

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - PPGRHSA

**UTILIZAÇÃO DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE
CORRENTES POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA
A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS)**

ANDRÉ MITO DORNELLES

Porto Alegre, 2009

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – PPGRHSA

**UTILIZAÇÃO DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE
CORRENTES POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA
A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS)**

ANDRÉ MITO DORNELLES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, junho de 2009

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – PPGRHSA

**UTILIZAÇÃO DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE
CORRENTES POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA
A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS)**

André Mito Dornelles

Orientadora: Prof^ª. Nilza Maria dos Reis Castro

Banca Examinadora:

Naziano Pantoja Filizola Junior

NIEMA / UFAM

Gustavo Henrique Merten

IPH / UFRGS

André Luiz Lopes da Silveira

IPH / UFRGS

Porto Alegre, junho de 2009

Diz-se que, mesmo antes de um rio cair no oceano, ele treme de medo.
Olha para trás, para toda a jornada: os cumes, as montanhas, o longo caminho sinuoso
através das florestas, através dos povoados, e vê à sua frente um oceano tão vasto, que entrar
nele nada mais é que desaparecer para sempre.
Mas não há outra maneira.
O rio não pode voltar.
Ninguém pode voltar.
Você pode apenas ir em frente.
O rio precisa se arriscar e entrar no oceano.
E somente quando ele entra no oceano é que o medo desaparece. Porque apenas então o rio
saberá que não se trata de desaparecer no oceano, mas tornar-se oceano.
Assim somos nós.
Voltar é impossível na existência.
Você pode ir em frente e se arriscar:
Torne-se um oceano!

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À Professora Nilza Castro, por ter aceitado a orientação deste trabalho, pelo apoio e incentivo dados às atividades de campo e principalmente por toda a tranqüilidade e calma transmitidas quando estas me faltavam.

Ao Professor André Silveira pelo incentivo dado desde o início do curso e pelas cobranças feitas para cumprimento dos prazos do curso.

Ao Professor Gustavo Merten, também pelo apoio dado às atividades de campo e pelos ensinamentos relativos à Sedimentologia, principalmente sobre sedimentometria.

Ao Professor Naziano Filizola, por ter, desde o início do nosso contato, aceitado com alegria e entusiasmo nos repassar um pouco da sua experiência no assunto deste trabalho, através das conversas em congressos, e-mails e troca de materiais técnicos.

Preciso também agradecer àqueles que me apresentaram a esta tecnologia (acústica) na hidrometria. Engenheiro Paulo Gamaro da Itaipu Binacional e Engenheiro Mauro Rodrigues, ambos verdadeiros entusiastas sobre a utilização desta tecnologia. E também pelos ensinamentos teóricos e práticos transmitidos nos diversos cursos, simpósios e encontros que estivemos juntos.

Ao meu amigo Walszon Terllizzie, da Agência Nacional de Águas, pela troca de experiências sobre as práticas sedimentométricas e manuais técnicos.

A todos os técnicos do laboratório de sedimentos do IPH, pela ajuda imprescindível nas atividades de campo e também pelas análises das amostras.

Aos técnicos do setor de hidrometria do IPH, especialmente ao Pedrinho, por toda a experiência transmitida e ao meu amigo César, pelo apoio de sempre e por todas as tentativas de realização de medições.

Aos meus amigos e colegas hidrotécnicos da CEEE, Vinicius Quadros, Saint-Cir e Luiz Antônio, pelas trocas diárias de experiências sobre hidrologia e também pelo apoio dado para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, pela ausência, principalmente em épocas de provas. Ao meu irmão e à minha querida prima, pelo uso dos computadores. E principalmente à minha Engenheira Paula Ariotti e à minha futura arquiteta Layse Ariotti, pela paciência de todos os dias.

RESUMO

O adequado aproveitamento dos recursos hídricos está relacionado ao conhecimento dos regimes dos rios e suas sazonalidades, dos regimes pluviométricos e de uma série de informações do ciclo hidrológico, em diversas partes das bacias hidrográficas. A quantidade de material em suspensão transportado pelas águas dos rios é de grande importância, pois afeta diretamente as atividades antrópicas.

Ainda é pequeno o número de estudos e monitoramentos locais e regionais consistentes sobre a concentração de sedimentos transportados pelos rios. No Brasil, as medições de vazão sólida em rios são muito escassas, provavelmente, devido aos custos elevados e dificuldades operacionais relativas às metodologias existentes. A busca por um método aceitável para coleta de dados de sedimentos que associe baixo custo, facilidade de operação e disponibilidade no mercado e, ao mesmo tempo, produza dados confiáveis e com uma resolução espacial e temporal, representa um vasto campo de estudo.

Desta forma, o principal objetivo deste estudo é verificar a aplicabilidade da utilização de um equipamento acústico por Efeito Doppler para a quantificação dos sedimentos transportados em suspensão em um rio. As estimativas da concentração de sedimentos em suspensão foram realizadas através da aplicação de métodos empíricos para conversão do sinal acústico do equipamento em perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

Foram utilizados três métodos propostos por Deines (1999), Mayerle e Poerbandono (2002) e Gartner (2002), e ainda, a comparação direta entre o sinal acústico emitido pelo equipamento e a concentração medida em laboratório. De forma geral, os métodos que utilizaram relações de regressão entre os dados obtiveram os melhores resultados. O método que melhor estimou os valores de concentração de sedimentos em suspensão foi o de Gartner, enquanto que o método que obteve pior desempenho foi o método de Deines. Este estudo ressalta a necessidade de um melhor entendimento das relações entre dados hidro-acústicos e informações dos sedimentos transportados pelos rios, a fim de aprimorar seu uso em projetos e pesquisas na área de hidrologia.

ABSTRACT

The appropriate use of hydrous resources is linked to the knowledge about the rivers' regimes and its seasonality, the pluvial regimes and information about the hydrological cycle in several parts of the hydrographic basins. The amount of suspended material carried by the rivers is very important since it directly affects the human activities.

There are still very few studies that focus on monitoring concentration of sediments carried by the rivers in a local or regional level in a consistent way. In Brazil, the measurements of the solid flow in rivers are very rare due to the high costs and operational difficulties associated with the existing methodologies. There is a wide field of study that aims to find an acceptable method for sediments data collection, which just not associates low cost with simple operational tasks and commercial availability, but also produces reliable data with a good spatial and temporal resolution.

Thus, the main objective of this study is to verify if it is suitable to use the acoustic equipment for Doppler Effect for the quantification of sediments carried by suspension in a river. The estimates of the concentration of suspension sediments were done using empirical methods for converting the equipment's acoustic signals into suspension sediments concentration profiles.

Three previous proposed methods were used in this study, Deines (1999), Mayerle and Poerbandono (2002) and Gartner (2002). The study also used direct comparisons between the acoustic signal emitted by the equipment and the concentration measured in laboratory. In general, methods with regression relations between the data presented better results. Gartner method resulted in the best estimation of the concentration of suspension sediments values. On the other hand, Deines method had the worst performance. This study points out the need of a better understanding of the relations between hydro-acoustic data and the information of sediments carried by rivers in order to improve its use in projects and research in the hydrology area.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	Métodos de determinação da concentração de sedimentos em suspensão	23
3.1.1	<i>Amostragem Mecânica</i>	24
3.1.2	<i>Métodos Ópticos</i>	26
3.1.3	<i>Difração a Laser</i>	27
3.1.4	<i>Imagem Digital Foto-Óptica</i>	27
3.1.5	<i>Pressão Diferencial</i>	28
3.2	Perfiladores Acústicos de Correntes por Efeito Doppler (ADCP).....	29
3.3	O ADCP e o material em suspensão.....	37
3.4	Métodos de Conversão do Sinal Acústico em Css	45
3.4.1	<i>Método de Deines</i>	46
3.4.2	<i>Método de Mayerle & Poerbandolo</i>	48
3.4.3	<i>Método de Gartner</i>	49
3.5	O ADCP no Brasil.....	49
4	METODOLOGIA	56
4.1	Procedimentos de campo	56
4.1.1	<i>Local das medições</i>	56
4.1.2	<i>Equipamentos utilizados</i>	60
4.1.3	<i>Instalação para amostragem</i>	63
4.1.4	<i>Procedimentos de amostragem</i>	65
4.2	Procedimentos de laboratório.....	66
4.3	Métodos de Conversão do Sinal Acústico em Css	67
4.3.1	<i>Método de Deines</i>	67
4.3.2	<i>Método de Mayerle e Poerbandolo</i>	68
4.3.3	<i>Método de Gartner</i>	68
4.3.4	<i>Método “Css x ABS”</i>	69
4.4	Metodologia de cálculo.....	69

5	RESULTADOS.....	73
5.1	Resultados para os cálculos com o dB médio	75
5.1.1	<i>Coeficientes KM e NRs testados.....</i>	75
5.1.2	<i>Estimativas – 1º Medição/Vertical 2</i>	78
5.1.3	<i>Estimativas – 1º Medição/Vertical 3</i>	81
5.1.4	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 1</i>	84
5.1.5	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 2</i>	87
5.1.6	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 3</i>	90
5.1.7	<i>Relações do método “Css x ABS” para o dB médio</i>	93
5.1.8	<i>Resumo dos resultados para o dB médio.....</i>	93
5.2	Resultados para os cálculos com o <i>backscatter</i> do <i>beam 1</i>	95
5.2.1	<i>Coeficientes KM testados.....</i>	95
5.2.2	<i>Estimativas – 1º Medição/Vertical 2</i>	98
5.2.3	<i>Estimativas – 1º Medição/Vertical 3</i>	101
5.2.4	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 1</i>	104
5.2.5	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 2</i>	107
5.2.6	<i>Estimativas – 2º Medição/Vertical 3</i>	110
5.2.7	<i>Relações do método “Css x ABS” para o Beam 1</i>	113
5.2.8	<i>Resumo dos resultados para o Beam 1.....</i>	113
5.3	Resultados Gerais	115
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	116
6.1	Conclusões	116
6.2	Recomendações.....	118
	REFERÊNCIAS	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estações Fluviométricas até o ano de 1970.....	16
Figura 1.2 – Estações Fluviométricas até o ano de 2007.....	17
Figura 1.3 – Evolução das estações sedimentométricas no Brasil	19
Figura 1.4 – Estações Fluviométricas até o ano de 2007.....	20
Figura 3.1– Identificação das regiões de uma amostragem mecânica.....	25
Figura 3.2 – Verificação do Efeito Doppler pelo número de ondas por um observador.....	30
Figura 3.3 – Mudança na frequência de um pulso emitido pelo ADCP	31
Figura 3.4 – Células de profundidade medidas pelo ADCP	32
Figura 3.5 – Componentes da velocidade medidas pelo ADCP	33
Figura 3.6 – Velocidades e <i>Backscatters</i> como apresentados pelo programa de cálculo.....	36
Figura 3.7 – Áreas medidas e não medidas pelo ADCP.....	36
Figura 3.8 – Curva de Rayleigh.....	40
Figura 3.9 – Relação entre a sensibilidade acústica e o diâmetro das partículas	41
Figura 3.10 – Esquema de conversão das intensidades em concentrações.....	48
Figura 4.1 – Bacia hidrográfica do rio Jacuí.....	57
Figura 4.2 – Localização da seção de medição	59
Figura 4.3 – ADCP de 1200 KHz.....	61
Figura 4.4 – Amostrador P-61 com o bico na entrada e as garrafas de amostragem	62
Figura 4.5 – Esquema ideal de montagem do ADCP e do amostrador no barco	64
Figura 4.6 – Estrutura do amostrador de sedimentos utilizada na 1ª medição.....	64
Figura 4.7 – Estrutura do amostrador de sedimentos e do ADCP utilizada na 2ª medição.....	65
Figura 4.8 – Localização das verticais e dos pontos de amostragem	65
Figura 4.9 – Estrutura da metodologia de cálculo	70
Figura 5.1 – Perfis de C_{ss} para V2 da medição 1 a partir do melhor NR – dB médio.....	78

Figura 5.2 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 1 – dB médio.....	79
Figura 5.3 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1, vertical 2) – dB médio	80
Figura 5.4 – Perfis de Css para V3 da medição 1 a partir do melhor NR – dB médio.....	81
Figura 5.5 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 1 – dB médio.....	82
Figura 5.6 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 3) – dB médio	83
Figura 5.7 – Perfis de Css para V1 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio.....	84
Figura 5.8 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V1 da medição 2 – dB médio.....	85
Figura 5.9 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 1) – dB médio	86
Figura 5.10 – Perfis de Css para V2 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio.....	87
Figura 5.11 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 2 – dB médio...	88
Figura 5.12 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 2) – dB médio	89
Figura 5.13 – Perfis de Css para V3 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio.....	90
Figura 5.14 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 2 – dB médio...	91
Figura 5.15 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 3 – vertical 3) – dB médio	92
Figura 5.16 – Relações do método “Css x ABS” para os dados das duas medições – dB Médio	93
Figura 5.17 – Perfis de Css para V2 da medição 1 a partir do melhor NR – <i>beam</i> 1.....	98
Figura 5.18 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 1 – <i>beam</i> 1	99
Figura 5.19 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 2) – <i>beam</i>	100
Figura 5.20 – Perfis de Css para V3 da medição 1 a partir do melhor NR – <i>beam</i> 1.....	101
Figura 5.21 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 1 – <i>beam</i> 1	102
Figura 5.22 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 3) – <i>beam</i>	103
Figura 5.23 – Perfis de Css para V1 da medição 2 a partir do melhor NR – <i>beam</i> 1.....	104
Figura 5.24 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V1 da medição 2 – <i>beam</i> 1	105
Figura 5.25 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 1) – <i>beam</i>	106
Figura 5.26 – Perfis de Css para V2 da medição 2 a partir do melhor NR – <i>beam</i> 1.....	107

Figura 5.27 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 2 – <i>beam 1</i>	108
Figura 5.28 – Faixas de <i>r</i> e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 2) – <i>beam</i>	1109
Figura 5.29 – Perfis de Css para V3 da medição 2 a partir do melhor NR – <i>beam 1</i>	110
Figura 5.30 – Perfis de Css medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 2 – dB médio.	111
Figura 5.31 – Faixas de <i>r</i> e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 3) – <i>beam</i>	1112
Figura 5.32 – Relações do método “Css x ABS” para os dados das duas medições – <i>Beam 1</i>	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Densidades recomendadas pela WMO para estações fluviométricas.....	16
Tabela 1.2 – Densidades recomendadas pela WMO para estações sedimentométricas	18
Tabela 4.1 – Configuração dos principais parâmetros do ADCP utilizado	61
Tabela 4.2 – Limites para algumas frequências de ADCPs.....	61
Tabela 4.3 – Características do amostrador US P-61 A1.....	62
Tabela 4.4 – Fator e faixa de variação de r	71
Tabela 5.1 – Dados da vertical V2 da 1ª medição	74
Tabela 5.2 – Dados da vertical V3 da 1ª medição	74
Tabela 5.3 – Dados da vertical V1 da 2ª medição	74
Tabela 5.4 – Dados da vertical V2 da 2ª medição	74
Tabela 5.5 – Dados da vertical V3 da 2ª medição	74
Tabela 5.6 – N° de estimativas dos KM maiores que 70% em $r = 1,5$, para o dB médio.....	75
Tabela 5.7 – N° de estimativas dos KM iguais a 100% em $r = 1,5$, para o dB médio	75
Tabela 5.8 – N° de estimativas dos NR maiores que 70% em $r = 1,5$, para o dB médio	76
Tabela 5.9 – N° de estimativas dos NR iguais a 100% em $r = 1,5$, para o dB médio	76
Tabela 5.10 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V2 – dB médio	79
Tabela 5.11 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V3 – dB médio	82
Tabela 5.12 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V1 – dB médio	85
Tabela 5.13 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V2 – dB médio	88
Tabela 5.14 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V3 – dB médio	91
Tabela 5.15 – Porcentagem de estimativas maiores que 70% em $r = 1,5$ para dB médio.....	94
Tabela 5.16 – Porcentagem de estimativas iguais a 100% em $r = 1,5$ para dB médio.....	95
Tabela 5.17 – N° de estimativas dos KM maiores que 70% em $r = 1,5$, para o <i>beam</i> 1.....	95
Tabela 5.18 – N° de estimativas dos KM iguais a 100% em $r = 1,5$, para o <i>beam</i> 1	96

Tabela 5.19 – N° de estimativas dos NR maiores que 70% em $r = 1,5$, para o <i>beam</i> 1	96
Tabela 5.20 – N° de estimativas dos NR iguais a 100% em $r = 1,5$, para o <i>beam</i> 1	96
Tabela 5.21 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V2 – <i>beam</i> 1	99
Tabela 5.22 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V3 – <i>beam</i> 1	102
Tabela 5.23 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V1 – <i>beam</i> 1	105
Tabela 5.24 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V2 – <i>beam</i> 1	108
Tabela 5.25 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V3 – <i>beam</i> 1	111
Tabela 5.26 – Porcentagem de estimativas maiores que 70% em $r = 1,5$ para o <i>Beam</i> 1	114
Tabela 5.27 – Porcentagem de estimativas iguais a 100% em $r = 1,5$ para o <i>Beam</i> 1	114

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos, bem como o desenvolvimento de projetos e pesquisas no campo da hidrologia, necessita do conhecimento dos regimes dos rios e suas sazonalidades, dos regimes pluviométricos e de mais uma série de informações do ciclo hidrológico, em diversas partes das bacias hidrográficas.

