2011a) um ADP de uma frequência, não apresentará variação do retorno do eco medido em função do tamanho dos grãos na água. Uma possibilidade de avaliação seria a aplicação de ADP com frequências diferentes para verificar este comportamento, como foi citado na pesquisa de Guerrero *et al.* (2011b), no qual realizou testes com duas frequências para as mesmas granulometrias.

Analisando a média dos ecos dos transdutores e do transdutor estrategicamente posicionado, verificou-se que houve o comportamento mais uniforme entre os dados apresentados nas médias dos ecos dos transdutores, as quais serão utilizadas para os ajustes equacionais.

#### 4.1.3 Equações de ajustes para as amostragens de CSS

Antes das aplicações das equações, é necessária a seguinte compreensão, os números das coletas realizadas para cada volume de mistura no reservatório seriam como repetições para as amostragens, exemplificando: no Grupo 1 e 2 realizaram-se 4 coletas em pontos diferentes para um volume específico, ou seja, 4 repetições coletadas. Assim, para o ajuste de equações, optou-se pela média das repetições em todos os grupos.

Os dados foram analisados e ajustados a várias equações com linhas de tendências que pudessem melhor representar as condições reais aos valores medidos. As equações que apresentaram boa correlação entre os dados são o ajuste linear e o ajuste exponencial.

A primeira equação a ser apresentada é linear. As correlações entre as CSS calculadas e as CSS medidas referente à aplicação equação linear, apresentaram 52% dos dados entre as faixas restritivas do Fator 1,5. O Fator 2,0 detém 76% e o Fator 3,0 mais abrangente, 81%. A equação linear ( $R^2$  de 0,429) proposta na figura 37-a, é descrita da seguinte forma na equação 11:

$$C_i = 18,304 * E_{ci} - 1020,3 \quad (11)$$

Sendo:

$C_i$ = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{ci}$ = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB);

Iniciando a apresentação da aplicação destes ajustes, a figura 36-a apresenta o ajuste linear e a figura 37-b a correlação entre as CSS calculadas e CSS medidas.

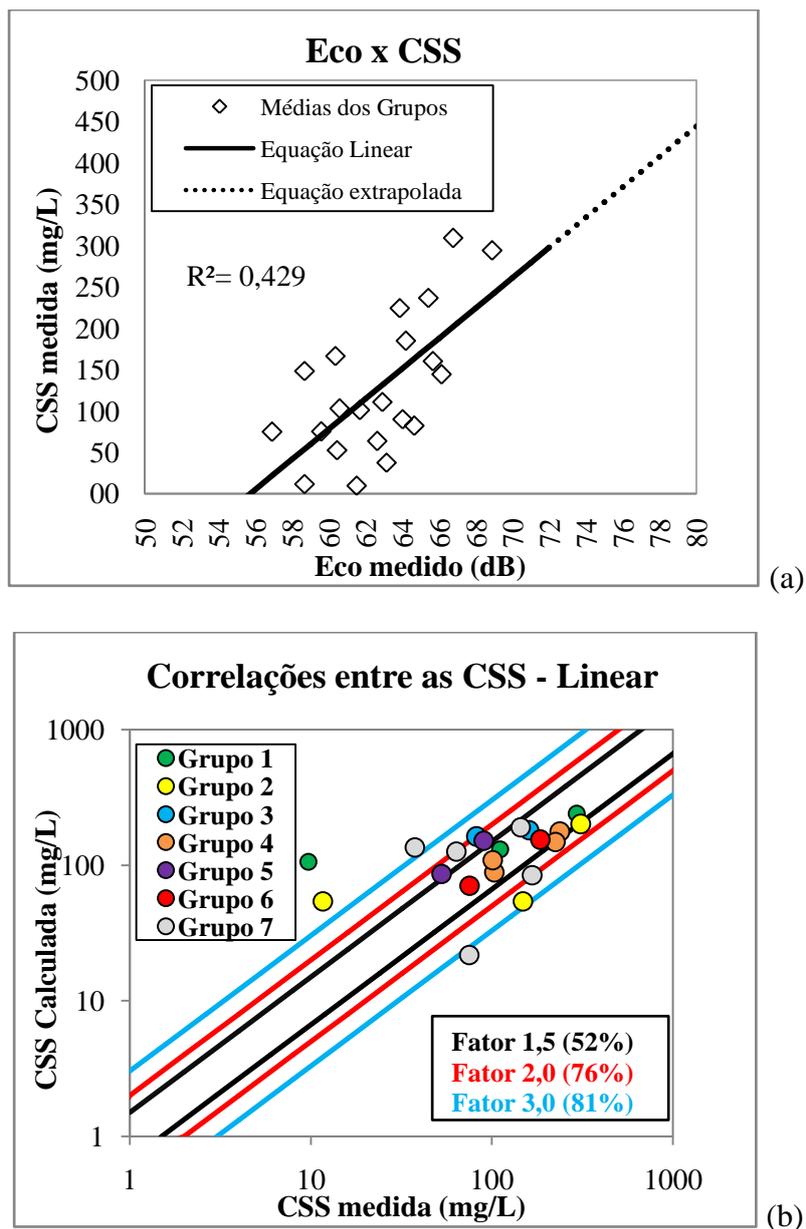


Figura 37 - Curva de ajuste para os Grupos 1 a 7 (a) Equação linear; (b) Correlação entre CSS medida e calculada para os Fatores: 1,5; 2,0 e 3,0.

Os fatores 1,5; 2,0 e 3,0 referem-se ao numero de vezes que a CSS calculada será superior ou inferior comparada a CSS medida, ou seja, para o fator 1,5 o valor calculado não deve ultrapassar 1,5 vezes o valor medido e sucessivamente para os demais fatores 2,0 e 3,0.

A segunda equação proposta nesta etapa é a equação exponencial apresentada na figura 38. A aplicação da equação exponencial resulta em um coeficiente de determinação de 0,285. Este resultado de  $R^2$  é inferior ao apresentado pela equação

linear com  $R^2$  de 0,429 . A equação exponencial apresentada na figura 38-a é descrita na equação 12.

$$C_i = 0,003 * \exp^{0,160 * E_{ci}} \quad (12)$$

Sendo:

$C_i$ = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{ci}$ = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB);

As correlações encontradas entre as CSS calculadas e as CSS medidas, resultantes da aplicação da equação exponencial apresentaram 48% dos dados entre as faixas restritivas do Fator 1,5 e para o Fator 2,0 apresentou 67%. Os registros destes dois fatores são 4% e 9% respectivamente, inferiores aos valores resultantes da equação linear. O Fator 3,0 mais abrangente deteve 86% dos dados.