O levantamento dessas informações deve ser realizado periodicamente, através de coleta e interpretação de dados, de modo a atender às necessidades de projetistas e estudiosos nas áreas relacionadas ao aproveitamento dos recursos hídricos.

As instituições que participam do gerenciamento dos recursos hídricos possuem e monitoram geralmente certo número de postos de observação (estações) que constituem uma rede hidrometeorológica. A densidade, a distribuição, os equipamentos e as grandezas observadas dependem principalmente: (i) da função do órgão operador; (ii) das particularidades locais, como clima, relevo, poluição, tipo de uso e, (iii) da disponibilidade de recursos financeiros e de pessoal (CHEVALLIER, 1997).

Em geral, o projeto de uma rede hidrometeorológica segue as recomendações da WMO (Organização Meteorológica Mundial) que indica métodos, procedimentos e técnicas a serem adotadas a fim de promover a uniformidade das observações e suas estatísticas (WMO, 1994).

No Brasil, os levantamentos hidrológicos tiveram início há mais de cem anos, quando foram instaladas as primeiras estações pluviométricas com medições regulares. Posteriormente, para atender as necessidades de aproveitamento das forças hidráulicas, foram instaladas estações com medição de níveis d'água e de vazões líquidas. Somente a partir do início do século passado, a hidrometria passou a ser realizada de maneira mais estruturada, evoluindo em aspectos relativos à metodologia operacional, aos equipamentos de medição e observação, assim como ao número de seções a serem monitoradas.

A WMO recomenda as densidades de estações fluviométricas em relação ao tipo de configuração geográfica, como apresenta a Tabela 1.1. A Figura 1.1 indica a quantidade e a

localização das estações fluviométricas no Brasil até o ano de 1970. Até 2007, a rede hidrometeorológica nacional apresentava 5275 estações fluviométricas, como mostra a Figura 1.2.

Tabela 1.1 – Densidades recomendadas pela WMO para estações fluviométricas

Unidade Fisiográfica	Densidade mínima área em Km² por estação
litoral	2750
montanhosa	1000
planície interior	1875
ondulada	1875
pequenas ilhas	300
polar / árida	20000

(Fonte: WMO, 2004)

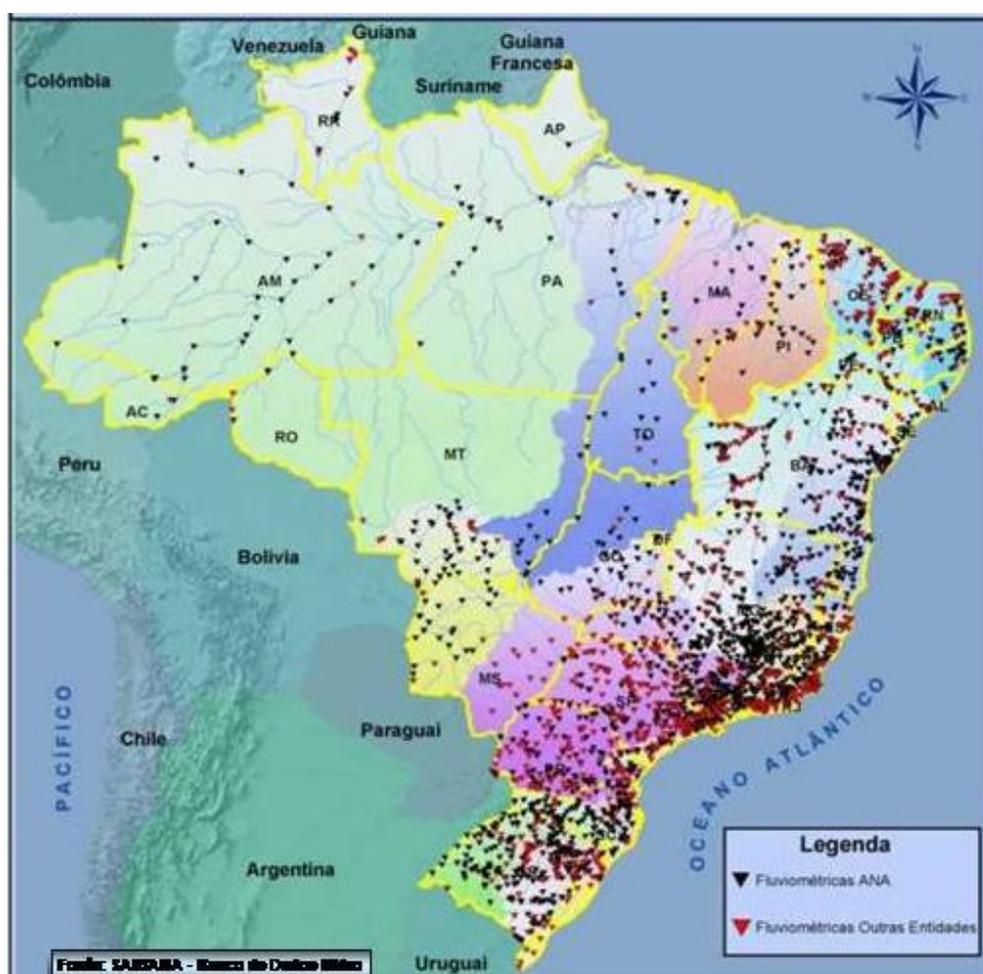


Figura 1.1 – Estações Fluviométricas até o ano de 1970
(Fonte: www.ana.gov.br)



Figura 1.2 – Estações Fluviométricas até o ano de 2007
(Fonte: www.ana.gov.br)

Uma das variáveis que mais afeta, e é afetada pelas atividades antrópicas é a quantidade de material transportado pelos rios. O conhecimento do transporte, deposição e suspensão de sedimentos em rios, estuários e baías são de suma importância para o entendimento e análise ambiental destes sistemas tão complexos. O transporte de sedimentos dos continentes para os oceanos através dos rios é uma característica fundamental da geologia e biogeoquímica de nosso planeta. Segundo Milliman (1991), os rios contribuem com aproximadamente 70% do aporte total mundial de sedimentos para o oceano. Estimativas do fluxo global de sedimentos são da ordem de 18×10^9 toneladas por ano (MEDEIROS et al., 2007). No entanto, a estimativa da magnitude da contribuição desse transporte global através dos rios de médio e pequeno porte é matéria controversa devido à falta de estudos de monitoramentos locais e regionais mais consistentes e sobre a natureza dos impactos antrópicos que afetam a descarga específica de sedimentos, tais como o desmatamento, a erosão, a agricultura e a construção de barragens (VÖRÖSMARTY et al., 1997).

O primeiro passo no sentido de prevenir ou controlar os problemas causados pela acumulação de sedimentos é a quantificação da vazão sólida no curso de água em questão. Entretanto, medidas exatas da concentração dos sedimentos suspensos são difíceis de se obter, pois a carga do sedimento em suspensão é altamente variável no tempo e no espaço (THORNE et al., 1996).

No Brasil, as medições de vazão sólida em rios são muito escassas, provavelmente, devido aos custos elevados e dificuldades operacionais relativas às metodologias existentes. Assim, quando é necessário conhecer o impacto da presença dos sedimentos em corpos d'água, medidas observadas nos locais de análise podem ser utilizadas. No entanto, tais medidas muitas vezes são pouco representativas para análises mais detalhadas.

Uma alternativa para avaliação da quantidade de sedimentos é a utilização de modelos de estimativas, como as equações de previsão da perda de solo na bacia ou de transporte de sedimentos nos cursos d'água (COIADO, 2003). Esses modelos configuram-se como ferramentas eficazes de estimativa, porém a qualidade dos resultados está diretamente ligada à disponibilidade de dados para calibração e validação dos modelos. Desta forma, o monitoramento das variáveis hidrológicas assume fundamental importância para a gestão adequada dos recursos hídricos (PAIVA; PAIVA, 2003).

A WMO sugere a densidade mínima de estações sedimentométricas em função do tipo de configuração geográfica da bacia hidrográfica, como é apresentado na Tabela 1.2. A Figura 1.3 apresenta a quantidade e localização das estações sedimentométricas no Brasil até os anos de 1970. A Figura 1.3 apresenta a evolução ocorrida até 2007, quando estavam em operação 750 estações sedimentométricas, frente a 5275 estações fluviométricas, apresentadas na Figura 1.4. De forma ideal, uma rede sedimentométrica ótima seria aquela onde cada estação fluviométrica representasse também uma estação sedimentométrica.

Tabela 1.2 – Densidades recomendadas pela WMO para estações sedimentométricas

Unidade fisiográfica	Densidade mínima área em Km² por estação
litoral	18300
montanhosa	6700
planície interior	12500
ondulada	12500
pequenas ilhas	2000
polar / árida	20000

(Fonte: WMO, 2004)

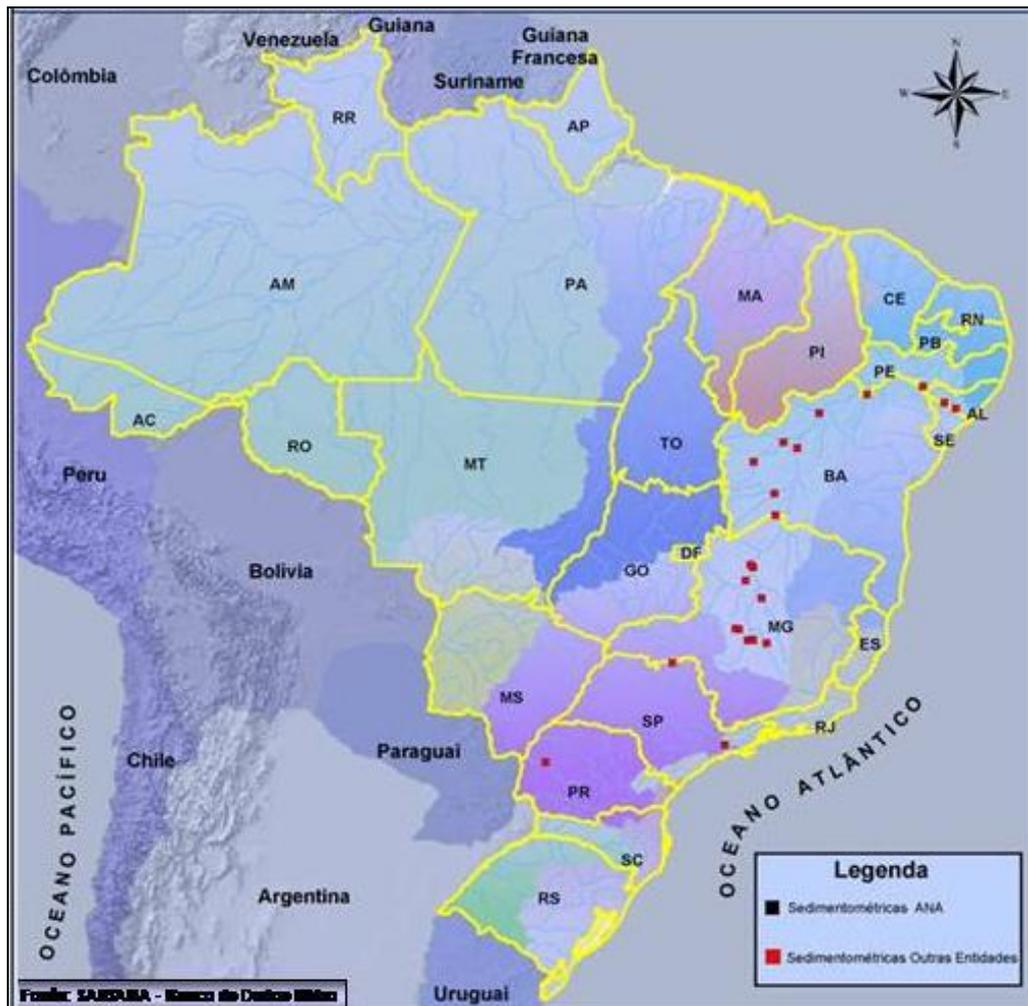


Figura 1.3 – Evolução das estações sedimentométricas no Brasil
 (Fonte: www.ana.gov.br)

O desenvolvimento de novos equipamentos de hidrometria e de transmissão remota de dados tem contribuído para facilitar a coleta de dados em campo e aumentar a confiabilidade das informações levantadas. Desta forma, há um vasto campo de estudo na busca por um método aceitável para coleta de dados de sedimentos que associe baixo custo, facilidade de operação e disponibilidade no mercado e, ao mesmo tempo, produza resultados confiáveis e com adequada resolução espacial e temporal.

Equipamentos acústicos de corrente por Efeito Doppler têm sido usados com sucesso em medições de vazão líquida. Embora o seu uso em campo ainda esteja em desenvolvimento e as informações disponíveis sejam muito escassas, estes equipamentos podem ser utilizados para a determinação de concentração de sedimentos em suspensão. A determinação da concentração de sedimentos é possível a partir da intensidade do seu sinal de retorno ou, como é conhecido, “*backscattering*”. Este procedimento poderia conduzir a obtenção das

descargas líquida e sólida praticamente ao mesmo tempo, uma vez que as informações dos *backscatterings* gravados no equipamento após cada medição de vazão líquida poderiam ser relacionadas a uma medição de concentração de sedimentos em suspensão executada antes ou depois da descarga líquida.

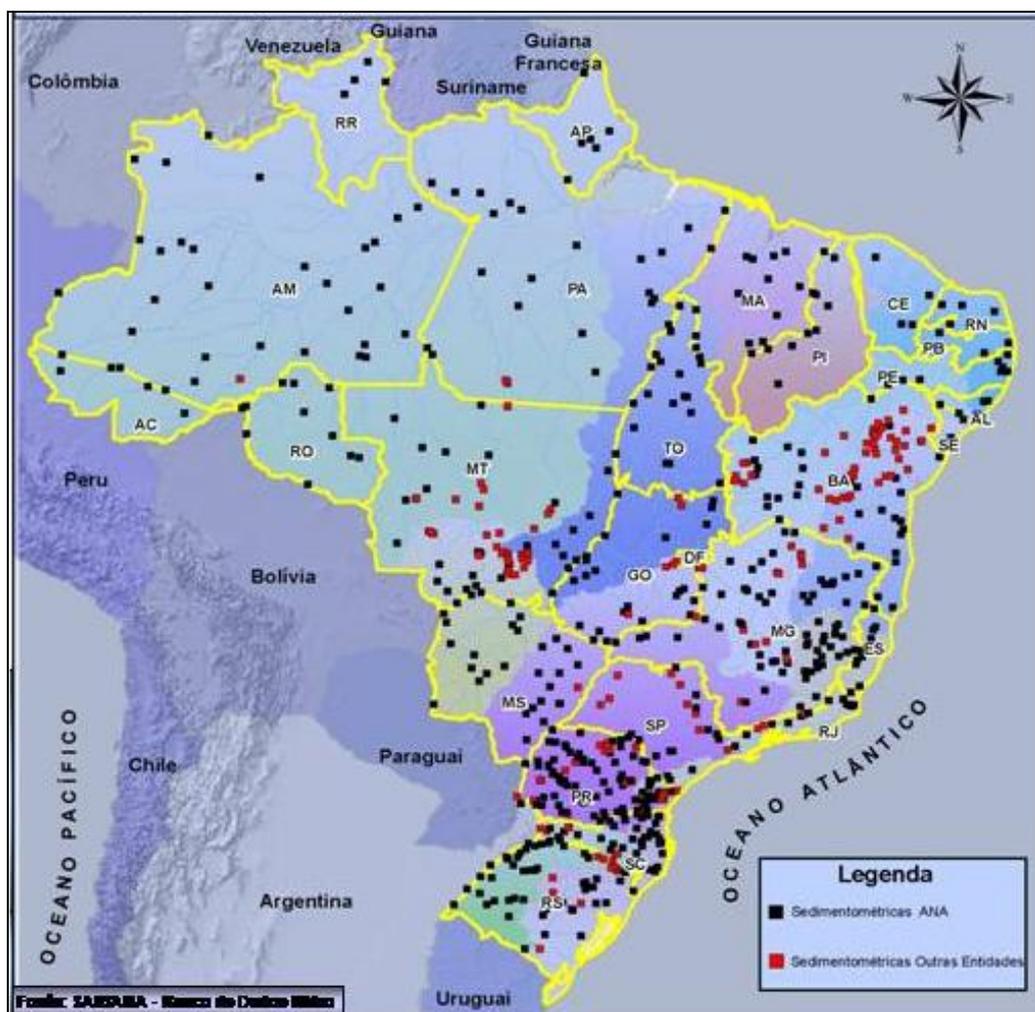


Figura 1.4 – Estações Fluviométricas até o ano de 2007
(Fonte: www.ana.gov.br)

Os equipamentos acústicos para a medição de vazão, disponíveis comercialmente, fornecem maior quantidade de informações quando comparados ao método de medição tradicional com molinete hidrométrico. Além das informações do fluxo d'água, como direções e velocidades, com uma maior discretização temporal e espacial, fornecem ainda a batimetria do fundo do rio, a velocidade do barco e dados estatísticos sobre a qualidade dos dados registrados. Entre as principais vantagens desses equipamentos estão o menor tempo gasto durante a realização das medições quando comparados com o método tradicional (molinete hidrométrico), principalmente em seções de grandes larguras, e a possibilidade de se realizar

medições contínuas de perfis de concentração de sedimentos em suspensão, em conjunto com medições de perfis de velocidades, sem a necessidade de introduzir diretamente o equipamento no fluxo, não perturbando as condições locais do escoamento.

A utilização de equipamentos acústicos pode proporcionar a redução dos custos de levantamentos de campo em termos de transporte de sedimentos, pois além da rapidez, o método possibilita uma grande redução no número de amostras de água coletada permitindo ainda a obtenção de maior quantidade de dados com boa resolução temporal e espacial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é verificar a aplicabilidade da utilização de um equipamento acústico por Efeito Doppler para a quantificação dos sedimentos transportados em suspensão em um rio através de metodologias empíricas para conversão do sinal acústico do equipamento em perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, são analisados quatro métodos para a conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos: Deines (1999), Mayerle e Poerbandono (2002), Gartner (2002) e “Css x ABS”:

- para os métodos de Deines (1999) e Mayerle e Poerbandono (2002) são testados vários níveis de referência nas estimativas dos perfis de concentração;
- para o método de Mayerle e Poerbandono (2002), além dos vários níveis de referência, são calculados vários valores de coeficiente de ajuste KM;
- para o método de Gartner, os coeficientes são determinados através de dois modelos: Gartner 5, a partir dos pontos medidos de cada perfil, e Gartner T, a partir do conjunto de pontos de todos os perfis, de todas as medições.
- no método “Css x ABS”, as concentrações medidas de cada uma das amostras são relacionadas diretamente com as intensidades medidas de volta pelo ADCP (*backscatters*);

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação da maior parte das técnicas utilizadas em estudos hidrológicos depende de dados confiáveis sobre a quantificação de água. Análises qualitativas exigidas em estudos de impactos ambientais necessitam de uma base de dados confiável a respeito da quantidade de água para sejam adequadamente estimadas as conseqüências das ações planejadas e implantadas medidas visando a redução dos seus efeitos negativos. A quantificação representa uma das atividades de maior importância para a tomada de decisão adequada em relação ao planejamento, aproveitamento e controle de recursos hídricos (MENDONÇA, 2003).

A seguir, são relatados alguns métodos já utilizados para a determinação da concentração de sedimentos transportados em suspensão pelos rios e a apresentação dos conceitos pertinentes ao método utilizado neste trabalho.

3.1 Métodos de determinação da concentração de sedimentos em suspensão

As metodologias para caracterizar sedimentos suspensos nas águas de forma tradicional, através de uma rotineira coleta e a análise subsequente de amostras de água, estão bem estabelecidas. Entretanto, há uma tendência de que os métodos tradicionais sejam substituídos por outros métodos que oferecem maior precisão, menor custo e possibilitem registros contínuos e seguros para obtenção de dados para a quantificação das concentrações do sedimentos suspensos e de outras características das águas superficiais.

Algumas técnicas podem considerar propriedades ópticas da água, como turbidez ou o espalhamento óptico de forma a estimar a concentração de sedimentos suspensos na água. Ainda, técnicas que consideram difração a laser, imagens digitais foto-ópticas, pressão diferencial e retro-espalhamento acústico estão sendo cada vez mais utilizadas na área de sedimentometria (GRAY et al., 2003). Algumas destas técnicas medem também características do tamanho dos sedimentos em suspensão. Os itens a seguir apresentam algumas técnicas mais utilizadas para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, destacando a tecnologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, que se refere ao Efeito Doppler utilizado em um equipamento de retro-espalhamento acústico.

3.1.1 Amostragem Mecânica

Na sua forma mais simples, a amostragem mecânica de sedimentos em suspensão envolve a extração de amostras de água através do mergulho de frascos, geralmente garrafas graduadas. A concentração de sedimentos e a distribuição de tamanho dos grãos são determinadas a partir das amostras pela análise em laboratório usando técnicas padronizadas.

Entretanto, esta técnica necessita de cuidados, uma vez que se a velocidade na entrada do frasco diferir da velocidade local do rio, a quantidade de sedimentos suspensos que entrou no frasco, pode não ser representativa daquela do rio. Carvalho (1994) sugere que seja realizada a amostragem isocinética, em que a velocidade no frasco é igual a velocidade local do rio. Essa correção se torna mais importante quanto maior for a porcentagem da fração areia na amostra. A amostragem isocinética pode ser realizada através de instrumentos que são acoplados ao frasco simples de amostra, que podem ser amostradores pontuais e por integração da profundidade. Os amostradores por integração da profundidade são os mais comumente usados no Brasil.

Devido a sua forma, um bocal (bico) é colocado na entrada do amostrador acima do ponto mais baixo do frasco, conforme mostrado na Figura 3.1. Assim, a maioria desses amostradores não consegue medir os 10-15 centímetros mais baixos da coluna da água. A amostragem com frasco requer uma intrusão no fluxo, embora o uso de amostradores aerodinâmicos minimize o efeito negativo disto.

Os amostradores por integração da profundidade são usados para coletar a amostra da coluna de água em uma seção vertical abaixando o instrumento ao nível desejado, geralmente tão perto do fundo quanto possível e então se eleva de volta para a superfície na mesma velocidade. Esta técnica é dependente da velocidade do amostrador (velocidade de trânsito) porque ele é quem se move através da coluna da água. Por este processo de integração da profundidade, os principais métodos utilizados durante a medição são o de igual incremento de largura (IIL) e o de igual incremento de descarga (IID).

Ambos os métodos precisam do conhecimento prévio das velocidades e das profundidades na vertical, sendo que o segundo também necessita do conhecimento da distribuição da vazão ao longo da seção. Essas informações provêm da medição de vazão líquida efetuada previamente. Os dois métodos possuem a vantagem de que, quando aplicados

corretamente, permitem a junção das várias amostras, originando uma única análise no laboratório (SANTOS et al., 2001).

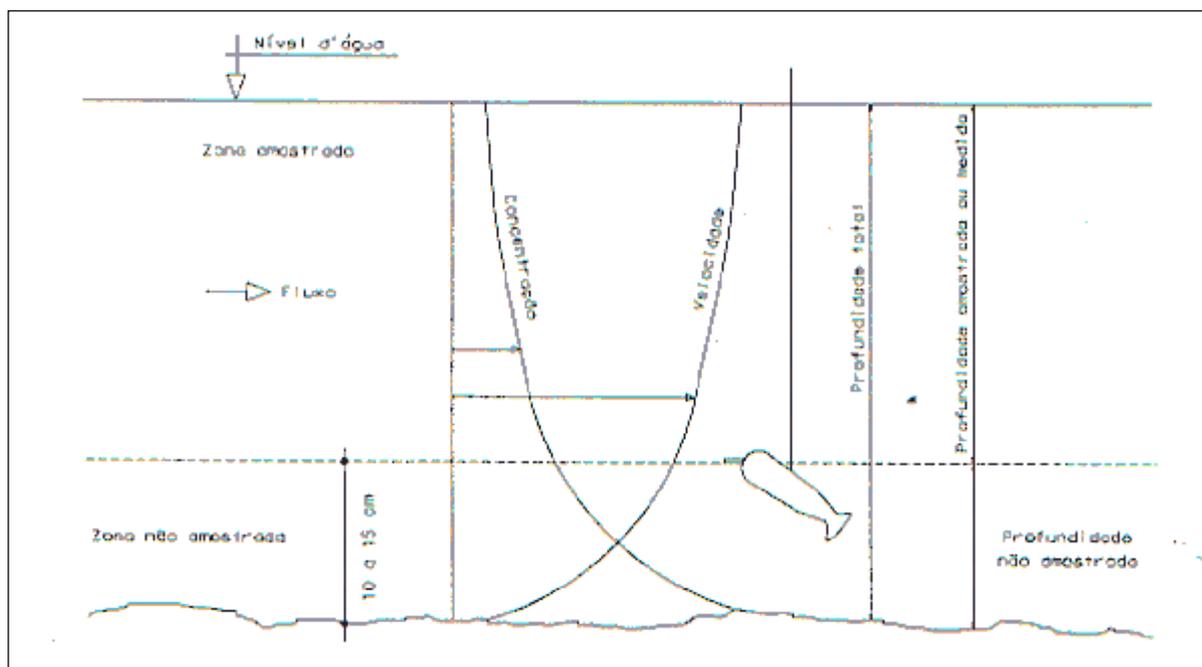


Figura 3.1– Identificação das regiões de uma amostragem mecânica
(Fonte: SANTOS et al., 2001)

Na amostragem com o uso do método IIL, a seção transversal é dividida em uma série de segmentos de igual largura, para a obtenção de uma série de subamostras. Sendo a velocidade de trânsito idêntica em cada vertical, essas subamostras são, portanto, compostas de volumes diferentes. Este procedimento fornece uma amostra em cada vertical com volume proporcional à vazão na zona amostrada. As subamostras podem ser misturadas em laboratório, para uma só análise de concentração e de granulometria, representando a média da seção transversal (CARVALHO, 1994).

O método de amostragem por igual incremento de descarga (IID) exige o conhecimento prévio da velocidade nas verticais e da distribuição da vazão ao longo da seção. Esse método consiste em dividir a vazão em partes iguais, de acordo com o número de verticais que se pretende amostrar, e coletar as amostras por integração na vertical de forma que também divida estas subseções em duas partes iguais de vazão. Como cada amostra representa uma parte igual de vazão, o volume amostrado deverá ser também igual, devendo-se ajustar a velocidade de trânsito em cada vertical amostrada. Desta forma, as amostras poderão ser misturadas no laboratório e originar uma única análise (SANTOS et al., 2001).

Caso as amostras individuais não tenham o mesmo volume, então é necessário analisá-las individualmente.

Os amostradores pontuais podem coletar amostras de água em uma profundidade desejada através de uma válvula de abertura operada no tempo apropriado. Os amostradores pontuais também podem ser usados da mesma maneira que os de integração da profundidade quando necessários.

A amostragem mecânica é uma técnica confiável, bem documentada, e extensamente usada. Os amostradores pontuais e por integração da profundidade permitem que quase toda a profundidade do rio seja amostrada. As amostras mecânicas são geralmente consideradas como padrão em comparação com os outros tipos de medição de sedimentos.

No entanto, quando comparada com técnicas que utilizam outros instrumentos, a amostragem mecânica tem uma menor definição temporal. Ao contrário dos métodos automatizados, como a amostragem bombeada e amostradores de nível ascendente (ANA) ou descendente (AND), para a amostragem mecânica é exigida uma maior disponibilidade da equipe de trabalho. Isto envolve, freqüentemente, trabalhar em períodos da noite ou em condições de tempestade, o que acrescenta custos e riscos na realização da amostragem.

3.1.2 Métodos Ópticos

A quantidade de material suspenso nas águas pode ser caracterizada usando os métodos ópticos. Esses métodos utilizam a atenuação, a transmitância ou o espalhamento da luz. Os instrumentos ópticos podem ser caracterizados como um dos três tipos. Quando a fonte óptica é mostrada diretamente no sensor, o instrumento (transmissômetro) mede a transmissão da luz, uma propriedade óptica inerente. No caso do espalhamento, o sensor mede a luz dispersada pelas partículas suspensas. Ambos são funções do número, do índice de refração, do tamanho e da forma das partículas suspensas.

A utilização dos instrumentos ópticos requer calibrações empíricas para converter as medidas em estimativas de concentração. Além disso, a resposta do instrumento varia com tamanho, composição e a forma do grão. Este método também apresenta a desvantagem de sofrer ações biológicas devido à permanência do equipamento na água. Os limites de concentração para estes instrumentos dependem em parte da distribuição do tamanho das partículas.

3.1.3 Difração a Laser

Os instrumentos comercialmente disponíveis para laboratório e medições em campo que usam a difração a laser são capazes de determinar a distribuição de tamanho do material em suspensão. Estes instrumentos consideram que, para ângulos pequenos, a difração da luz de laser por partículas esféricas é essencialmente idêntica à difração por uma abertura de igual tamanho (AGRAWAL; POTTSMITH, 2000).

Uma versão de campo de um equipamento a laser (*Laser In Situ Scattering and Transmissometry*) usa 32 sinais detectores para determinar uma distribuição de tamanho da partícula entre 1,25-250 μ m. Este equipamento foi testado em laboratório e em campo e mostrou sucesso na determinação de distribuições de tamanho das partículas e para tamanho constante de partículas suspensas (GARTNER et al., 2001).

Este tipo de equipamento pode ser usado para determinar a concentração do volume ou a concentração dos sólidos suspensos se a densidade da partícula for conhecida ou puder ser confiavelmente inferida (GARTNER et al., 2001). Ao contrário dos espalhadores ópticos de frequência única, os instrumentos de difração a laser não são sujeitos às potenciais imprecisões associadas com as mudanças no tamanho das partículas do material suspenso. Entretanto, como em todos os tipos de instrumentos ópticos de campo, agentes biológicos podem alterar as medidas (GARTNER; GRAY, 2003).

3.1.4 Imagem Digital Foto-Óptica

As técnicas de imagem digital foto-ópticas se originaram nos anos 80 para o uso na análise de características do sangue. A adaptação da tecnologia para a determinação em campo do tamanho e da forma dos sedimentos suspensos ocorreu na década de 90. Um

protótipo de sistema de foto digital que emprega lente, cabo de fibra ótica, célula de fluxo projetada especialmente, câmera acoplada a um computador e um sistema capaz de obter a imagem bi-dimensional de partículas suspensas, tem sido desenvolvido para uso automatizado (GOODING, 2001).

O desenvolvimento de programas de processamento de imagens tem melhorado sua qualidade, permitindo interpretações mais automatizadas e confiáveis (GRAY et al., 2003). A incorporação de um sistema de múltiplas lentes permite a aplicação nas distribuições de tamanho da areia, do silte e da argila no material em suspensão.

O equipamento foi projetado para o uso em laboratório, embora a tecnologia seja pretendida também para aplicações em campo. Não obstante, esses sistemas não requerem quase nenhuma calibração e podem finalmente substituir técnicas visuais de acumulação do tubo e da pipetagem em laboratório para a análise de distribuições de tamanho de partículas (GARTNER; GRAY, 2003).

3.1.5 Pressão Diferencial

A técnica da pressão diferencial emprega transdutores de pressão duplos para inferir a concentração dos sólidos suspensos a partir da densidade do escoamento do sedimento na água em duas posições na coluna da água. A diferença da pressão é convertida em um valor de densidade da água.

As suposições implícitas no método são que a densidade da água e do sedimento são conhecidas e transdutores de pressão muito sensíveis são utilizados. A técnica foi aplicada em laboratório onde demonstrou resultados muito promissores para determinar a concentração maciça das suspensões das micro-esferas de vidro (LEWIS; RASMUSSEN, 1999).

Para aplicações de campo, análises de laboratório de amostras de água são usadas para converter os valores de densidade e para determinar a concentração média dos sedimentos entre as duas entradas do transdutor de pressão na distância conhecida. A aplicação desta técnica no campo é comprometida pelo baixo sinal relativo de ruído, turbulência, concentração dos sólidos dissolvidos, e as variações da temperatura (LARSEN et al., 2001). Além disso, a análise pode ser afetada por variações da densidade do material em suspensão.

3.2 Perfiladores Acústicos de Correntes por Efeito Doppler (ADCP)¹

Os equipamentos perfiladores acústicos de correntes por Efeito Doppler (ADCPs) são mundialmente conhecidos no meio hidrológico. Esses equipamentos são utilizados para medir as velocidades das partículas presentes nas correntes de água em diferentes profundidades e determinar a vazão em seções transversais de rios, através do somatório de sucessivos perfis de corrente obtidos em tempo real. Originalmente, os instrumentos foram desenvolvidos para medir correntes marítimas e, a partir da década de 80, têm sido adaptados com sucesso, para medir vazões em cursos d'água, especialmente em estuários e em grandes rios (CAETANO, 2000).

O Efeito Doppler é uma mudança na frequência do som devido ao movimento relativo entre a fonte emissora do som e o observador. A frequência do som emitido por um objeto em movimento, para um observador parado, parece aumentar quando o objeto se aproxima dele e diminuir quando o objeto se afasta. A Figura 3.2 exemplifica esse efeito através da observação do número de ondas que chega até um observador parado e depois em movimento. Em (a), o observador, parado, percebe após o tempo de 1 segundo ($t = 1s$), as mesmas 8 ondas ($f = 8Hz$) emitidas pela fonte, resultando em uma diferença igual a zero ($fd = 0$), também chamada de frequência Doppler igual a zero. Em (b), o observador ao se aproximar da fonte, percebe, no tempo de 1 segundo ($t = 1s$), 10 ondas ($f = 10Hz$). A diferença entre a frequência percebida pelo observador e a frequência emitida pela fonte é agora de 2 ondas ($fd = 2Hz$). No item (c), o observador se afasta da fonte emissora e percebe 6 ondas no tempo de 1 segundo ($t = 1s$). Neste caso, a frequência Doppler (fd) é igual a $-2Hz$. O sinal negativo indica o afastamento relativo entre a fonte e o observador.