A comparação entre esses dois ajustes destaca-se o ajuste linear, com os resultados mais satisfatórios, como também observados por Dornelles (2009). Verificou-se que os grupos que apresentam discrepância entre a CSS calculada e a medida foram os Grupos: 1; 2 e 7. A CSS calculada para as amostragens 1-a e 2-b manteve-se fora do Fator 3,0 indicando que há diferenças entre os valores medidos e calculados. Alguns valores calculados foram superiores e inferiores proporcionalmente a três vezes a CSS medida. Essa variação encontrada nos resultados necessita de mais atenção para estas misturas inseridas no reservatório, possibilitando que o eco medido possa estimar a CSS.

Na figura 38-a verifica a tendência dos dados pelo ajuste exponencial e a figura 38-b, a correlação entre as CSS calculadas e CSS medidas.

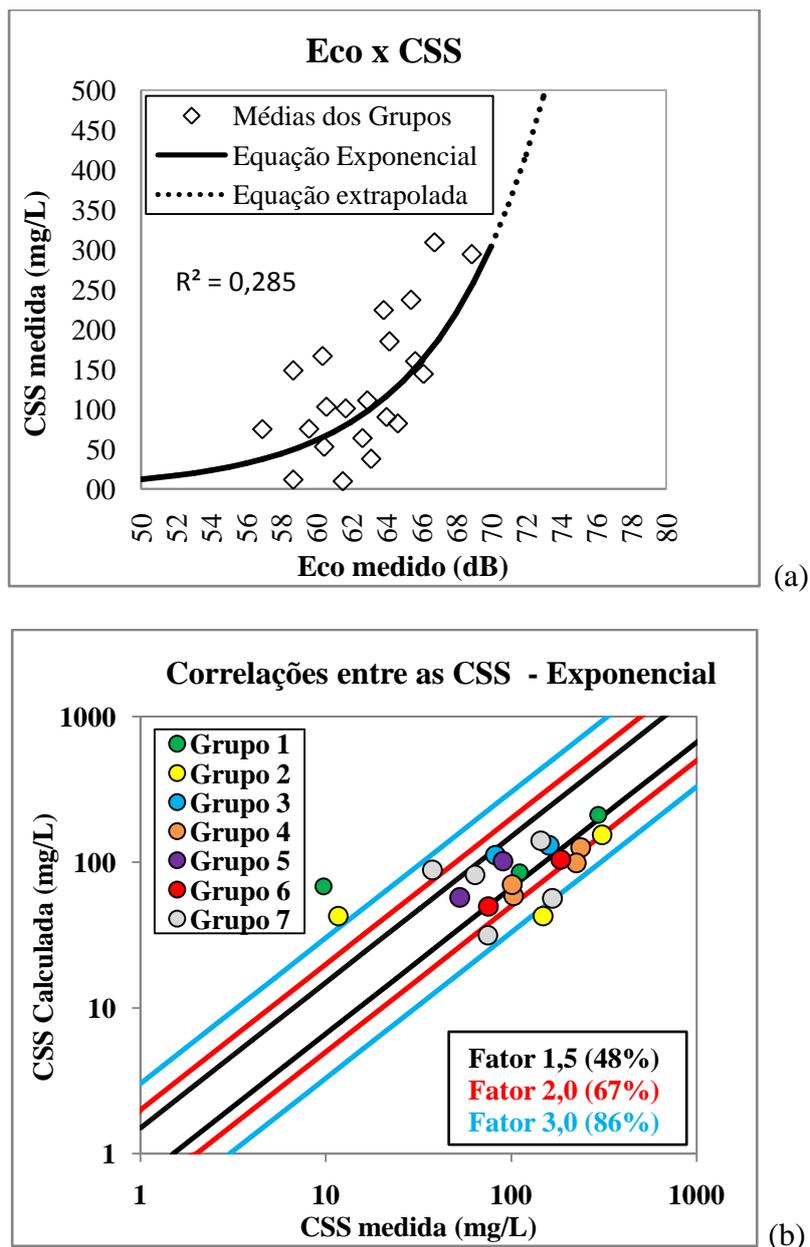


Figura 38 - Curva de ajuste para os Grupos 1 a 7 (a) Equação exponencial; (b) Correlação entre CSS medida e calculada para os Fatores: 1,5; 2,0 e 3,0.

Em sua pesquisa, Terabe (2003) considerou o Fator 2,0 como a faixa de restrição de análise para os dados obtidos nos rios Piquiri e Ivaí (PR), onde aplicou as equações de Deines (1999) integrada a um coeficiente de ajuste na equação (KM) sugerido por Mayerle & Poerbandono (2002). Aplicando a equação de Deines (1999) observou 86% das amostragens dentro do Fator 2,0 e quando esta equação foi ajustada a um KM, alcançou 96% dos dados compreendidos dentro desta faixa. Neste estudo, o ajuste linear possibilitou 76% dos dados entre a faixa representada pelo Fator 2,0 e na

equação exponencial 67%. Para o Fator 3,0 a equação exponencial apresentou 86% e a equação linear 81% dos valores totais.

Para Dornelles (2009), que desenvolveu sua pesquisa no rio Jacuí (RS) o método de Deines (1999) apresentou as piores estimativas para a concentração de sedimentos, sendo que o ajuste por este método resultou na estimativa de valores, muitas vezes fora do Fator 3,0. O autor destacou também, que a melhor correlação entre seus dados é a aplicação direta entre eco medido e a CSS. A correlação encontrada entre a CSS medida e a CSS calculada, estão entre o Fator 1,5 com bons ajustes, com valores percentuais superiores aos encontrados neste estudo, que foi com as faixas restritivas do Fator 1,5 representando 48% para exponencial e 52% linear.

Apesar do número limitado de amostragens realizadas nos grupos, as informações mostradas sobre a relação entre o eco medido e a CSS indicam que há uma correlação entre CSS e o eco do ADP. Observa-se que à medida que aumenta a concentração de sedimentos também aumenta o eco captado pelo ADP.

## **4.2 Resultados das amostragens em campo**

As amostragens realizadas em campo estão separadas de acordo com as datas de medição, juntamente, com os registros de profundidade da lâmina líquida da seção, informações de turbidez e ecos medidos individualmente e a média dos transdutores.

### **4.2.1 Dados de turbidez e ecos medidos**

A partir de quatro medições realizadas com o ADP na estação fluviométrica MD IV, pode-se comparar os valores registrados do eco medido com os valores de turbidez, conforme pode ser observado na tabela 11. Os registros dos dados apresentados são provenientes de períodos distintos, com e sem precipitações, em que é possível verificar os comportamentos distintos de turbidez em relação às cotas.