¹ Neste trabalho, o termo ADCP se refere genericamente aos equipamentos que utilizam o Efeito Doppler. Assim, o termo ADCP não está necessariamente vinculado a algum fabricante do equipamento.

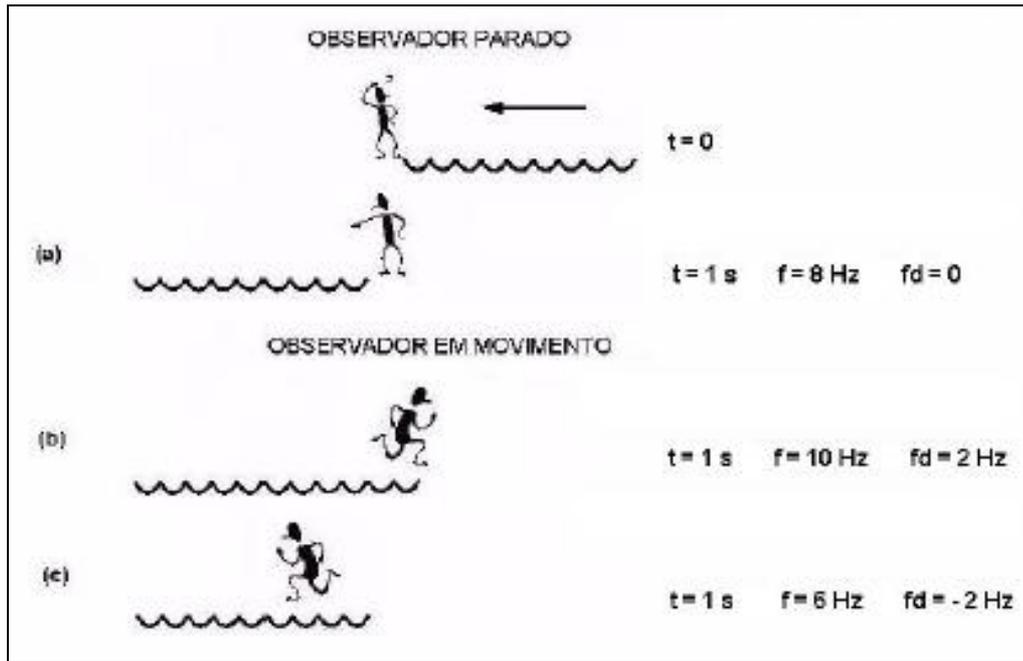


Figura 3.2 – Verificação do Efeito Doppler pelo número de ondas por um observador (Fonte: CAETANO, 2000)

O Efeito Doppler é usado para distinção entre objetos parados e objetos em movimento e para fornecer informação sobre a velocidade destes objetos, através da medição da diferença de frequência entre o som emitido por uma fonte e o som percebido por um observador (receptor). O Efeito Doppler leva em consideração a frequência do som quando tudo está parado, a velocidade relativa entre a fonte e o receptor das ondas acústicas, e a velocidade do som. Ele depende somente do movimento radial entre a fonte e o receptor, ou seja, do movimento de aproximação ou afastamento entre eles (RDI, 1989). A equação 1 apresenta os componentes para o cálculo da diferença de frequência ou frequência Doppler (F_d).

$$F_d = F_s \frac{V}{C} \quad (1)$$

Onde:

F_d = Diferença de Frequência (Hz)

F_s = Frequência transmitida de uma fonte (Hz)

V = Velocidade relativa entre a fonte e o objeto (m.s^{-1})

C = Velocidade do som no meio considerado (m.s^{-1})

Um ADCP é constituído por sensores (transdutores) que, alternadamente, assumem as funções de emissor (fonte) e receptor de pulsos sonoros. Ao emitir uma onda sonora, os

pulsos acústicos percorrem a coluna d'água, subseqüentemente, formando feixes sonoros. As partículas de sedimentos transportadas pela corrente de água, sujeitas aos feixes sonoros, refletem os pulsos que retornam para o instrumento. O instrumento recebe e registra essa frequência modificada pelo movimento das partículas, chamado de eco, retro-espalhamento ou ainda *backscatter*² (ABS). A diferença entre a frequência da onda sonora emitida pelo transdutor e a frequência do eco percebido de volta no aparelho, originada pelas partículas carregadas pela água, é proporcional à velocidade de afastamento ou aproximação entre o transdutor e as partículas. A Figura 3.3 mostra o pulso acústico emitido pelo transdutor e recebido de volta após ter sido refletido pelas partículas em suspensão na água (espalhadores).

Assim, como há uma mudança na frequência (Efeito Doppler) entre o transdutor e a partícula, e outro da partícula para o transdutor, a equação se modifica conforme a equação 2.

$$F_d = 2F_s \frac{V}{C} \quad (2)$$

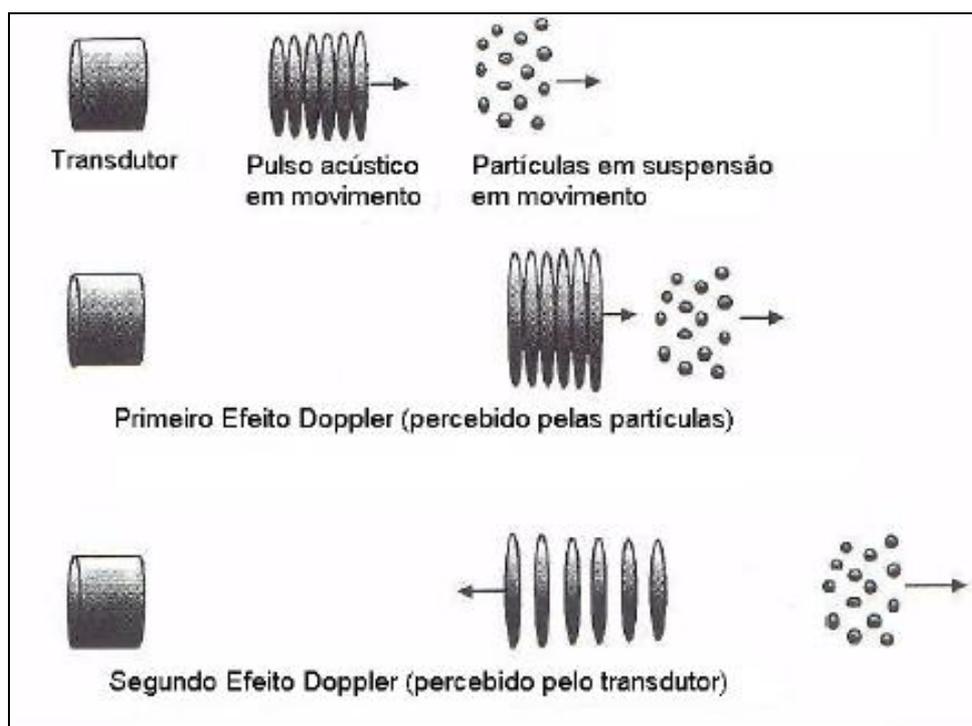


Figura 3.3 – Mudança na frequência de um pulso emitido pelo ADCP
(Fonte: SIMPSON, 2001)

² Sinal de retorno do som, observado e gravado pelo equipamento.

Apenas parte do eco refletido é lido pelo instrumento. Como o Efeito Doppler mede a velocidade radial, somente uma componente da velocidade da água é utilizada. Essa componente é acrescentada à equação, resultando na equação 3.

$$F_d = 2F_s \frac{V}{C} \cos q \quad (3)$$

Onde q é o menor ângulo formado entre a direção do feixe do pulso acústico e a direção horizontal.

À medida que o ADCP processa o sinal refletido pelas partículas em suspensão na água, coluna líquida é dividida em um número discreto de segmentos na vertical. Estes segmentos são denominados células de profundidade ou *bins*. O equipamento determina a velocidade e a direção de cada célula de profundidade, cuja altura é determinada pelo operador do equipamento e a largura é função da velocidade do barco e da velocidade de processamento dos pulsos. O cálculo da vazão é obtido através da integração das vazões de cada célula de profundidade em toda a seção medida. A Figura 3.4 mostra o esquema ilustrativo de medição do perfil de velocidades e compara com os pontos medidos pelos equipamentos mecânicos.

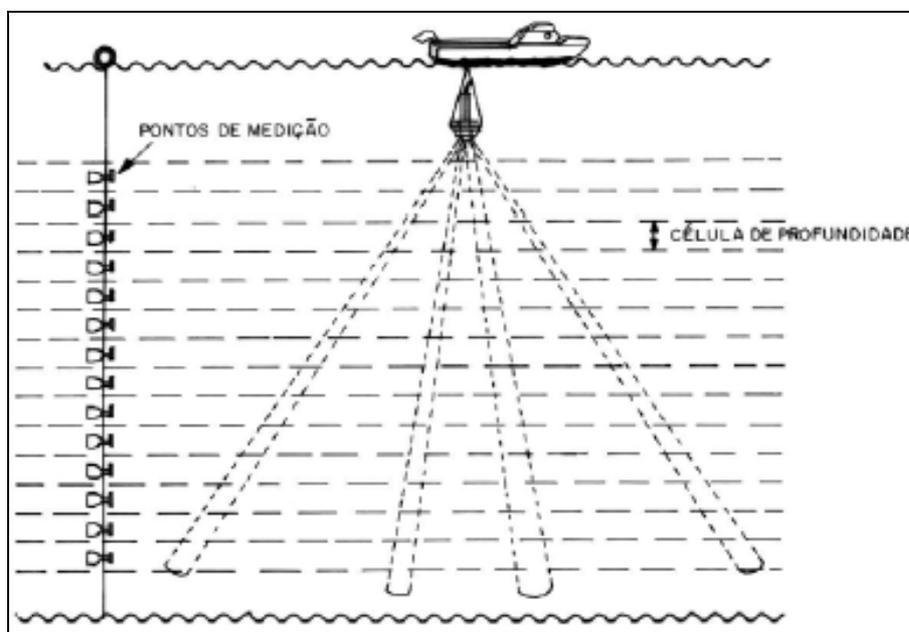


Figura 3.4 – Células de profundidade medidas pelo ADCP
(Fonte: CAETANO, 2000)

Os ADCPs utilizam a transmissão de feixes de som na coluna da água por 3 ou 4 transdutores (dependendo do fabricante) altamente direcionais e com largura de 2,5 graus, inclinados em 20 ou 30 graus da vertical. Os transdutores são dirigidos por um amplificador de potência comum, mas com três (ou quatro) canais receptores independentes. Os dados são adquiridos da plataforma do ADCP usando um computador para a aquisição e o *software* de pós-processamento fornecido pelo fabricante.

O sinal recebido difere por um deslocamento de frequência Doppler proporcional à diferença relativa da velocidade entre o transdutor e os espalhadores. Uma série rápida e contínua de transmissões permite um perfilamento da coluna de água, dividida em células (*bins*). Os dados de cada célula são os componentes da velocidade nas direções x, y e z. Os *bins* são agrupados nos *ensembles* (verticais), que são gravados instantaneamente. Estes dados podem então ser manipulados a partir de uma pré-definição de parâmetros realizada antes da medição para fornecer a representação detalhada da velocidade do fluxo através da coluna da água.

O ADCP mede diretamente as componentes da velocidade segundo a direção em que são emitidos os pulsos acústicos. Ele tem dois pares de transdutores: um alinhado na direção Leste – Oeste e outro na direção Norte – Sul, conforme ilustrado na Figura 3.5. Com o primeiro par mede-se uma das componentes horizontais da velocidade e a componente vertical. Com o segundo, mede-se a segunda componente horizontal, que é ortogonal à primeira, bem como uma segunda estimativa da componente vertical. Portanto, são produzidas as duas componentes horizontais e ortogonais da velocidade e duas estimativas da componente vertical.

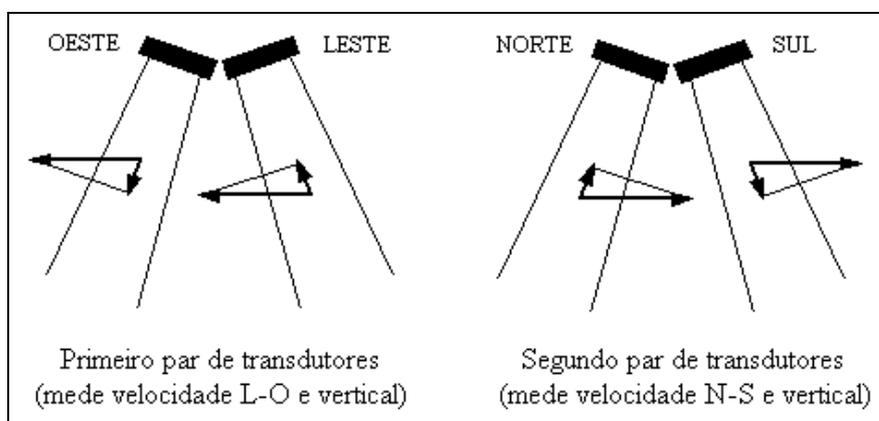


Figura 3.5 – Componentes da velocidade medidas pelo ADCP (Fonte: SIMPSON, 2001)

A diferença entre as duas estimativas da componente vertical é chamada de “erro de velocidade” e seria nula se as camadas horizontais fossem totalmente homogêneas e o processo de medição absolutamente preciso. Para medir as três componentes da velocidade seriam necessários apenas três transdutores, sendo o quarto redundante, mas que permite justamente calcular o “erro de velocidade”. Esta estimativa permite avaliar a qualidade dos dados, independentemente da origem dos erros: equipamento, processamento ou não homogeneidade das camadas (SANTOS et al., 2001).

Em campo, os ADCPs podem ser instalados de diversas formas, dependendo dos modelos e das informações que se deseja obter do curso d’água. Os principais modos de instalá-los são: fundeados (fixos no fundo do rio, virados para cima) e embarcados (“*vessel*” – emitindo os sinais sonoros próximos da superfície em direção ao fundo).

O perfilador acústico de corrente por Efeito Doppler montado sobre um barco (“*vessel*”) é um eficiente método para medir a descarga e mapear padrões da velocidade nos rios. A suposição fundamental feita é que os espalhadores estejam se movendo na mesma velocidade em que a água da célula (*bin*) em que eles estão. Esta velocidade pode ser determinada usando-se a técnica do “*bottom tracking*”. A velocidade medida pelo ADCP é a velocidade relativa entre a água e o instrumento (velocidade relativa da água). Como o instrumento está montado em um barco em movimento, a velocidade do barco deve ser medida e usada para computar a velocidade verdadeira da água.

A técnica chamada de “*bottom tracking*” computa o deslocamento dos pulsos acústicos Doppler refletidos do fundo. Assumindo que o fundo não está se movendo, a velocidade medida pelo *bottom tracking* é a velocidade do barco em relação ao fundo. Entretanto, o transporte do sedimento próximo ao fundo pode afetar o Efeito Doppler dos pulsos do fundo. Se o *bottom tracking* for afetado pelo transporte do sedimento do fundo, a velocidade do barco estará inclinada no sentido oposto do movimento do sedimento. Assim, um barco parado no rio pareceria mover-se rio acima. Esta influência na velocidade do barco resultará em velocidades e descargas medidas da água que estarão inclinadas para menos (menor do que a descarga verdadeira). Para prevenir esse problema é preciso, antes de cada medição, realizar a verificação da ocorrência ou não de movimento relativo do fundo, o chamado “fundo móvel” (GAMARO, 2006).

A função principal do ADCP é gravar as velocidades da corrente nas profundidades, continuamente. Uma função secundária, de alguns sistemas, permite a indicação da força acústica dos sinais retornados de cada célula. A Figura 3.6 mostra como estas informações de velocidades e *backscatters* são mostradas por um programa de cálculo das vazões.

A utilidade dos equipamentos acústicos por Efeito Doppler como instrumentos interdisciplinares está bem estabelecida. Há algumas limitações significativas ao se utilizar esta técnica para o monitoramento do fluxo de correntes. A mais comum e mais crítica é a presença de bolhas de ar na coluna da água. As bolhas de ar transmitem o sinal em uma velocidade significativamente diferente daquele das águas, devido à compressão, e induzem um ruído considerável nos resultados. Outras limitações importantes estão ligadas à forma das seções de medição no rio (profundidade e largura), que estão diretamente relacionadas com a frequência do equipamento utilizado.

A Figura 3.7 ilustra as regiões não medidas diretamente em função das limitações desses equipamentos. Até o momento, apenas um fabricante possui dois modelos que operam com duas frequências simultaneamente. Cada frequência tem um alcance (profundidade) diferente. Quanto maior a frequência, menor é a profundidade que o sinal acústico atinge ao se deslocar na água sem perdas significativas na sua intensidade.