Tabela 11 - Resultados das medições de turbidez e eco

Data das medições com ADP e a sonda DTS 12	Altura da Sonda a partir do leito do rio (m)	Profundidade Total registrada pelo ADP (m)	Registros de Turbidez (NTU)	Transdutores (dB)				Média dos Transdutores (dB)
				1°	2°	3°	4°	
22/11/2011	0,1	0,32	10,0	47,3	48,9	50,7	47,4	48,6
	0,1	0,30	9,6	48,6	46,9	45,9	48,9	47,6
	0,1	0,28	9,6	51,8	48,7	47,1	49,8	49,4
	0,1	0,29	8,9	48,8	48,8	48,3	47,3	48,3
	0,1	0,29	8,8	45,9	46,4	44,7	50,8	47,0
24/01/2012	0,1	0,33	71,5	61,0	61,8	61,4	64,2	62,1
	0,1	0,33	60,8	64,1	64,1	63,7	65,2	64,3
	0,1	0,33	60,0	60,0	61,9	61,4	62,0	61,3
	0,1	0,33	38,8	59,6	62,3	60,3	65,8	62,0
30/05/2012	0,1	0,49	50,0	71,0	74,0	68,0	75,0	72,0
	0,1	0,48	53,1	70,0	73,0	71,0	76,0	72,5
	0,1	0,34	53,1	76,0	76,3	76,1	79,6	77,0
	0,1	0,43	50,0	69,0	72,0	69,0	72,0	70,5
	0,1	0,49	53,7	68,0	71,0	71,0	73,0	70,8
	0,1	0,37	48,5	83,1	79,9	70,0	74,0	76,8
	0,1	0,36	51,0	80,1	82,9	79,1	80,0	80,5
	0,1	0,35	47,5	75,9	78,6	77,6	81,1	78,3
	0,1	0,36	47,5	69,2	66,2	64,4	78,2	69,5
	0,1	0,35	47,5	72,2	77,3	79,9	86,8	79,1
02/07/2012	0,1	0,94	12,1	51,4	52,1	55,2	57,9	54,2
	0,1	0,94	14,1	52,8	58,3	49,7	58,0	54,7
	0,1	0,95	45,0	50,5	53,5	57,0	58,6	54,9

Os registros de turbidez variaram entre 8,8 e 71,5 NTU, as variações dos ecos medidos estão entre 47,0 a 80,5 dB e as cotas entre 0,28 e 0,95 m. Na data 30/05/12 foram realizadas várias medições com o ADP e com o turbidímetro, iniciando com as cotas entre 0,49 m e finalizando a medição com cota de 0,35 m (cota de recessão da vazão do rio). Os ecos captados pelo equipamento variaram entre 68,5 e 80,5 dB.

Para esta mesma data, percebe-se de acordo com a recessão volumétrica do rio, que os registros dos ecos medidos também diminuem, indicando que a concentração de sedimentos presentes na água está influenciando na passagem de luz e o resultando também na diminuição da turbidez. Entre as datas apresentadas, no dia 02/07/2012 foram registradas cotas do rio bem acima das cotas das outras medições, entre 0,94 e 0,95 m. Já os registros de turbidez apresentaram nessas duas cotas, valores bem distintos de 12,1 e 45,0 NTU para uma média de 54,0 dB, sem muita dispersão. Essa diferença é atribuída possivelmente a alguma falha no processo experimental, como a

presença de bolhas da água. Ressalta-se que para as demais campanhas, não se observou essa discrepância de valores.

A partir da instalação de sondas de turbidez na estação MD IV no rio Vacacaí Mirim, tornou-se possível registrar a variabilidade temporal dos fluxos de sedimentos suspensos. Entretanto a sonda registra informações de turbidez em um único ponto e pode gerar incertezas de dados, quando estes são estimados para toda a seção, principalmente quando o rio apresenta perfil de velocidades diferentes (MOORE *et al.*, 2011).

Outra observação para esta etapa, sendo ressaltada por Guerrero *et al.* (2011b) que tanto a sonda de turbidez e os transdutores do ADP, sofrem interferências nas coletas de dados quando há presença de bolhas de ar na água. Este fator durante as medições pode afetar diretamente os resultados, o que pode explicar os problemas na avaliação da turbidez no dia 02/07/2012, em que se registraram em cotas semelhantes, valores de turbidez de 12 e 45 NTU.

#### 4.2.2 Equações de ajustes para as amostragens de turbidez

As aplicações dos ajustes para os dados de turbidez diferem da etapa anterior realizada em laboratório para CSS. Neste caso, mantiveram-se todos os dados medidos originais, sem o uso das médias, ou seja, valores de turbidez para uma mesma posição representando a repetição da medição na mesma posição para diferentes intervalos de tempo. Todos os dados obtidos foram ajustados e resultaram em equações para estimar a turbidez em função do eco medido.

O primeiro ajuste apresentado é a equação 13, refere-se ao ajuste linear entre a turbidez e o eco medido apresentado na figura 39-a ( $R^2$  de 0,582):

$$Tu = 1,366 * Eci - 48,23 \quad (13)$$

Sendo:

Tu= Turbidez estimada na célula número i (NTU);

Eci= intensidade do eco correspondente à célula de número i (dB);

A figura 39-a apresenta a equação linear ajustada aos dados de eco medido e de turbidez, também é ilustrada uma linha tracejada indicando o possível comportamento dos dados para valores de turbidez mais altos que aos dados medidos. Já na figura 39-b, pode-se verificar o bom ajuste obtido pela equação quando comparadas a turbidez medida com a calculada em função do eco registrado pelo ADP.