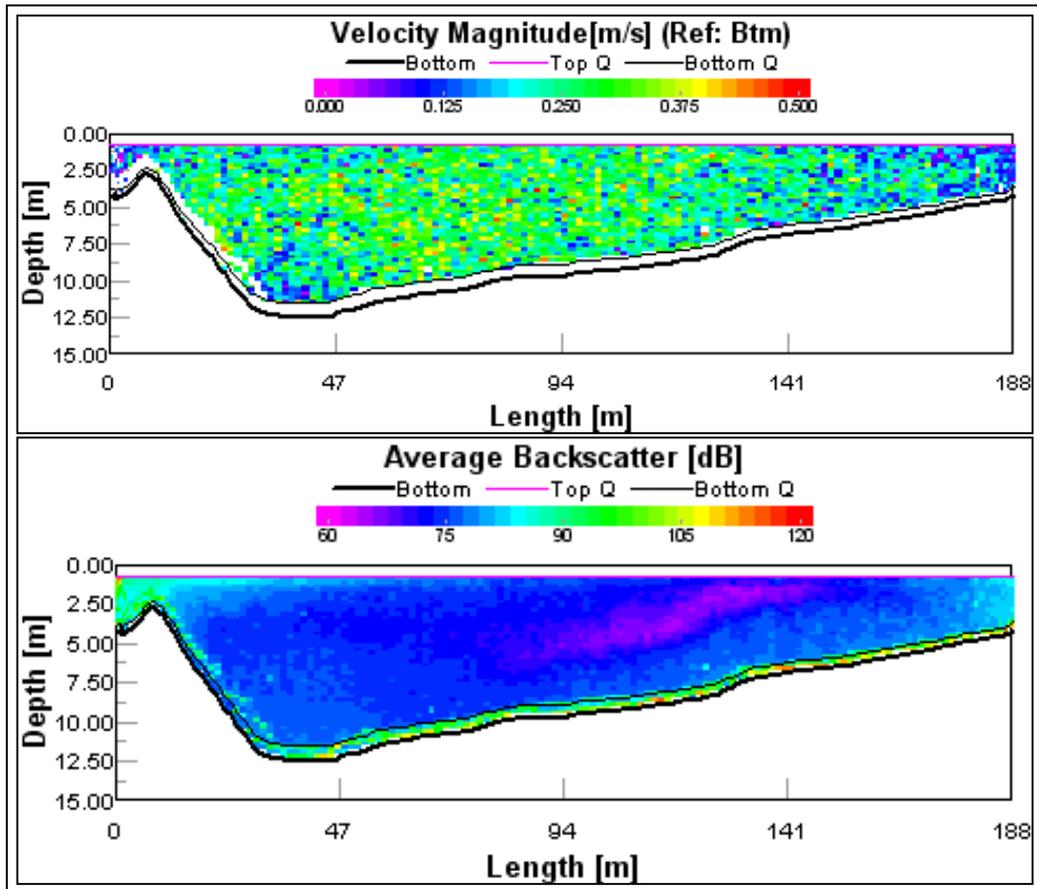


Figura 3.6 – Velocidades e *Backscatters* como apresentados pelo programa de cálculo

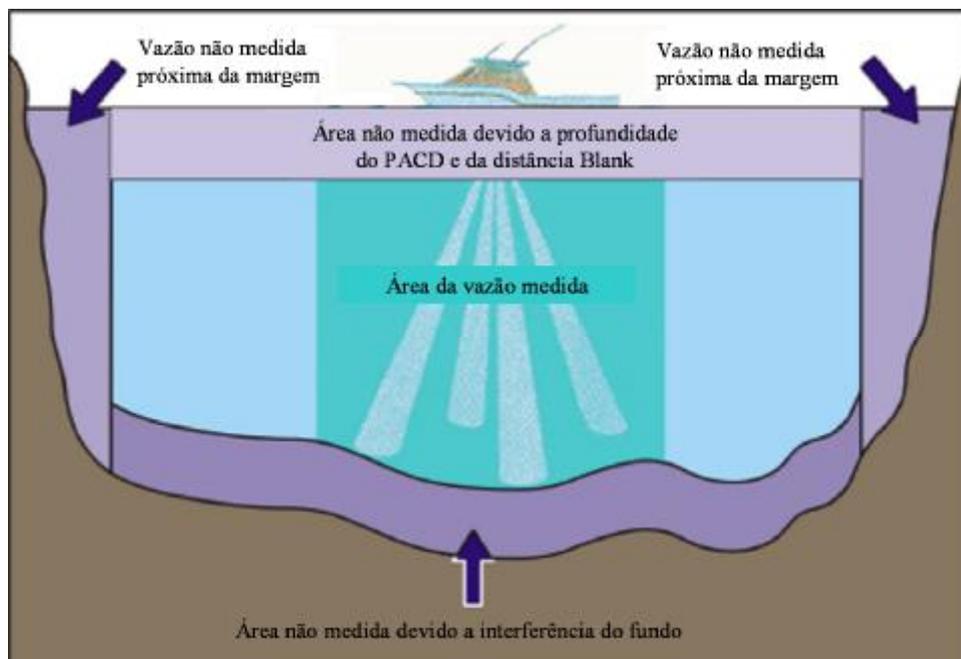


Figura 3.7 – Áreas medidas e não medidas pelo ADCP
(Fonte: RDI, 1996)

3.3 O ADCP e o material em suspensão

O uso do método acústico para a medição de perfis de concentração de sedimentos em suspensão teve início com o trabalho de Young et al. (1982). Estudos de campo como os de Hanes et al. (1988) e Thorne et al. (1993) mostraram remotamente a utilidade das medições de concentração de sedimentos suspensos com elevada definição espacial e temporal. As técnicas que permitem a conversão do sinal acústico de retorno em concentração de sedimentos foram desenvolvidas simultaneamente com a evolução dos instrumentos (POERBANDONO; MAYERLE, 2004).

Vincent et al. (1986) e Sheng e Hay (1988) examinaram a dispersão do som nos grãos da areia. A elucidação prolongada da teoria do sinal de um equipamento acústico e a conversão da intensidade do eco na concentração de sedimentos são reportadas em Libicki et al. (1989) e em Thorne e Hardcastle (1991). Thorne et al. (1991) desenvolveram e aplicaram técnicas de inversão para sistemas de frequência única. Hay e Sheng (1992) dirigiram-se à interpretação da dispersão por frequências múltiplas para estimativa da concentração e tamanho das partículas.

Thevenot et al. (1992) desenvolveram parâmetros de calibração como parte de um estudo para monitorar o material dragado próximo à praia de Tylers na Virgínia. Thevenot e Kraus (1993) compararam métodos ópticos e acústicos usando um ADCP com frequência de 2400 kHz no estuário de Chesapeake. Hamilton et al. (1998) forneceram uma comparação de métodos ópticos e acústicos em um estudo que descreve medições de sedimentos coesivos. Baseado na elucidação de Thorne e Hardcastle (1991), Holdaway et al. (1999) reviram e aplicaram a conversão da intensidade do eco em concentração de sedimentos.

Mais recentemente, Byrne e Patino (2001), Land e Jones (2001) e Gartner e Cheng (2001) descreveram técnicas para estimar séries temporais de concentração de sedimentos suspensos utilizando ADCPs comerciais. Entretanto, alguns estudos utilizaram sensores acústicos não comerciais projetados especialmente para os experimentos. Muitas técnicas necessitam de extensivas calibrações em laboratório ou foram usadas em trabalhos de curta duração. Outros estudos não consideraram as perdas acústicas no campo próximo do transdutor acústico.

Os algoritmos de pós-processamento são complexos, requerendo compensações para propriedades da água como temperatura, salinidade e pressão, assim como características do

instrumento como frequência, potência e transdutor (THORNE et al., 1991; DOWNING et al., 1995). Em geral, os pesquisadores desenvolvem seu próprio *software*. No entanto, existem dois *softwares* para a transformação dos dados captados pelos equipamentos acústicos em concentração de sedimentos disponíveis comercialmente. Além das pesquisas realizadas pelos fabricantes dos *softwares*, foram poucos os trabalhos que já utilizaram estas ferramentas. Embora os programas realizem todas as transformações necessárias automaticamente, incluindo as correções para atenuação devido às partículas suspensas e o espalhamento do sinal no campo próximo ao transdutor devido à forma não esférica das partículas, ainda são necessárias calibrações com amostras de água do local (ROTARU et al., 2006).

Os instrumentos acústicos podem apresentar diferentes frequências. Instrumentos de frequência única podem fornecer estimativas de concentração dos sedimentos, porém necessitam informações para estimar a distribuição de tamanho das partículas. O método acústico parece apropriado nas concentrações com baixa relação massa/volume (g.l^{-1}), mas concentrações mais elevadas são problemáticas especialmente ao usar as frequências acústicas maiores que são mais sujeitas à atenuação pelo sedimento.

A concentração de sedimentos em suspensão é assumida como sendo diretamente proporcional à intensidade acústica, que é a tensão gravada pelo ADCP, e logaritmicamente proporcional à atenuação acústica devido à concentração de sedimentos na água. O resultado da intensidade do eco é uma resposta não linear em concentrações elevadas (HAMILTON et al., 1998). Embora seja uma função da frequência, a atenuação devido ao sedimento deveria ser considerada na presença de quantidades como $0,1 \text{ g.l}^{-1}$ (THORNE et al., 1991). Ainda, múltiplos espalhamentos produzem uma resposta não linear quando a concentração está na ordem de 10 g.l^{-1} (SHENG; HAY, 1988; HAY, 1991).

O método acústico apresenta as vantagens de ser geralmente imune à ação de agentes biológicos, não intrusivo e fornecer uma série temporal de perfis de concentração (DOWNING, 1996; HAMILTON et al., 1998). Entretanto, Filizola (2003) e Filizola e Guyot (2004), ao compararem os dados de diversos rios da bacia Amazônica, identificaram variações na intensidade do sinal de retro-difusão acústica em função da qualidade do material em suspensão presente nas águas, mais especificamente pela abundante presença de plânctons em determinadas épocas do ano.

Uma das limitações do método acústico está associada com a relação existente entre a frequência do instrumento e a distribuição de tamanho das partículas. A base de análise desta relação é a teoria acústica do modelo de espalhamento de Rayleigh que é restrito às partículas cujo produto entre o raio da circunferência (a) e o número de onda (k) seja menor que a unidade, $k.a < 1$. (BARBOSA, 2005).

Para instrumentos acústicos de frequência fixa, essa condição restringe a um tamanho máximo na dimensão das partículas para que o método seja empregado, além do qual a concentração (C_{ss}) estimada pode conter erros. 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, pois os sensores acústicos são mais sensíveis às partículas grandes (proporcional ao volume), enquanto os ópticos, às partículas pequenas (proporcional à área da seção transversal) (BARBOSA, 2005).

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.

O grau de dispersão de Rayleigh que sofre um raio de luz depende do tamanho das partículas e do comprimento de onda da luz, e do coeficiente de dispersão. Portanto, a intensidade da luz dispersada depende inversamente da quarta potência do comprimento de onda ($1/\lambda^4$), relação conhecida como Lei de Rayleigh-Jeans. A Figura 3.8 apresenta a função de dispersão ou espalhamento com relação ao comprimento de onda emitido conforme determinado por Rayleigh. É interessante notar que os espalhadores são considerados para o produto $k.a < 1$. Esta curva mostra também que quando $k.a > 1$ a função espalhamento tende a

se tornar constante. Outro fator importante é que quando $k.a < 1$, a função de dispersão, sendo proporcional a k^4 , também é proporcional a quarta potência da frequência (f^4).

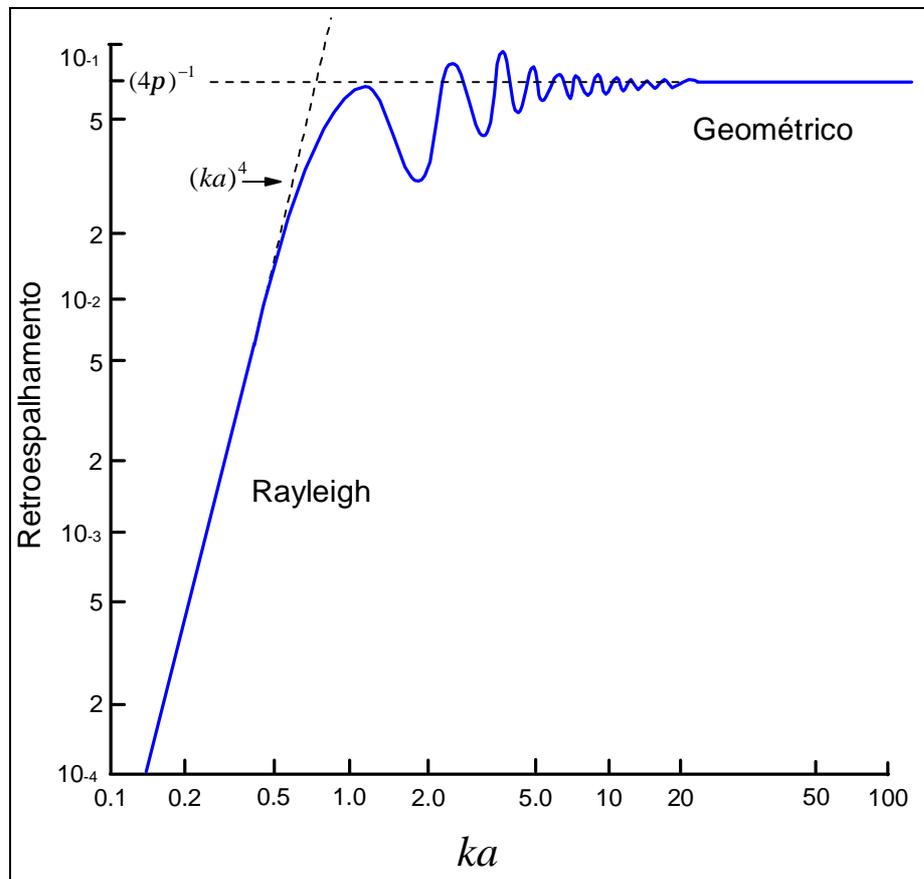


Figura 3.8 – Curva de Rayleigh

Quando $k.a > 1$, a Figura 3.8 mostra que a curva tende a tornar-se constante. Neste caso, a intensidade retro-espalhada é proporcional à seção reta do elemento espalhador. A teoria de Rayleigh é postulada na consideração de que as partículas espalhadoras são de pequenas dimensões comparadas com o comprimento de onda da radiação. Essas pequenas partículas, como moléculas, e partículas muito menores como aerossóis, tornaram-se conhecidas como partículas de Rayleigh, e uma atmosfera composta destas pequenas partículas é denominada de atmosfera de Rayleigh.

Diferentes frequências de ondas acústicas têm diferentes sensibilidades aos mesmos tamanhos de partículas. A sensibilidade é definida como a intensidade ou força com que a onda acústica é retro-espalhada pelas partículas em suspensão presentes na água para uma certa concentração. A variação da sensibilidade em relação ao tamanho das partículas é ilustrada na Figura 3.9.

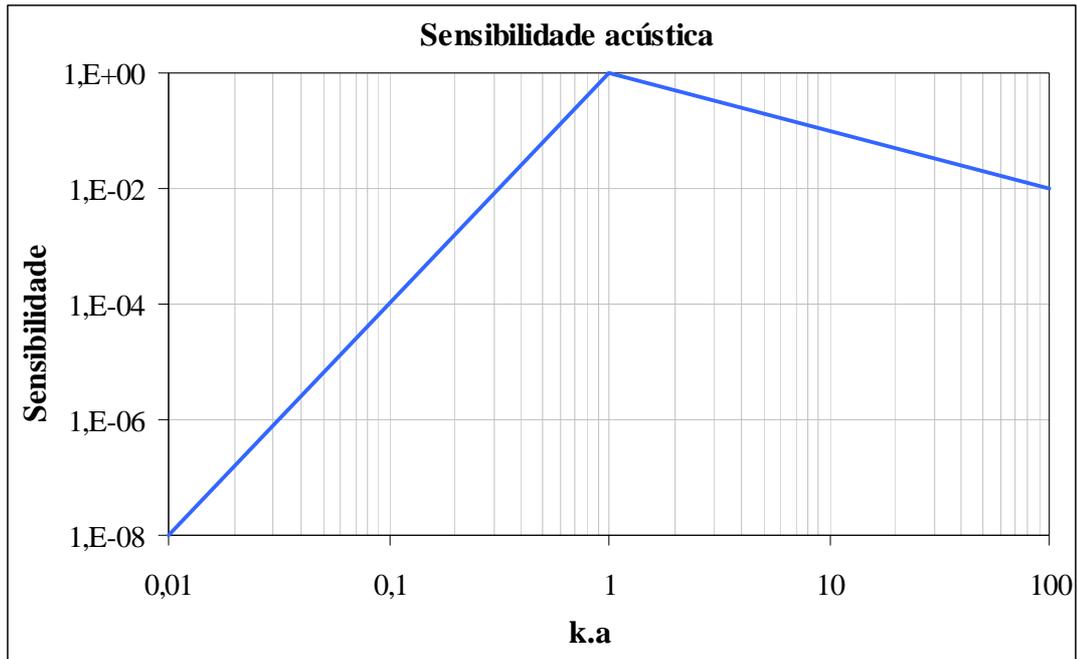


Figura 3.9 – Relação entre a sensibilidade acústica e o diâmetro das partículas

Na Figura 3.9, a letra k representa o número de onda acústica que é calculado como $k = 2.\pi.\lambda^{-1}$, sendo que λ é o comprimento de onda de cada frequência, e “a” é o tamanho efetivo da partícula, tipicamente dado pelo raio. O pico de sensibilidade ocorre quando o produto k.a é igual à unidade ($k.a = 1$). Neste caso, a circunferência da partícula é igual ao comprimento de onda acústica. Para pequenas partículas, quando $k.a < 1$, a sensibilidade é proporcional à quarta potência do raio da partícula. Para as partículas maiores, em que o produto k.a é maior do que a unidade ($k.a > 1$), a sensibilidade é inversamente proporcional ao raio da partícula. Este é um modelo simplificado para a determinação da sensibilidade que não considera muitos fatores que afetam a força com que as partículas retro-espalmam as ondas acústicas. Contudo, este modelo é bastante útil para a avaliar que tipo de partícula será detectada pelos sistemas acústicos.