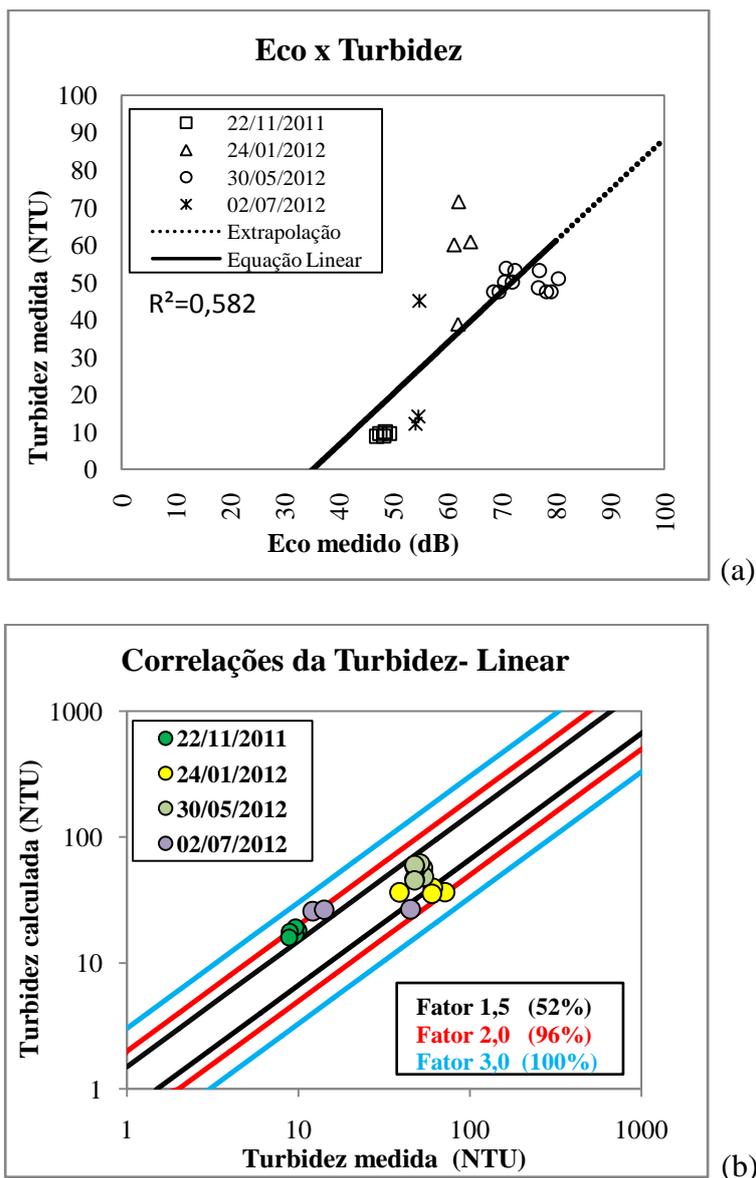


Figura 39 - Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste linear (b) correlação dos dados obtidos de turbidez medida e calculada.

Outra equação ajustada para estes dados é a exponencial apresentada na figura 40. A equação exponencial apresentou coeficiente de determinação de 0,670. Esse ajuste exponencial descrito na figura 40-b é exibido na equação 14.

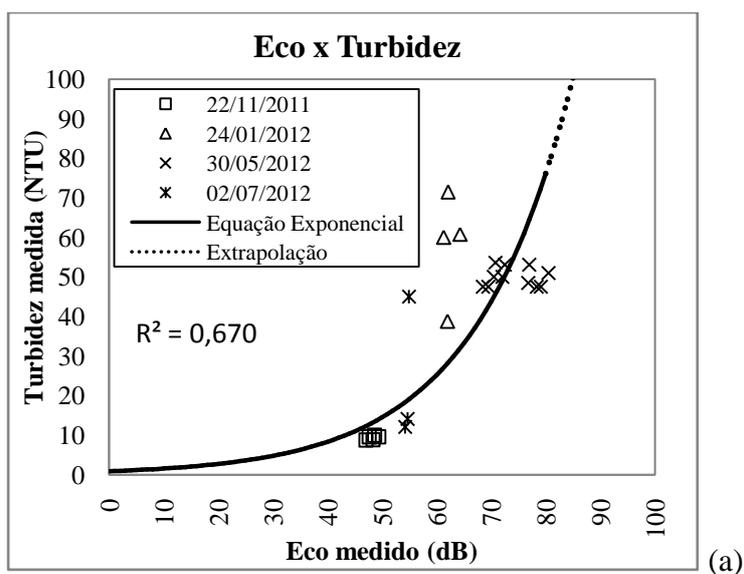
$$Tu = 0,919 * \exp^{0,055 * Eci} \quad (14)$$

Sendo:

Tu= Turbidez estimada na célula número i (NTU);

Eci= intensidade do eco correspondente à célula de número i (dB);

Esta equação permite calcular valores superiores a 100 NTU para a turbidez. A figura 40-a apresenta a aplicação do ajuste exponencial e a figura 40-b a correlação entre a turbidez medida e a calculada.



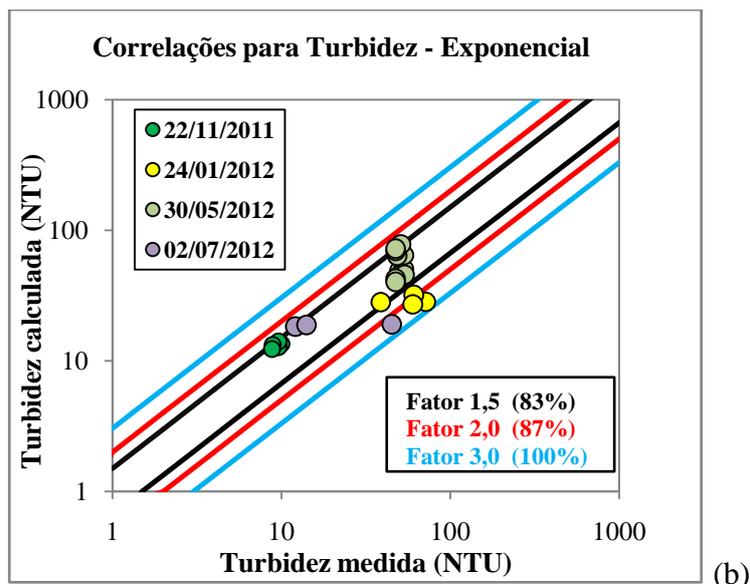


Figura 40 - Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste exponencial (b) correlação dos dados obtidos de turbidez verdadeira e calculada.

Os ajustes aplicados aos dados, linear e exponencial, apresentaram boa correlação entre os valores calculados e medidos de turbidez com coeficientes de determinação de 58% e 67% respectivamente. As figuras, 39-a e 40-a apresentam após as curvas, linhas tracejadas para representar as extrapolações acima dos valores máximos medidos para as equações (linear e exponencial). A turbidez máxima registrada para o ajuste linear é 65 NTU e para o ajuste exponencial 80 NTU. Os valores máximos medidos de turbidez em alguns estudos encontram-se entre 80 NTU para Chanson *et al.* (2008) e 130 NTU para Grutka *et al.* (2012), indicando que as equações devem ser aplicadas para determinados valores limitados de turbidez.

As extrapolações (linhas tracejadas) representadas nos gráficos necessitam de investigações mais detalhadas e este fato é reforçado por Moore *et al.* (2011) que relata que em períodos chuvosos ou de inundações, podem ocorrer altas concentrações de sedimentos transportados em rios, indicando a necessidade de mais informações de turbidez para diferentes cotas e concentrações de sedimentos.

A partir das correlações entre a turbidez medida e a estimada, todos os valores permaneceram dentro das faixas de restrições. Para a equação linear, as medições da data de 30/05/2012 estão 100% dos dados na faixa mais restritiva no Fator 1,5. Já para as datas 22/11/2011, 24/01/2012 e 02/07/2012 a turbidez calculada manteve-se em todas as faixas restritivas, com 96% dos dados na faixa do Fator 2,0 e 100% presentes no

Fator 3,0. A correlação encontrada para o ajuste exponencial apresenta novamente bons resultados das medições referentes à data de 30/05/2012 e uma média geral de 83% dos valores calculados para o Fator 1,5. A média de correlação para os demais fatores são de 87% para o Fator 2,0 e 100% para o Fator mais abrangente, 3,0.

Guerrero *et al.* (2011b) utilizou-se de um aparato experimental de laboratório para realizar medições com um ADP (eco) e um turbidímetro, para quatro granulometrias e volumes diferentes de areias (finas e grossas) semelhantes as areias do rio Paraná, local onde Guerrero *et al.*, 2011a, iniciou suas pesquisas relacionadas ao tema. Os autores obtiveram bons resultados correlacionando estes valores para dois ADP testados com frequências diferentes. O ajuste e aplicação da equação obtida através dos valores registrados de turbidez possibilitaram reproduzir dados semelhantes aos medidos.

Esta pesquisa verificou boas correlações entre o eco medido e a turbidez ( $R^2$  de 0,582 e 0,670). Isso também foi verificado por Guerrero *et al.* (2011b) com o uso de ADP com diferentes frequências em laboratório e por Chanson *et al.* (2008) para um ADV e medições em campo.

Grutka *et al.* (2012) relacionaram a CSS com a turbidez e obtive através de ajuste linear, um coeficiente de determinação 97%, no rio Vacacaí-Mirim na estação MD IV. Nesta mesma estação, este trabalho buscou avaliar a utilização de ecos medidos e os dados de turbidez, apresentando até então, resultados satisfatórios para a correlação do eco medido e turbidez, apesar das poucas amostragens destes equipamentos em um mesmo período, o que instiga a novas pesquisas sobre este tema.

## 5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi desenvolvida em duas etapas distintas. A primeira etapa consistiu na realização de coletas em laboratório, através de simulações artificiais de sedimentos em suspensão proveniente de misturas de diferentes areias e solos, comparadas às medições acústicas simultâneas de um ADP. A partir desta etapa da pesquisa pode-se concluir:

- A configuração métrica do aparato experimental possibilitou a geração artificial de CSS para diferentes quantidades de solos inseridos (areias e solos);
- As medições realizadas com as areias, comercial e de leito do rio Vacacaí Mirim (Grupo 1 e 2), merecem uma abordagem mais abrangente nos próximos estudos, já que os resultados conduzidos por Guerrero *et al.* (2011a) apresentaram boas correlações e neste estudo, foram baixas comparando aos demais testes.
- As melhores correlações entre eco e CSS ocorreram para os testes com os solos superficiais, Planossolo, Argissolo Vermelho, Cambissolo, Argissolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho (Grupos 3 ao 7);
- Verificou-se que o aumento do retorno acústico captado pelo ADP está associado ao aumento na concentração de sedimento disperso no reservatório;
- A variação de CSS entre os grupos possivelmente esteja ligada a quantidade de minerais em cada solo;
- A leitura individual do transdutor estrategicamente posicionado não apresentou resultados satisfatórios, sendo a média dos quatro transdutores mais representativos.
- Os ajustes das equações entre os dados de CSS medidas e calculadas, indicaram a permanência de 76% para equação linear e 67% para exponencial entre as faixas restritivas do Fator 2,0. Significa que as CSS calculadas a partir do eco não ultrapassam 2 vezes para mais ou menos o valor da CSS medido, indicando que há relação entre o eco medido e a CSS, entretanto há necessidade de maiores investigações.

A partir dessas observações resultantes do desenvolvimento da pesquisa em laboratório, pode-se concluir que as metodologias aplicadas ao eco medido pelo ADP,

podem ser utilizadas para estimar as concentrações de sedimentos em suspensão no reservatório experimental, entretanto, são necessários estudos adicionais, conforme mencionados nas recomendações.

A segunda etapa investigativa, realizada em condições naturais de escoamento, buscou relacionar as medições com o ADP com a turbidez medido a 0,10 m a partir do fundo da seção do rio Vacacaí Mirim. A partir desta etapa da pesquisa pode-se concluir:

- A correlação entre o eco medido e a turbidez foi satisfatória, verificando-se a tendência de aumento de eco de retorno com o aumento da turbidez;
- Os ajustes das equações entre os dados de turbidez medidos e calculados indicaram a permanência de 96% para equação linear e 87% para exponencial entre as faixas restritivas do Fator 2,0. Significa que a turbidez calculadas a partir do eco não ultrapassam 2 vezes para mais ou menos o valor da turbidez medida, indicando que há relação entre os dados, entretanto há necessidade de maiores investigações.
- A partir destas informações é possível concluir que a comparação do eco medido pelo ADP com a turbidez é bastante promissora. Outros pesquisadores têm avaliado a relação entre a turbidez e a CSS, visando suprimir as coletas de água e sedimento. Os bons resultados encontrados nessa etapa do trabalho indicam que é possível estimar a turbidez, a partir do eco medido.

Assim, pode-se concluir que há indícios de uma relação direta entre o eco e a CSS, já que há estudos com bons resultados da relação entre turbidez e CSS (GRUTKA *et al*, 2012) e aqui nesse trabalho, se verificou boa correlação também entre eco e turbidez.

Ressalta-se que os resultados apresentados nesse trabalho representam uma contribuição ao estudo voltado a relacionar as medições feitas com o ADP com as CSS, sendo que os dados experimentais obtidos não permitem generalizar um comportamento para estimativa de CSS. Acredita-se que o monitoramento contínuo de uma estação fluviométrica, permitirá a construção de curvas chave que relacionem o eco com turbidez e CSS, válida para esta estação.

## 6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste estudo foi verificado que à medida que aumenta a concentração de sedimentos na água, ocorre o aumento do retorno acústico registrado pelo ADP. Os testes mostraram-se satisfatórios para as misturas testadas em laboratório. Essa análise serve como estímulo para o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas ao tema, possibilitando futuramente a facilidade aos hidrometristas nas medições em campo. Assim, a utilização do ADP para unir fatores como a medição de vazão e quantificação de sedimentos representaria um grande avanço relacionado às técnicas convencionais.

Entretanto algumas recomendações podem ser acrescentadas em estudos futuros relacionados ao tema que não foram abordados na elaboração desta pesquisa. Durante o seu desenvolvimento, envolvendo as práticas laboratoriais, em campo e os processamentos dos dados, alguns aspectos importantes foram observados e serão descritos sequencialmente.