Cada frequência acústica tem um tamanho de partícula que apresenta um pico de sensibilidade. Porém, para as partículas menores, a sensibilidade cai rapidamente. Quando o tamanho da partícula está abaixo de um certo nível, tipicamente na ordem de $k.a < 0,05$, a sensibilidade é tão baixa que o sistema não consegue efetivamente detectar as partículas.

Se a sensibilidade em uma certa frequência é conhecida, deve-se identificar também a distribuição do tamanho das partículas para estimar a sensibilidade em outras frequências. Dados acústicos de múltiplas frequências podem, ao menos teoricamente, serem usados para

determinar a concentração e a distribuição de tamanho das partículas, embora na prática este processo ainda seja complexo.

Para uma única frequência a força do sinal retro-espalhado pelas partículas é uma função de seu tipo, tamanho e concentração. Para um tipo e tamanho constante de partículas, o sinal retro-espalhado é diretamente proporcional à concentração das partículas suspensas na água. De forma geral, isto é visto em uma relação com o logaritmo da concentração das partículas em suspensão ($10 \cdot \log_{10}(C_{ss})$). Por exemplo, se a concentração aumenta por um fator de 2, a intensidade do sinal retro-espalhado aumenta 3 dB ($10 \cdot \log_{10}(2) = 3$ dB).

Durante sua propagação na água, a onda acústica sofre um espalhamento geométrico e uma atenuação devido à massa de água e à presença dos sedimentos em suspensão. Isto resulta em perdas na intensidade do sinal emitido, neste caso, chamadas de perdas de transmissão (TL). Gartner (2004) apresenta as principais equações relacionadas à forma simplificada da equação do sonar para reverberação do som, desenvolvida por Urick (1975), considerando-se que o coeficiente de absorção do som pela água (α) se mantenha constante ao longo de toda a coluna d'água.

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (4)$$

onde:

EL = nível (intensidade) do eco (dB);

SL = nível (intensidade) da fonte que é conhecida ou medida (dB);

TL = perdas relativas à transmissão do som (dB);

TS = força do eco das partículas em dB, que é dependente da razão entre o comprimento de onda e o diâmetro da partícula.

O termo relativo às perdas na transmissão nos caminhos de ida e volta do som ($2TL$), não considerando as correções para atenuação devido às partículas suspensas e o espalhamento do sinal no campo próximo ao transdutor devido à forma não esférica das partículas, pode ser definido como:

$$2TL = 20 \log(R) + 2aR \quad (5)$$

com:

R = distância da célula medida, em metros, obtido pela expressão " $r + D/4$ ",

r = distância da face do transdutor até o centro de uma célula (*bin*) em metros,

D = tamanho da célula (m),

α = coeficiente de absorção do som pela água em dB.m^{-1} ,

$20 \log(R)$ = termo referente às perdas devido ao espalhamento do sinal acústico,

$2\alpha R$ = termo referente às perdas devido a absorção do sinal.

O coeficiente de absorção da água varia em função de alguns fatores, como frequência acústica, salinidade, temperatura e pressão. A perda pelo espalhamento do sinal é diferente no campo próximo e distante do transdutor. A transição entre campo próximo e distante é chamado de alcance crítico ($R_{CRÍTICO}$).

$$R_{CRÍTICO} = \frac{\rho a_t^2}{I} \quad (6)$$

onde:

a_t = raio do transdutor em cm,

λ = comprimento de onda acústico

A correção para a perda por espalhamento do sinal, para o campo próximo ao transdutor (ψ) pode ser calculada pela fórmula apresentada por Downing et al. (1995):

$$y = \left[1 + 1,35Z + (2,5Z)^{3,2} \right] / \left[1,35Z + (2,5Z)^{3,2} \right] \quad (7)$$

em que:

Z = relação $R/R_{CRÍTICO}$

Segundo Gartner (2004), o $R_{CRÍTICO}$ para um ADCP de 1200 KHz com diâmetro do transdutor de 5,1 cm é 167 cm e para um equipamento de 2400 KHz com transdutor de 2,5 cm de diâmetro o $R_{CRÍTICO}$ é de 80 cm.

Em termos de parâmetros de um ADCP, o nível do eco das partículas pode ser expresso pela seguinte equação:

$$EL = K_c (E - E_r) \quad (8)$$

em que:

E = intensidade do eco gravada em *counts* (unidade interna do aparelho),

E_r = nível de referência do indicador da força do sinal recebido (RSSI). É o nível base quando nenhum sinal está presente,

K_C = fator de escala do RSSI, usado para converter *counts* para dBs. Varia para cada instrumento e transdutor, e tem um valor entre 0,35 – 0,55 (DEINES, 1999).

De um ponto de vista prático, não é necessário conhecer o nível de intensidade da fonte nem é possível medir todas as características necessárias do material em suspensão para o modelo de força do eco das partículas (TS). Então, seguindo a derivação de Thevenot et al. (1992), a equação (4) é apresentada em termos de *backscatter* relativo (RB). Baseados nestas equações apresentadas e no uso prático dos dados de *backscatter* obtidos com ADCPs, Deines (1999), Sontek (2002), Patino e Byrne (2001) e Gartner (2002) propuseram aplicações práticas de aproximações para converter intensidade do eco em concentração de sedimentos em suspensão. Depois de substituições apropriadas, a equação de sonar pôde ser convertida em dois tipos de equações empíricas, como apresentado nas equações 9 e 10.

$$10\log_{10}\left(\frac{C}{C_r}\right) = K.\Delta EL \quad (9)$$

e

$$10\log_{10}(C) = A.EL + B \quad (10)$$

em que:

$$\Delta EL = EL - ELr$$

EL = nível (intensidade) do eco em dB;

ELr = intensidade do eco em um nível de referência, dB;

C = concentração do sedimento em suspensão;

C_r = concentração do sedimento em suspensão medido no nível de referência;

K = constante de proporcionalidade;

A e B = coeficientes obtidos por regressão, inclinação e interceptação.

O primeiro tipo, representado pela equação 9, é baseado na proporcionalidade do incremento da intensidade do eco (ΔEL) com o logaritmo da razão entre as concentrações. Esse tipo de equação foi apresentado por Deines (1999) e Sontek (2002). Patino e Byrne (2001) e Gartner (2002) apresentaram a equação (10), baseada em uma relação linear entre o logaritmo da concentração e a intensidade do eco.

Segundo Gartner (2004), todos estes cálculos assumem que as partículas de sedimentos são como esferas de mesmo tamanho. A determinação dessa atenuação considerando uma distribuição de tamanho de partícula log-normal seria mais complexa, mas provavelmente não diferiria significativamente dos valores apresentados. Porém, a perda por atenuação devido ao próprio material em suspensão, composto de partículas agregadas, é

desconhecida. Thorne et al. (1991) concluíram que, no caso de frequências acústicas de 3,0 e 5,65 MHz, a atenuação de areias finas pode se tornar significativa a distâncias na ordem de um metro, quando as concentrações se aproximam de 100 mg.l^{-1} .

Teoricamente, a medição acústica da concentração das partículas suspensas requer uma técnica de conversão que considere todos os mecanismos de dispersão e de perdas, permitindo assim a transformação da intensidade acústica medida para se obter a concentração de partículas suspensas. Os erros desse processo resultam da incerteza nos coeficientes de dispersão e de absorção, incertezas na técnica de conversão e a contaminação por ruídos e outros sons dispersos pelas partículas no campo. Mesmo em um ambiente idealizado, como em laboratório, a técnica de conversão da intensidade do som retornado em concentração do sedimento é complexa, uma vez que a intensidade em qualquer distância é afetada pela concentração do interior do campo no trajeto do som. Assim, a conversão envolve geralmente a iteração sucessiva ao longo da trajetória do som, e é bastante sensível à estimativa da concentração no primeiro ponto (WREN et al., 2000).

A velocidade da propagação do som na água é aproximadamente 1500 m.s^{-1} , enquanto o movimento do sedimento em suspensão é da ordem de 1 a 100 cm.s^{-1} . Esta velocidade, relativamente mais rápida do som na água, torna possível congelar virtualmente o movimento do sedimento e fazer a varredura instantânea das partículas em suspensão ao longo do trajeto do som. Uma série temporal de perfis de intensidade acústica pode ser gerada emitindo pulsos de som repetidamente. A amplitude de um conjunto de ondas de som retornado se altera com o tempo, embora o pulso acústico que parte tenha uma amplitude constante. O eco retornado contém informações da água e características das partículas suspensas, ao longo do trajeto do som (RDI, 1996).

3.4 Métodos de Conversão do Sinal Acústico em C_{ss}

A maioria dos estudos sobre o sinal acústico tem sido conduzido para prognosticar a pressão do sinal de retorno, embora, para cálculo da concentração de sedimentos, o interesse seja justamente o inverso, pois o que se deseja obter não é a previsão de quão forte o sinal emitido irá retornar, mas sim, a partir da intensidade do sinal que retorna, a possibilidade de prever a concentração de massa em suspensão (técnica de inversão).

Em seu trabalho, Barbosa (2005) apresenta três metodologias de cálculo para se obter perfis de concentração de massa a partir do sinal de retorno acústico de um ADCP: o método implícito, o explícito e o “prático”.

Os métodos implícito e explícito diferem entre si apenas na metodologia de cálculo, pois a formulação usada é a mesma. No primeiro, é necessário se conhecer um dado de concentração para uma determinada profundidade e, a partir daí, extrapolar para as demais profundidades. No método explícito, parte-se da premissa que na interface transdutor-água, o coeficiente de atenuação (α) é exclusivamente o da água, ou seja, a concentração de sedimentos nessa interface é tão pequena que se pode desprezar a atenuação feita pelo próprio sedimento. Assim, calcula-se a primeira massa e com esse resultado, calcula-se a atenuação que essa massa é capaz de provocar ao feixe acústico. Feito isso, acrescenta-se esse valor ao (α), tendo, agora, um (α') como resultado da soma do coeficiente de absorção da água, mais o coeficiente de absorção feito pela primeira massa de sedimento calculada. Com esse (α'), calcula-se a segunda massa e a partir daí, o processo se repete de maneira iterativa ao longo de toda a coluna d'água.

O método prático permite o cálculo dos perfis de concentração de sedimentos a partir de dados fornecidos pelo próprio equipamento e de outros que são introduzidos na formulação pelo usuário. Ao contrário do método implícito e explícito, poucos trabalhos foram feitos com base no método “prático”, que é na verdade a metodologia desenvolvida por Deines (1999), a partir da equação do sonar. A seguir são apresentados alguns métodos que consideram o sinal acústico para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão na água.

3.4.1 Método de Deines

O método proposto por Deines (1999) considera a proporcionalidade entre incrementos de intensidade do sinal acústico e a razão entre concentrações. As intensidades dos ecos registradas pelo ADCP são convertidas em concentrações de sedimentos através de uma correlação estabelecida a partir de uma intensidade do eco e uma concentração de sedimentos em suspensão correspondente.

A aplicação do método proposto por Deines (1999) requer a medição simultânea da intensidade do eco e da concentração de sedimentos em suspensão, com equipamento

mecânico ou óptico, em uma determinada posição ao longo da vertical, definida como nível de referência (NR).

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

$$C_v = 10\log(C_i) \quad (11)$$

na qual, C_i é a concentração de sedimentos estimada, em mg.l^{-1} , correspondente a célula número i e C_v é determinado pela equação (12), a partir das características do sistema, das intensidades dos ecos registrados pelo ADCP e da concentração de sedimentos medida no nível de referência.

$$C_v = C + 20\log(R_i) - LDBM - PDBW + 2a.R_i + K_c(E_i - E_r) \quad (12)$$

na qual, a constante C é definida pela equação (13) com dados do nível de referência.

$$C = C_{vr} - 20\log(R_r) - 2a.R_r + LDBM + PDBW \quad (13)$$

onde:

$C_{vr} = 10\log(C_r)$;

C_r = concentração de sedimentos em mg.l^{-1} , medida no nível de referência;

R_i = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até a profundidade na qual foi medida a intensidade do eco E_i ;

R_r = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até o nível de referência;

$LDBM = 10\log L$;

$PDBW = 10\log P$;

L = comprimento do pulso transmitido (m);

P = potência transmitida (W);

a = coeficiente de absorção acústica da água (dB.m^{-1});

K_c = fator de escala de intensidade do eco (dB.counts^{-1});

E_i = intensidade do eco registrada pelo ADCP (*counts*);

E_r = intensidade do eco registrada pelo ADCP no nível de referência (*counts*).

Nas equações 12 e 13, os termos $20\log(R_r)$ e $20\log(R_i)$ representam a perda logarítmica na intensidade do eco com o aumento da distância, devido à expansão do feixe acústico. Os termos $2aR_r$ e $2aR_i$ representam a redução na intensidade do eco causada pela absorção acústica na água.

Substituindo a equação 13 na equação 12 e retornando à equação 11, obtém-se a equação 14, que é usada para estimar as concentrações de sedimentos a partir das intensidades dos ecos, registradas pelo ADCP, já convertidas para decibéis (dB) e corrigidas para as perdas devidas à expansão do feixe acústico e à absorção acústica na água.

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + \frac{(EC_i - EC_r)}{10} \right]} \quad (14)$$

na qual:

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

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

EC_i = intensidade do eco correspondente a célula de número i (dB);

EC_r = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB).

A Figura 3.10 mostra esquematicamente uma coluna de dados do ADCP (*ensemble*), indicando as variáveis consideradas no método de conversão e o nível de referência, local onde é medida a concentração de sedimentos em suspensão, por amostragem mecânica ou óptica para calibragem, simultaneamente com o registro do sinal acústico.

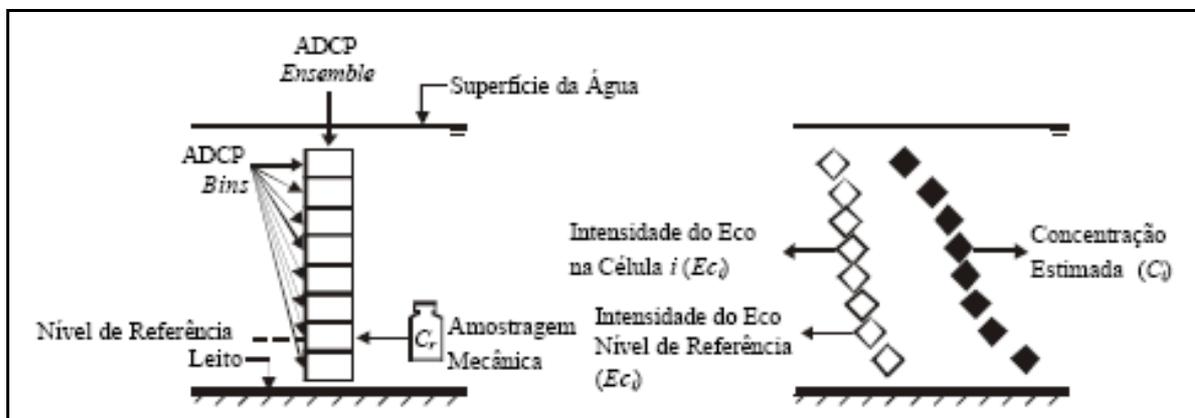


Figura 3.10 – Esquema de conversão das intensidades em concentrações
(Fonte: MAYERLE; POERBANDONO, 2002)

3.4.2 Método de Mayerle & Poerbandolo

Mayerle e Poerbandono (2002) concluíram, através da análise de dados de campo, que os resultados do método proposto por Deines (1999) são significativamente melhores quando o incremento da intensidade do eco ($EC_i - EC_r$) da equação 14 é multiplicado por um coeficiente, denominado KM, conforme indicado na equação 15.

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + KM \frac{(EC_i - EC_r)}{10} \right]} \quad (15)$$

onde:

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

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

EC_i = intensidade do eco correspondente a célula de número i (dB);

EC_r = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB).

Segundo Mayerle e Poerbandono (2002) o valor do coeficiente KM varia entre 0,35 e 0,55 e recomendam um valor padrão de 0,45. Lu (2003) realizou testes com dados coletados no Mar de Wadden, no norte da Alemanha, considerando valores do coeficiente KM iguais a 0,35, 0,45 e 0,55 e constatou não haver diferenças significativas nos resultados obtidos.