- A realização de pesquisas em um reservatório experimental com dimensões maiores, possibilitando simular um curso hídrico, avaliando diferentes velocidades e áreas, com inserção de mais concentrações de sedimentos ou misturas;
- O ADP testado possui frequência única, não identifica as variações acústicas em função do tamanho da partícula (sedimento). Assim, o uso de equipamentos de multi-frequências (talvez vários ADP com frequências diferentes) possibilitaria avaliar a mudança acústica e granulometria de mais materiais de mistura.
- A possibilidade de desligamento parcial de alguns transdutores, assim como mencionado por Moore *et al.*, (2011), direcionando somente um transdutor ao ponto de coleta de água e sedimentos, essa medida evitaria a interferência das paredes na reflexão do sinal acústico;
- A necessidade de um amostrador pontual para a realização das coletas de água e sedimentos, nas condições estudadas. Apesar da adaptação de uma obstrução no bico do coletor, ter funcionado bem, em medições de rios a presença de velocidades e em maiores profundidades, a obstrução não apresentará os mesmos comportamentos;

- A realização de mais medições experimentais com as mesmas misturas, areia e solo classificado auxiliará diretamente na elaboração e nos ajustes das equações para estimar a concentração de sedimentos, permitindo melhores correlações entre eco e a CSS;
- A aquisição do Software específico para realização de medições estacionárias com o ADP;
- A realização de testes com outros solos, ressaltando que uma mesma bacia hidrográfica pode apresentar inúmeros solos e como foi percebido e apresentado, nos resultados comportamentos diferentes no meio líquido;
- Análise das granulometrias das amostras coletadas;
- A sonda de turbidez na estação MD IV está calibrada somente em 1 ponto localizado na seção transversal do rio. Para a obtenção de dados mais consistentes, seria interessante a possibilidade de realizar as calibrações em vários pontos da mesma seção transversal, em diversas vezes e com vazões diferentes.
- A realização de coletas (pontos e verticais) com o ADP e a sonda em modo estacionário na estação MD IV.
- Chanson *et al.* (2008) registrou um evento de 2h com águas com elevada concentração de sedimentos, nas quais o comportamento do eco medido por um ADV estava semelhante as medições de turbidez, não apresentando variações em função da profundidade. Logo, recomenda-se, para estudos futuros, que utilizar o ADV para correlacionar com as CSS.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora- Faculdade de Engenharia, Departamento de Transporte, 2005, 145 p.
- AMORIM JUNIOR, J. C.; ROCHA, S. R. **Comparativo dos medidores de vazão acústicos flowtracker e ADP (S5)**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES. 2012, 13 p.
- AZEVEDO, A.C. de; DALMOLIN, R. S.D. **Solos e Ambiente: uma introdução**. Departamento de Solos- Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria- UFSM, Editora: Pallotti, Santa Maria/RS, 2006, 100p.
- ANZOLIN, M. A. D.; MUTTI, L. S. M. **Relatório Técnico: Solos da bacia hidrográfica do Vacacai-Mirim**. Porto Alegre: Acordo DNOS – Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 1987/1988, 20 f.
- BACCHI, C. G. V.; ANACHE, J. A. A.; SOUZA, J. S. de.; STEFFEN J. L.; SOBRINHO, T. A.; **Produção de sedimentos em três classes de solo com pastagem e sem cobertura vegetal no cerrado Sul-Mato-Grossense**.In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu- PR, 2012. 10p.
- BARBOSA, J. F. **Obtenção de perfis de concentração de sedimentos em suspensão nos rios da bacia amazônica a partir do sinal de retorno acústico (backscattering) de um perfilador doppler acústico de corrente (ADCP)**. 2005. 186 f. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- BARCELOS, A. A de; PAULA, M. R. de; COSTA, C. A. G.; CABRAL, J, B, P.; ROCHA, I. R. Análise da estimativa da produção de sedimentos utilizando métodos do flutuador e molinete Doppler. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos Foz do Iguaçu- PR, 2012. 19p.
- BELING, F. A. **Hidrograma de projeto utilizando o Modelo Kineros 2 em uma pequena bacia de encosta em Santa Maria**. 2010. 73 f. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- BELLINASSO, T. B. **Monitoramento hidrossedimentométrico e avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica urbana de encosta**. 2002. 300 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- BENSI, M. **Aplicação do correntômetro acústico ADCP em ambientes marinhos e estuários do Ceará e Paraíba- nordeste do Brasil**. 2006. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BOUCHEZ, J.; MÉTIVIER, F.; LUPKER, L.; PEREZ, M.; GAILLARDET, J.; FRANCE-LANORD, C. **Prediction of depth-integrated fluxes of suspended sediment in the Amazon River: particle aggregation as a complicating factor.** *Hydrological Processes*, v. 25, p. 778-794, 2011. Consultado: wileyonlinelibrary.com em 12/10/2012.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta.** 1998. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola- Irrigação e Drenagem) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

BROWN, R.; CHANSON, H.; McINTOSH, D.; MADHANI, J. **Turbulent velocity and suspended sediment concentration measurements in an urban environment of the Brisbane river flood plain at gardens point on 12-13 january 2011.** School of Civil Engineering – The University of Queensland. Austrália, 122p. 2011.

CARDOSO, A. T.; KOBIYAMA, M.; GRISON, F. Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 15p.

CARVALHO, M de S. **Investigações sobre um perfilador acústico (ADCP) de faixa larga.** 1999. 118 f. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999, 118p.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de práticas sedimentométricas.** Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL. 154p. Brasília, 2000.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática.** 2ª edição; revisada; atual e ampliada, Rio de Janeiro – RJ: Interciência, 2008, 599 p.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática.** CPRM, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 372p.

CARVALHO, T.M. Quantificação dos sedimentos em suspensão e de fundo no médio Rio Araguaia. **Revista Geográfica Acadêmica**, Brasil, v.1, n.1, p. 55-64, dez. 2007.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento.** 2004. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CASTRO, C.; BORGES, A. L. de O. **Correntes de turbidez em escala reduzida: caracterização reológica de suspensões compostas.** In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 20p.

CHANSON, H.; TAKEUCHI, M.; TREVETHAN, M. **Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary.** *Journal of Environmental Management- Elsevier, Australia*, v.88, p. 1406-1416, 2007.

CHEN, C. **Power Law os flow resistance in open channels.** Menlo Park- California. United States of America, 1989.

DALBIANCO, L.; RAMON, R.; MINELLA, J. P. G.; BARROS, C. A. P. de; DIDONÉ, E. J.; KOCHER, M. L.; MERTEN, G. H. Eficiência na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por diferentes estratégias amostrais na calibração de turbidímetros. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 19p.

DEINES, K. L. **Backscatter estimator using broadband Acoustic doppler current profilers.** In: ANDERSON, S. P. TERRY, E. A. WHITE, J. A. R. WILLIAN A. J. *Proceedings Working Conference on Current Measurement.* No. 6, San Diego, EUA, 5p, 1999.

DIAS, J. R. **Aplicação do modelo hidrológico AGNPS2001 utilizando dados observados na bacia do arroio Vacacaí-Mirim.** 2003. 118 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

DO VAL, L. A. A.; IDE, C. N; RIBEIRO, M. L.; GONÇALVES, F. V. **Utilização de sonda de turbidez para a determinação da curva granulométrica de sedimentos finos.** In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 14p.

DORNELLES, A. M. **Utilização de um perfilador acústico de correntes por efeito doppler (ADCP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS).** 2009. 127 f. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental- Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo.** 2 ed. revisão atualizada. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

FILIZOLA, N. P.; **Uso do sinal do ADCP e a determinação do fluxo de matéria em suspensão nos rios da Amazônia.** In:VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Vitória. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hidricos: Vitória- ES, 2004, 4p.

FILIZOLA, N.P.; GUYOT, J. L. **The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determinations in the River Amazon.** *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, nº 49 (1), 2007, 11p.

FUKUDOME, K.; YOOH, J. H.; OSTROVSKII, A.; TAKIKAWA, T.; HAN, I. S. **Seasonal volume transport variation in the Tsushima warm current through the Tsushima straits from 10 years as ADCP observations.** Journal of Oceanography, Japão, v. 66, p. 539- 551, 2010. Consultado: <http://www.mendeley.com> em 20/12/2011.

GAMARO, P. E (Organizador). **Curso de medidores de vazão acústica Doppler- Apostila módulo básico.** Agência Nacional de Águas- ANA. Foz do Iguaçu, Paraná. 1ª ed, 40p., 2006.

GAMARO, P. E. M. **Verdades e mitos sobre medição de sedimento em suspensão com medidores acústicos doppler.** Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 8., 2008, Campo Grande-MS. 13p.

GAMARO, P. E. M.; MALDONADO, L. H.; LIMA, K. A. Medição de carga de fundo pelo método acústico Doppler e aplicação da equação de dunas e rugas, em grandes rios com leito arenoso. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 15p.

GAMARO, P. E. **Medidores acústicos Doppler de vazão.** Foz do Iguaçu - Paraná: Itaipu Binacional, 164 p. 2012.

GARTNER, J. W. **Estimation os suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background.** In: Turbidity and other sediment surrogates workshop, Proceedings. Reno, United States of America, 2002.

GOMES, A. da S.; PAULETTO, E.A. **Manejo do solo e da água em áreas de várzea.** 1ª edição Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Clima Temperado. Pelotas/RS, 1999, 201p.

GRISON, F.; KOBİYAMA, M. **Uso do ADCP como ferramenta de apoio no traçado e extrapolação de curva-chave na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte.** 2008. 46 f. Trabalho de conclusão de curso da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2008, 46p.

GRUTKA, L.; ILHA, R.; SCHUCK, A.; RIZZARDI, A. S.; GUERRA, M.; PAIVA, J.B de. Relação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos na bacia hidrográfica contribuinte ao reservatório do rio Vacacaí-Mirim. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 12p.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S da.; BOTELHO, R.G.M (organizadores). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e Aplicação.** 3ª Edição, editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro- RJ, 2007, 340 p.

GUERRERO, M.; SZUPIANY, R. N.; AMSLER, M. **Comparison of scoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation.** Flow Measurement and Instrumentation- SciVerse Science Direct, v. 22, p. 392-401, 2011-A.

GUERRERO, N.; RÜTHER, M. SZUPIANY. **Laboratory validation of acoustic Doppler current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations.** Flow Measurement and Instrumentation- SciVerse Science Direct, v. 23, pp. 40-48, 2011- B.

GUIMARÃES, J. C. R. **Medidas de concentração de sedimentos e turbidez na bacia hidrográfica do Lajeado Grande, São Martinho da Serra (RS).** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, 2010, 121 p.

HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Os solos agrícolas.** Tradução de Orlando Valverde. Rio de Janeiro/RJ, Editora Forense-Universitária e editora da Universidade São Paulo, 1976, 334p.

JUNIOR, P. P. A.; KUWAJIMA, J. I.; MAUAD, F. F. Erosão: principais tipos, consequências e formas de monitoramento e controle. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 22p.

KOSTASCHUK, R.; BEST, J.; VILLARD, P.; PEAKAL L.; FRANKLIN, M. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. **Geomorphology, Science Direct**, Canada, v. 68, p. 25-37, jul./dez. 2005.

KOSTASCHUK, R.; BEST, J.; VILLARD, P. V. The influence of dunes on mixing in a migrating salt-wedge: Fraser river estuary, Canada. **Earth Surface Processes and Landforms**, Wiley Inter Science, Canada, v. 35, p. 460-465, nov. 2008/set. 2009.

KOSTASCHUK, R.; SHUGAR, D.; BEST, J.; PARSONS, D.; LANE, STUART, L.; HARDY, R.; ORFEO, O. Suspended sediment transport and deposition over a dune: Rio Paraná, Argentina. **Earth Surface Processes and Landforms, Wiley Inter Science**, Canada, v. 34, p. 1605-1611, jan./mai. 2009.

LEPSCH, I.F. Formação e conservação de solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 178p. MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à Geologia de Engenharia.** 2. ed. Santa Maria: UFSM; Brasília: CPRM, 1997. 284 p

MANZ, R.E.; SANTOS, I. dos; PAULA, E.V de. Monitoramento automático do transporte de sedimento em suspensão por meio de turbidímetro de alta performance. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento- ENES, Brasília. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Brasília-DF, 2010, 14 p.

MARCONDES, C. R. **Estudo de descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Sapucaí.** 2011. 78 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia- Energia, Sociedade e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia de Energia Universidade Federal de Itajubá, Itajubá- MG, 2011.

MAYERLE, R.; POERBANDONO, W. C. **Effectiveness of acoustic backscatter profiler in the estimation of suspended sediment concentration.** Report No 16. Coastal Engineering Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University. Kiel, Germany, 2002.

MELCHIOR, C. **Comparativo de Resultados de Medição de Vazão pelos Métodos: convencional e acústico**. 2006. 72 f. Trabalho de conclusão de curso. União Dinâmica de faculdades Cataratas- UDC. Foz do Iguaçu – PR, 2006.

MERTEN, G. H.; MORO, M.; MINELLA, J. P. G. Estimativa de fluxo de sedimentos em rios através do uso da curva-chave e do sensor ótico de turbidez. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 18p.