3.4.3 Método de Gartner

Gartner (2002) sugere uma relação direta entre a concentração de sedimentos e o logarítmico da intensidade do eco, obtida por regressão, conforme a equação 16.

$$C_i = 10^{(EC_i \cdot A + B)} \quad (16)$$

na qual,

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

EC_i = intensidade do eco correspondente a célula de número i (dB);

A e B são, respectivamente, o coeficiente angular e o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, determinados por regressão dos valores correspondentes de intensidade do eco e concentração de sedimentos, medidos simultaneamente, em uma plotagem mono-log na forma da equação 17.

$$\log_{10}(C_i) = EC_i \cdot A + B \quad (17)$$

3.5 O ADCP no Brasil

O marco inicial do uso do ADCP no Brasil se deu na Bacia Amazônica, em 1994, através da equipe Franco-Brasileira do projeto HiBAM, composta por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, atual ANEEL, e o Instituto Francês para a Pesquisa e Desenvolvimento (IRD), extinto ORSTOM.

Durante as diferentes campanhas HiBAm na bacia Amazônica, o ADCP foi utilizado principalmente em um barco de madeira típico da região e, em algumas vezes, em um pequeno barco de alumínio "VOADEIRA" e de borracha "ZODIAC", ambos com cerca de seis metros de comprimento (FILIZOLA et al., 1999). Além da intensidade do sinal acústico de retorno (*backscattering*), o ADCP também foi utilizado em 89 medições de vazão líquida, entre 1995 e 1998, ao longo dos grandes rios amazônicos: Negro, Solimões, Japurá, Javari, Içá, Juruá, Jutai, Purus, Madeira, Tapajós, Trombeta e Xingu (FILIZOLA; GUYOT, 2007).

Com o apoio do subprograma de instrumentação do PADCT, o Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIO) do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE desenvolveu um protótipo de perfilador denominado PACO (Perfilador Acústico de Correntes Oceânicas), apresentado por Uchoa (1995).

Este protótipo foi instalado na superfície e no fundo do mar operando em frequência de 155 KHz. Este equipamento foi usado para coletar dados para estimativa dos parâmetros do espectro de potência, ou função de covariância, através do envelope complexo provenientes dos ecos dos vários organismos espalhadores. Os parâmetros foram estimados utilizando-se a técnica de SME ("*Spectral Moment Estimation*") (BARBOSA, 2005).

Para desenvolver o perfilador de um canal foram feitas adaptações em um ecobatímetro de modo a torná-lo capaz de reconhecer os movimentos dos organismos presentes na água quando excitados por uma onda acústica. As principais modificações no equipamento foram inclusões de circuitos eletrônicos de modo a permitir a detecção da frequência "Doppler" adaptando-o ao algoritmo SME na determinação da velocidade das correntes oceânicas.

Foram feitos vários testes no mar para se chegar às modificações necessárias no equipamento e na técnica de extração do perfil de velocidade apresentada. Os testes foram realizados em diversas regiões do litoral do Rio de Janeiro e em diversas profundidades, dentro do limite de 200 metros imposto pelas características elétricas do equipamento. Os dados coletados, gravados e posteriormente analisados conduziram o trabalho até a comprovação do funcionamento da técnica SME (UCHOA, 1995).

Em março de 1996, a equipe de hidrometria da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) iniciou a operação de um ADCP com frequência de 1200 KHz, efetuando um grande número de medições nos rios do estado do Paraná, especialmente no rio Iguaçu. Em

geral os resultados mostram boa qualidade das medições, exceto aquelas efetuadas em reservatórios profundos com velocidades extremamente baixas e sujeitas a perturbações causadas pela translação de ondas e balanço da massa líquida, ou em rios muito rasos onde a proporção da vazão medida diretamente é pequena (BUBA, 1997; SANTOS, et al., 2001).

Também em 1996, no Rio Solimões, durante o III Curso Internacional Sobre Técnicas de Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios, patrocinado pelo antigo DNAEE e pela OMM, foi realizada uma tentativa de comparação entre um ADCP e os métodos tradicionais de medição em grandes rios. Durante quatro dias foram realizadas 34 medições de vazão com o equipamento. Porém com os demais métodos (barco ancorado, Smoot e grandes rios) somente foi possível obter apenas um valor confiável de vazão, por método, para todo o período, basicamente devido a limites impostos pelas metodologias. Mesmo assim, foi verificada uma boa correlação entre os dados obtidos pelo método do barco ancorado com os do ADCP, o que não ocorreu com os demais métodos (FILIZOLA et al., 1999).

Santos et al. (1997), fizeram uma comparação entre 15 medições simultâneas de descarga líquida realizadas pelo método convencional com molinete e acústico com o ADCP. Os resultados não indicaram tendenciosidade devido ao uso do ADCP. Eles destacaram também as facilidades técnicas e operacionais do uso do método acústico.

Gomes e Santos (1999), apresentaram uma continuação do trabalho apresentado por Santos et al. (1997) na tentativa de analisar comparativamente diferentes processos de medição de descarga líquida, mais especificamente o método convencional, com a utilização do molinete hidrométrico, e o método acústico, com a utilização de um ADCP. Foi apresentada uma comparação entre 26 campanhas de medição de vazão realizadas simultaneamente com a utilização dos dois métodos. Os métodos foram avaliados através da correlação entre as diferenças das vazões medidas pelos dois métodos e características da campanha de medição, considerando-se a análise conjunta das medições. Os resultados das análises não permitiram explicar as diferenças obtidas em determinadas estações. Procuraram, então, realizar uma análise mais detalhada das medições que resultaram nas maiores diferenças relativas entre as vazões amostradas pelos métodos convencional e acústico. Nesta análise foram avaliadas, a distribuição de velocidades na seção transversal e a representação geométrica da seção. Os resultados obtidos mostraram que a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção transversal influenciaram nas diferenças obtidas para as medições utilizadas na análise detalhada.

Na busca de tentar sintetizar melhor o funcionamento desses instrumentos, bem como mostrar as muitas possibilidades de aplicação das técnicas acústicas remotas, destacam-se ainda os estudos realizados pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) sobre o uso de um ADCP em pequenos e médios cursos d'água, finalizado no trabalho de Caetano (2000).

Também no Programa de Engenharia Oceânica da COPPE, Carvalho (1999) deu continuidade ao trabalho de Uchoa (1995) ao defender a tese: “Investigações sobre um perfilador acústico (ADCP) de faixa-larga”, enquanto Barreira (2004) defendeu sua dissertação de mestrado intitulada: “Observação de correntes com ADCP”.

Uma contribuição que se tem tido para uma futura regulamentação sobre a utilização da tecnologia Doppler de medição de vazão foi a criação do Grupo de Trabalho sobre Medição de Vazão Utilizando a Tecnologia Doppler, criado no XIV Simpósio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH em 2001. Este grupo tem buscado criar a cultura de uso disciplinado dessa tecnologia, estabelecendo procedimentos mínimos para medição da vazão através do uso desta tecnologia. Foi criada uma lista virtual de discussão (vazao_com_adcp@yahoogrupos.com.br), onde os participantes trocam experiências, esclarecem dúvidas e se atualizam sobre novos programas e equipamentos (RODRIGUES et al., 2005).

A partir da criação deste grupo, vários documentos técnicos já foram disponibilizados, destacando-se principalmente os trabalhos realizados pela equipe de hidrologia da Usina Hidrelétrica ITAIPU, como por exemplo, “Procedimentos para avaliar uma Medição de Vazão Acústica Doppler”, “Primeira Análise dos Métodos para correção ou Medição de Vazão em Seções com Fundo Móvel”, “Procedimento Padrão para Garantia de Qualidade das Medições de Descarga Líquida com Equipamentos Acústicos Doppler ADCP e ADP”, “Diretrizes para o uso do novo *Software* WinRiver versão 1.03”, “Operação do ADCP 300 KHz com configurações Não Padronizadas”, “Relatório do I Encontro de Operadores do ADCP” e ainda “Avaliação do uso do GPS nas medições acústicas Doppler na Itaipu Binacional”. Existe também uma lista de discussão na internet organizada pelo Grupo de Trabalho de Hidro-acústica da USGS (HAWG), mais antiga que a lista brasileira e com maior número de participantes.

Em relação à utilização dos equipamentos acústicos por Efeito Doppler para a determinação ou estimativas da concentração dos sedimentos em suspensão, pouco se tem

pesquisado no Brasil. Filizola e Guyot (2004) descrevem uma experiência de medição de descarga líquida e amostragem de sedimentos em suspensão, utilizando o método convencional, durante um período de cheias, em março de 1995 no rio Amazonas, em Óbidos. A experiência envolveu diferentes equipamentos, incluindo um Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (ADCP) com frequência de 300 KHz para medidas da descarga líquida. Três tipos diferentes de amostradores de sedimentos foram usados, um construído especialmente para o projeto HiBAm (mecânico pontual de grande volume) foi testado com sucesso. Com os dados de *backscatter* e as amostras de sedimentos obtidos no mesmo local, buscou-se estabelecer uma relação entre o sinal do ADCP e a quantidade total de sedimentos em suspensão. Posteriormente, esta relação foi utilizada para o cálculo da descarga sólida (Q_s).

Em seu trabalho, Terabe (2003) descreve um estudo de caso com medições realizadas nos rios Piquiri, Ivaí e Iguaçu, no estado do Paraná. A determinação das concentrações de sedimentos em suspensão foi realizada com um amostrador mecânico pontual, e para amostragem acústica foi utilizado um ADCP com frequência de 1200 kHz. As amostras foram coletadas em cinco verticais, igualmente espaçadas, ao longo das seções transversais dos rios estudados. Em cada vertical foram amostrados cinco pontos, nos quais foram determinadas as concentrações de sedimentos em suspensão simultaneamente com registros de sinais acústicos. A conversão da intensidade do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão foi calculada utilizando-se o método de Deines (1999) e considerando como referência as concentrações medidas com amostrador mecânico. Foram considerados dois níveis de referência, um próximo ao fundo do rio a 0,60 m do leito e outro próximo à meia profundidade do escoamento.

Por meio de três experimentos realizados por Zaleski e Schettini (2004 e 2005), no estuário do Rio Itajaí-açú, foi possível avaliar o desempenho de dois modelos de Perfiladores Acústicos de Corrente por Efeito Doppler para a determinação da concentração de material particulado em suspensão na água. O primeiro experimento consistiu no fundeio de um equipamento, de janeiro a março de 2003, ao largo do estuário do rio Itajaí-açú, próximo a isóbata de 10 metros. A partir dos dados coletados foi possível verificar os padrões das correntes e o transporte do material em suspensão nesta região. O segundo experimento consistiu no monitoramento da pluma sedimentar ocasionada por uma draga de extração de areia. Utilizando um ADCP com o dispositivo “*Bottom tracking*”, que o permite funcionar

montado a uma embarcação, foi realizado um perfil em direção a uma draga de extração de areia em operação. A partir das informações acústicas coletadas foi possível verificar a pluma sedimentar causada pela draga e a concentração do material em suspensão. Neste experimento uma limitação deste método ficou evidente. Sob a condição de alta concentração de sólidos suspensos o ADCP não conseguiu obter a informação do fundo. No último experimento buscou-se verificar a distribuição do material suspenso ao longo do estuário do Rio Itajaí-açu sob condição de alta descarga de sólidos em suspensão. Para tal foi realizado um perfil vertical-longitudinal com um ADCP simultaneamente com um turbidímetro de Retro Espalhamento Óptico. Este experimento mostrou outra limitação deste método para a estimativa do material em suspensão na água, a limitação quanto ao tamanho das partículas em suspensão e a frequência do ADCP. O equipamento de 1,5 MHz de frequência utilizado neste experimento não foi capaz de visualizar as partículas presentes no estuário.

Barbosa (2005) utilizou os dados coletados a partir de campanhas realizadas pelo projeto HiBAm (Hidrologia da Bacia Amazônica) de 1995 a 2005, quando o uso intensivo da tecnologia Doppler, a partir de 1995, possibilitou grandes avanços quanto aos métodos de medição de vazões em grandes rios. Ressalta-se, então, que neste caso, os dados não foram coletados com o intuito específico do seu trabalho. O que houve foi um aproveitamento de uma massa de leituras de perfis acústicos de um ADCP, usados para medição de vazão em diversas estações ao longo de vários rios da Região Amazônica, entre eles, o Rio Solimões, o Rio Madeira e o Rio Amazonas, bem como de levantamentos existentes sobre granulometria e concentração de sedimentos em suspensão para as respectivas estações medidas.

Em novembro de 2006, durante o VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, foi realizado o Mini Curso: “Uso do ADCP para medição de descarga sólida em suspensão”. Dentre os objetivos principais deste curso, foi realizada a apresentação dos ADCPs, fornecendo uma visão geral da forma como esses equipamentos calculam a vazão e indicando as limitações e fontes de erros nas medições, além de exemplos de outras aplicações para a estimativa de C_{ss} . Ainda, foi relatada a experiência na Amazônia com o uso de ADCPs para a estimativa do fluxo de matéria em suspensão, descrevendo o método utilizado e as correções e conversões necessárias do sinal acústico. Este mini curso ainda proporcionou aos participantes um contato direto com os equipamentos, ADCP e amostrador de sedimento, verificando as limitações e dificuldades de cada um durante um procedimento

de amostragem para a tentativa de correlação entre a intensidade do sinal de retorno de um equipamento acústico (ABS) e a concentração de sedimentos.

Os trabalhos do Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica – HiBAm, e de outras instituições (CPRM, ITAIPU, COPEL, SUDERHSA) que se seguiram àqueles precursores, mostraram a vantagem fundamental desse equipamento para melhorar os conhecimentos sobre a hidrologia e também sobre os fluxos de sedimentos dos grandes rios, tanto da região Amazônica quanto de outras regiões brasileiras (FILIZOLA et al., 1999).

O próximo capítulo apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho com a utilização de dados coletados com equipamento perfilador acústico de corrente por Efeito Doppler (ADCP).

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho a fim de estimar a concentração de sedimentos em suspensão em um rio através da utilização de quatro métodos empíricos com dados provenientes de um equipamento perfilador de corrente por Efeito Doppler. Inicialmente, são apresentadas as informações dos procedimentos de campo, como as características dos locais de medição, os equipamentos utilizados, e o processo de amostragem e cálculo.

4.1 Procedimentos de campo

A seguir são apresentadas a caracterização dos locais de medição, a descrição dos equipamentos utilizados na coleta de dados em campo e a instalação e os procedimentos efetuados para a amostragem em campo.

4.1.1 Local das medições

As medições de concentração de sedimentos em suspensão coletadas neste trabalho foram realizadas na bacia hidrográfica do rio Jacuí, no Rio Grande do Sul. A bacia do rio Jacuí, indicada na Figura 4.1, possui área de 71.600 km², correspondente a 83,5 % da área da região hidrográfica do lago Guaíba. Ainda, a Figura 4.1 mostra o percurso do rio Jacuí até a sua foz, na entrada do Guaíba, bem como as estações sedimentométricas operadas por diversos órgãos.

De acordo com o mapa de precipitação média anual do estado do Rio Grande do Sul, elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, com dados de 1976 a 2002, a precipitação média anual na bacia é variável, atingindo 1.600 mm no seu valor mais alto, nas zonas compreendidas pelo curso principal do rio Jacuí até a foz do Jacuizinho e pelas cabeceiras do rio das Antas. O valor mais baixo, em torno de 1.200 mm anuais, encontra-se na zona compreendida pelo curso principal do rio Jacuí, entre a usina hidrelétrica de Dona Francisca e a confluência com o rio Taquari.