MOORE, S. A.; LE COZ, J.; HURTHUR, D; PAQUIER, A. **On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers**. Journal Continental Shelf Research, França, 2011, 14p.

NOAA. **Natinal Oceanic Atmospheric Administration**. United State Departamentos Commerce. Acesso: 07 de maio de 2012. Disponível em: <http://www.noaa.gov/>

NOGUEIRA, P. F.; CABRAL, J. B.P.; OLIVEIRA, S. F. Análise da concentração dos sólidos em suspensão, turbidez e TDS nos principais afluentes do reservatório da UHE barra dos coqueiros- GO. **Revista Geonorte**, Ed, especial, v. 3, nº 4 p. 485-494, 2012. Consultado: <http://www.revistageonorte.ufam.edu.br> em 01/10/2012.

OLIVEIRA, V. R. L.; RIGO, D. Calibração de um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler para estimação de concentração de material particulado em suspensão: uma aplicação no rio Doce, ES. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 15p.

PAIVA, E. M. C. D. de; Métodos de Estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. (capítulo 13), In: **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. PAIVA, J. B. D. de/ PAIVA, E. M. C. D. de (Organizadores). Porto Alegre, ABRH, 2003, 628p.

PEREIRA, M. A. F. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma mata atlântica**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PITON, C. P. **Evolução Tecnológica nas Medições de Vazões em Rios**. 2007. 67 f. Trabalho de conclusão de curso. União Dinâmica de faculdades Cataratas- UDC. Foz do Iguaçu-PR, 2007.

PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G de. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das Mudanças Ambientais**. 1ª Edição. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- Embrapa Solos, Rio de Janeiro/RJ, 2010, 486 p.

RD. Instruments. Acoustic Doppler Current Profilers. Principles of operations: a practical primer. Second Edition. Publ. RDI, San Diego – EUA, 1996, 52 p.

RIOS, F.P.; FORMIGA, K. T. M.; ALVES, P.L.; OLIVEIRA, V.T de. *Estudo comparativo entre métodos de medição de vazão em cursos d'água*. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos- ABRH, Maceió. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos:, Maceió- AL, 2011.

ROTARU, E.; LE COZ, J.; DROBOT, R.; ADLER, M. J.; DRAMA, G. **ADcp measurements os suspended fluxes in banat rivers Romania**. 13p.

SANTOS, H. G dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H. C dos; OLIVEIRA, V.A de; OLIVEIRA, J.B de; COELHO, M. R; LUMBRERAS, J.F; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª Edição. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos. Rio de Janeiro-RJ, 2006, 306 p.

SANTOS, I. BUBA, H. REGINA, J. V. Batimetria qualitativa com ADCP: levantamento do canal de adução da UHE Salto Santiago. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos- ABRH Aracaju- SE, 2011.

SANTOS, I.; GOMES, J.; BUBA, H. “Medições de descarga líquida: método convencional x método acústico. Comparação dos resultados”. In anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos- ABRH, 12, Vitória- ES, 1997.

SARI, V.; PERREIRA, M. A.; CASTRO, N. M. dos R.; KOBIYAMA, M. Calibração de sondas de turbidez em laboratório. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 23p.

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria- RS**. 2005. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCHMIDT, A. O.; JUCHEN, C. R.; POLETO, C.; SAMPAIO, S. C.; VILAS BOAS, M. A. Monitoramento de vazão e turbidez paa estimatica da produção e descarga de sedimentos em suspensão da bacia hidrográfica do rio São Francisco verdadeiro. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 17p.

SCHNEIDER, P.; KLAMT, E.; GIASSON, E. **Morfologia do solo: Subsídios para caracterização e interpretação de solos a campo**. Editora Agrolivros, Guaíba/RS, 2007, 72p.

SCHUCK, A.; RIZZARDI, A. S.; GRUTKA, L.; BELING, F. A.; PAIVA, J. B. D de.; SANAGIOTTO, D. G. Avaliação dos métodos convencional e acústico para medição de vazões. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 13p.

SCHUCK, A.; PACHECO, C. H.; PERIUS, C. F.; FRANCO, I.; PAIVA, J. B. D. de; SANAGIOTTO, D. G. Verificação em laboratório da aplicação do Acoustic Doppler

Profiler (ADP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS). In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 14p.

SIMPSON, M.R. Discharge measurements using a Broad-Band Acoustic Doppler Current profiler. United States Geological Survey. Open-File Report 01-1. Sacramento, Califórnia, 2001.

SIMPSON, M.R.; OLTMANN, R.N. “Discharge – Measurement System Using an Acoustic Doppler Current Profiler with Applications to Large Rivers and Estuaries”. SONTEK/YSI. **Manual do Sistema River Surveyor S5/M9 “Acoustic Doppler Profiler”**. Technical Documentation: 2009.

SONTEK/YSI. **Manual do Sistema River Surveyor S5/M9 “Acoustic Doppler Profiler”**. Technical Documentation: 2009.

SOUSA, M. M. **Carga de poluição difusa em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos**. 2012. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ª Edição revisada e ampliada. Emater, Porto Alegre/RS, 2008, 222p.

SUZUKI, L. E. A. S.; MATIESKI, T.; STRIEDER, G.; PAULETTO, E. A.; LIMA, L. da S. C.; COLLARES, G. L.; DAI PRÁ, M. Perdas de solo por erosão hídrica e granulometria do material erodido em propriedades agrícolas. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 19p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. Decifrando a Terra – 2a edição. Companhia Editora Nacional. São Paulo. 2009, 623p.

TERABE, F. R. **Estudo sobre o uso do perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) para medição do transporte sólido em suspensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003, 109 p.

URICK, R. J. **Principles of Underwater sounds**. 2a edição. Mc Graw Hill, New York. United States of America, 384p. 1975.  
USGS Supply Paper 2395: 1993, 33 pg.

VAN RIJN, L. C. **Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coast al seas**. Amsterdam: Aqua Publications, 1993, 690p.

VAN RIJN, L. C. **Sediment transport, Part II: Suspended Load Transport**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 110, n. 11, p. 1613-1641, 1984.

WANG, Y. GAO, S. LI, K. **A preliminary study on suspended sediment concentration measurements using an ADCP mounted on a moving vessel**. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, China, v. 18, n° 2, p. 183-189, 2000. Consultado: <http://www.springerlink.com/content/m0551305322878r9> em 20/12/2011.

XAVIER, B. C.; SILVA, I. O.; GUIMARÃES, L. G.; GALLO, M. N.; RIBEIRO, C. P.; FIGUEIREDO JR, A. G. Estudo experimental e numérico para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio de sinais de espalhamento acústico. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Foz do Iguaçu. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Foz do Iguaçu- PR, 2012, 15p.