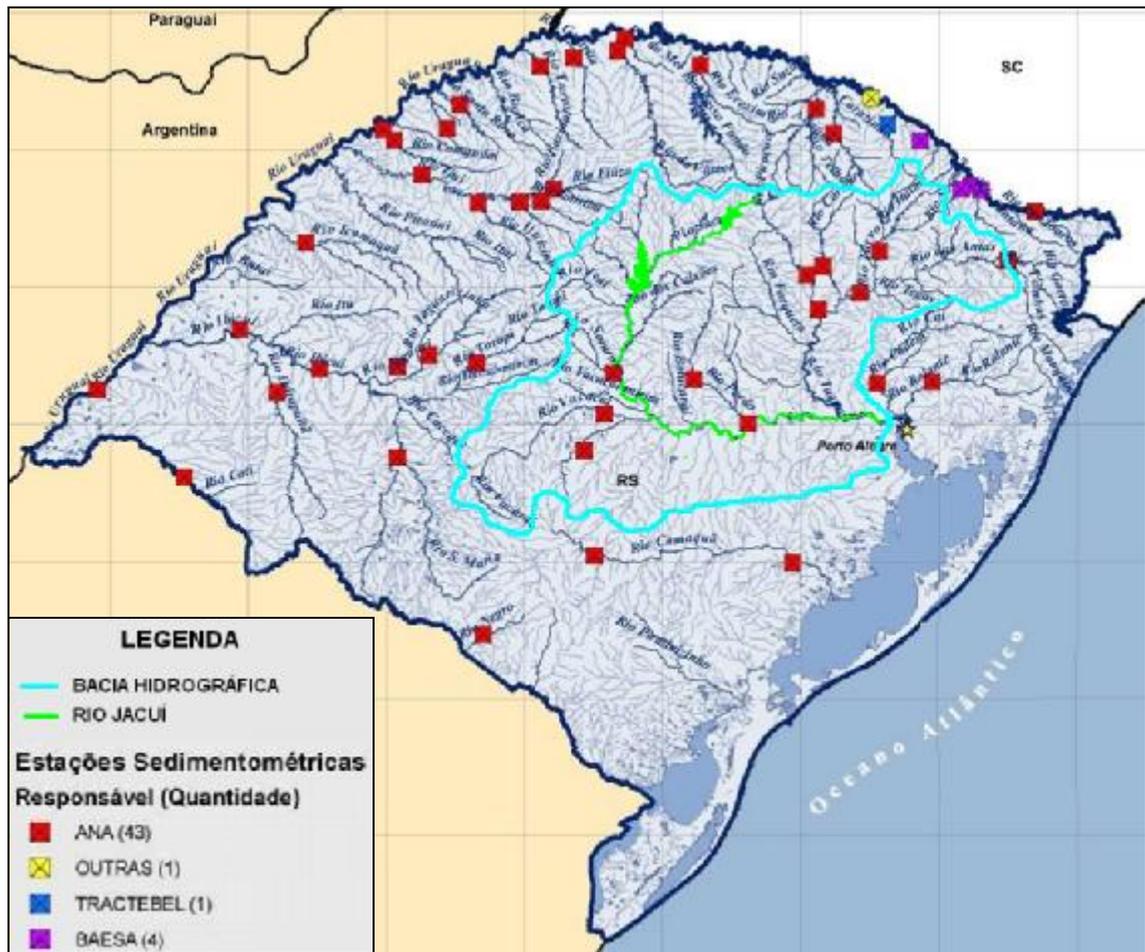


Figura 4.1 – Bacia hidrográfica do rio Jacuí
(Fonte: www.ana.gov.br)

O rio Jacuí nasce a 730 metros de altitude, no Planalto Médio, nos municípios de Passo Fundo e Marau, região que costuma ter temperatura média inferior a 10°C no inverno e toda a sua área de drenagem caracteriza-se pelo uso intensivo do solo para agricultura e pecuária. O seu trecho superior caracteriza-se também pelo aproveitamento energético. Seu trajeto inicia em direção a oeste e, nos seus primeiros 271 quilômetros, até represas situadas no município de Salto do Jacuí, desce 510 metros. Neste ponto, o rio inicia a sua trajetória em direção ao sul, é uma trajetória tão abrupta que a declividade média é de 1,88 metros a cada quilômetro percorrido, caracterizado pela presença de várias corredeiras que tornam o percurso não-navegável em muitos trechos. A situação não se altera entre Salto do Jacuí e o município de Dona Francisca, distante 117 quilômetros, ainda ao sul. Neste trecho, o desnível é de apenas 185 metros, mas a região é tão montanhosa que, a cada quilômetro, a trajetória do rio baixa 1,58 metros.

O terceiro e último trecho do rio, de 360 quilômetros, segue do município de Dona Francisca até a cidade de Porto Alegre com a formação do Delta do Jacuí, onde desembocam os rios Gravataí, Sinos e Caí. Neste trecho a descida é imperceptível e, por isso, de possível navegação. O rio toma a direção leste, rumo à capital, e desce apenas 35 metros, com média de nove centímetros por quilômetro (TREZZI, 2008).

Os terrenos drenados pela Bacia de Sudeste do Rio Grande do Sul, formados por rochas plutônicas, vulcânicas e sedimentares, constituem as Terras Altas, responsáveis pela produção de expressivos volumes de sedimentos que são transportados para o lago Guaíba, principalmente, através dos rios Jacuí, Taquari, Sinos e Gravataí por uma descarga líquida média de $38.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (TOLDO, 1994). O regime fluvial destes tributários perde competência como agente transportador ao ingressar na ampla bacia deposicional do Guaíba, sendo que os sedimentos mais grosseiros são ali retidos, formando bancos submersos de areia e lama. Esses evoluem até formar ilhas recortadas por inúmeros canais distributários caracterizando o Delta do Rio Jacuí. As maiores ilhas, Ilha Grande dos Marinheiros, Ilha das Flores, Ilha da Pintada e Ilha do Lage, possuem feições de antigos canais distributários que se fecharam naturalmente. Os sedimentos finos, tamanhos silte e argila, ingressam no Guaíba como plumas de material em suspensão (BACHI et al., 2000).

Na área norte do rio Jacuí predominam as culturas intensivas de soja e trigo, através do sistema de cultura rotativa. Na área sul aparece, além destas culturas, o cultivo do arroz e um incremento da pecuária. O mau uso do solo agrícola e a falta de práticas conservacionistas conduzem aos processos erosivos, com o aumento da turbidez e dos sólidos totais nas águas desta bacia (FEPAM, 2005).

O Jacuí é também importante via de escoamento de produtos agrícolas e industriais. Ele é navegável por cerca de 360 quilômetros, entre os municípios de Dona Francisca e Porto Alegre, trecho no qual se localizam três barragens para facilitar o tráfego de barcos. Entre a cidade de Cachoeira do Sul e a sua foz, é o principal trecho de pesca comercial de águas interiores do Rio Grande do Sul (TREZZI, 2008). É nessa região que se localizam grandes jazidas de areia extraída para a construção civil, onde milhares de metros cúbicos de areia são extraídos todos os anos e transportados por barcaças até a Região Metropolitana (FEPAM, 2005).

No trecho final do rio Jacuí, destacam-se ainda as atividades de mineração de carvão e operação de usinas termelétricas a carvão. A extração do carvão na bacia é intensa, causando significativo impacto ambiental, principalmente nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo.

As medições deste estudo foram realizadas no braço principal do rio em uma seção localizada no Delta do rio Jacuí que apresenta as características físicas de largura, profundidade e velocidade média dentro da faixa normal de utilização para a frequência do ADCP utilizado. A Figura 4.2 apresenta a localização da seção onde foram realizadas as medições, a jusante da ponte sobre a BR 116 em um dos braços do rio Jacuí.



Figura 4.2 – Localização da seção de medição
(Fonte: Google Earth)

As medições foram realizadas no período de verão, sendo que a primeira em dezembro de 2007 e a segunda em fevereiro de 2008. A existência de uma régua instalada em um píer particular próximo a seção, permitiu avaliar as cotas durante a realização das medições. Durante a primeira medição, a leitura da cota da água nesta régua foi de 0,49 m e durante a segunda medição a cota foi de 0,29 m. Segundo a Superintendência de Portos e Hidrovias – SPH, a seção das medições está na área de abrangência do posto fluviométrico Harmonia (87450003), localizado no cais do porto de Porto Alegre. Em relação à variação dos níveis, este ponto, embora em um dos braços do delta, apresenta as mesmas características do lago Guaíba. Isso pôde ser observado nessas duas medições. As cotas no posto Harmonia

marcavam respectivamente 0,45 m e 0,25 m, na primeira e segunda medição. Com isso, é possível ter uma idéia da permanência das cotas observadas durante as medições, pois na curva de permanência das cotas do posto Harmonia, os valores observados nos dias medidos correspondem a 90% e 98%, respectivamente.

No trecho correspondente ao braço do delta, onde se encontra a seção medida, não existe nenhum posto de medição de vazão, assim não há histórico de vazões do local. De 1972 a 1986 o extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE instalou e operou a estação Passo do Raso (87040000), localizada no rio Jacuí, próximo à formação do delta. A média das vazões anuais neste posto, para o período foi de $1592 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A média desse período para o mês da primeira medição (dezembro) é de $1066 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que para o mês de fevereiro, correspondente à 2ª medição é de $942 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Esses valores representam, respectivamente, a quarta e a segunda menor média mensal desse período.

As vazões medidas durante cada uma das medições foram executadas com o ADCP. A vazão da primeira medição, de $377 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, representa 35% da média do mês de dezembro, enquanto que a vazão medida em fevereiro, de $176 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, equivale a 19% da vazão média deste mês do rio Jacuí. Em relação à vazão média anual do rio Jacuí, as vazões medidas na primeira e segunda medição representam respectivamente, 24% e 11%. Observando-se as velocidades da água, nota-se que os valores foram muito baixos. Na primeira medição o valor médio foi de $0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, e durante a segunda medição a velocidade média foi de apenas $0,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.2 Equipamentos utilizados

Para a obtenção das informações acústicas, como a intensidade do sinal retro-espalhado, foi utilizado um equipamento perfilador acústico de corrente por Efeito Doppler (ADCP), com frequência de 1200 KHz, apresentado na Figura 4.3. O equipamento permite a variação de alguns parâmetros de sua configuração padrão. A Tabela 4.1 indica os valores utilizados para os principais parâmetros da configuração do equipamento. A Tabela 4.2 apresenta os limites de utilização, recomendados pelo fabricante, para o ADCP utilizado, bem como os limites para ADCPs de diferentes frequências.



Figura 4.3 – ADCP de 1200 KHz

Tabela 4.1 – Configuração dos principais parâmetros do ADCP utilizado

Parâmetros	Configuração
Modo de operação	1
Célula de profundidade (m)	0,25
<i>Blank</i> (m)	0,25
<i>Pings</i> / segundo	2

O modelo de ADCP utilizado permite a escolha de um “modo de operação”. Cada modo de operação obtém melhores resultados para determinadas variáveis medidas. Assim, o modo de operação deve ser escolhido em função das características da seção, do fluxo e de alguns parâmetros da configuração utilizada, como o tamanho da célula de profundidade, o *blank*, definido com a região não medida abaixo do equipamento em função da frequência acústica, e o número de *pings* por segundo, correspondentes aos pulsos acústicos.

Tabela 4.2 – Limites para algumas frequências de ADCPs

	Modo	1200 KHz	600 KHz	300 KHz
Célula de profundidade mínimo recomendado (m)	1	0,25	0,5	1
	5	0,05	0,1	0,2
	8	0,05	0,1	0,2
Alcance máximo do perfil (m)	1	20	60	13
	5	4	8	16
	8	4	8	16
Velocidade relativa máxima (m.s ⁻¹)	1	10	10	10
	5	0,5	1	1
	8	2	2	2

(Fonte: adaptado de GAMARO, 2006)

Para a medição das vazões, uma das principais limitações de operação está relacionada às velocidades do barco e da água. Para a estimativa das concentrações em suspensão, os principais fatores são aqueles que influenciam no valor da intensidade do eco acústico retornado ao equipamento (ABS). Dentre estes fatores, destacam-se a velocidade do som na

água, que é função, principalmente, da temperatura e da salinidade da água, o coeficiente (α) de absorção do som pela água, dependente da frequência acústica e salinidade e, ainda, todos os ruídos que chegam ao equipamento. Os ruídos podem ser decorrentes de diversas fontes, inclusive, pelo próprio equipamento, e podem interferir nas intensidades do eco acústico. O ruído térmico, causado pelo ADCP, é chamado de ruído de referência e seu valor é próprio para cada equipamento, e seu valor típico é de aproximadamente 40 dB. Desta forma, o valor de ABS gravado pelo ADCP é chamado de *backscatter* relativo, pois considera todas as fontes de ruídos, inclusive o ruído de referência.

As informações dos sedimentos em suspensão utilizadas como base para comparação com as estimativas realizadas foram obtidas com o amostrador pontual US P-61 A1 com um bico de 3/16 polegadas de diâmetro e garrafas com volume de 473 ml. Foram coletadas amostras em cada ponto da vertical, utilizando um dispositivo elétrico (solenóide) para a abertura e fechamento da entrada de água na garrafa. A Figura 4.4 apresenta os equipamentos utilizados. A Tabela 4.3 indica as principais características do amostrador P-61.



Figura 4.4 – Amostrador P-61 com o bico na entrada e as garrafas de amostragem

Tabela 4.3 – Características do amostrador US P-61 A1

Características	Limites
Diâmetro do Bico (pol)	3/16
Volume da garrafa (l)	0,473 / 0,946
Prof. Máxima de amostragem (m)	54,9 / 36,6
Vel. Mínima para amostragem (m.s ⁻¹)	0,46
Vel. Máxima para amostragem (m.s ⁻¹)	3
Zona não amostrada (m)	0,11
Peso do amostrador (kg)	47,6

As limitações mais importantes do amostrador em relação ao modo como este foi utilizado (pontual) e as condições locais durante a medição, estão associados à velocidade mínima da água (que esteve abaixo do valor indicado na Tabela 4.3, podendo caracterizar uma amostragem não isocinética) e em relação a zona não amostrada (em função da proximidade da base do amostrador com o leito do rio).

4.1.3 Instalação para amostragem

Para a utilização das equações de estimativa de concentração de sedimentos, foi necessária a realização de coletas de amostras de água no mesmo instante e o mais próximo possível da posição onde o equipamento acústico executou as medições. Por isso, os cálculos para as estimativas das concentrações foram realizados com o valor médio dos quatro sensores ou *beams*³ do ADCP e também com o valor da intensidade do som observado apenas pelo *beam* 1. A escolha do *beam* 1 é justificada por este feixe estar localizado mais próximo do amostrador mecânico. A Figura 4.5 mostra o esquema ideal de instalação, indicando a posição relativa dos pontos de amostragem de cada um dos equipamentos.

Na primeira das duas medições realizadas, não foi possível executar a montagem dos equipamentos conforme o esquema mostrado na Figura 4.5, pois o planejamento das atividades de campo não foi especificamente preparado para a realização deste trabalho. Assim, foi necessária uma adaptação das condições para a execução das medições. O ADCP foi instalado em um barco com uma estrutura própria para sua fixação e o amostrador de sedimentos foi montado no centro de uma jangada armada com outros dois barcos, conforme mostrado na Figura 4.6.

Ambas as embarcações realizavam as medições simultaneamente, lado a lado. Na segunda medição, o amostrador de sedimentos foi instalado na mesma embarcação que o ADCP, conforme ilustrado na Figura 4.7. Neste caso, foi possível realizar as medições conforme o esquema ideal de montagem dos equipamentos. Assim, de um lado da embarcação foi fixado o ADCP, e do outro lado, foi instalado o equipamento US P-61 A1, para a coleta das amostras de água e sedimentos.

³ Cada um dos quatro sensores ou feixes de emissão e recepção do sinal acústico.

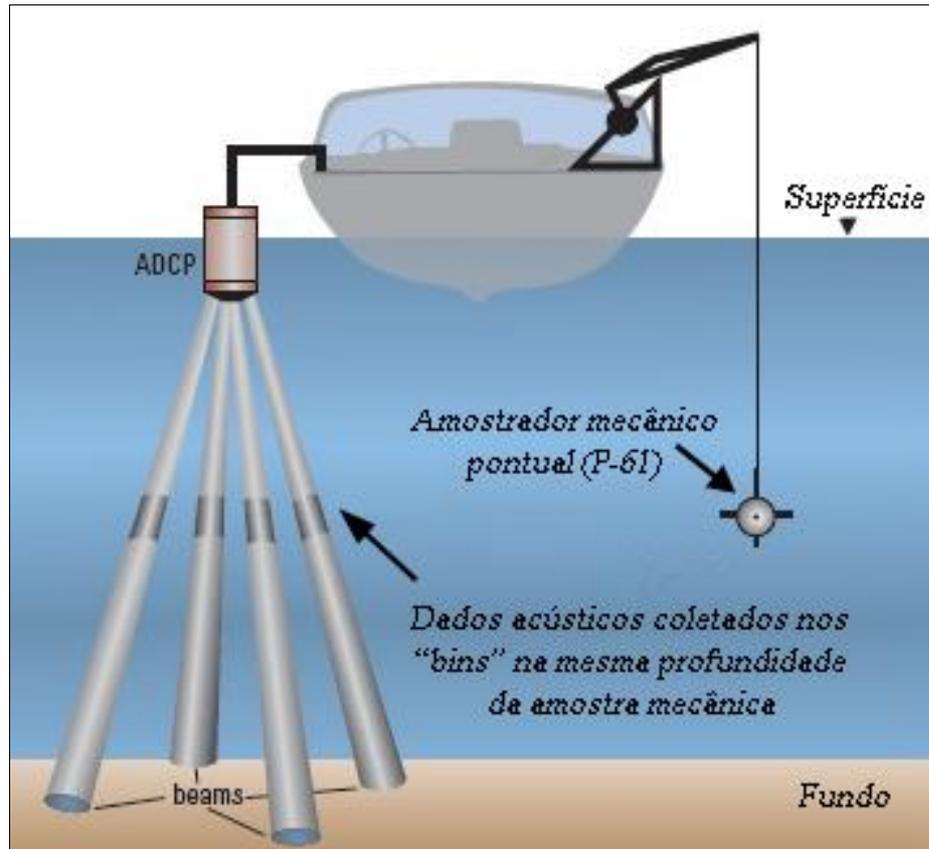


Figura 4.5 – Esquema ideal de montagem do ADCP e do amostrador no barco (Fonte: WALL et al., 2006)



Figura 4.6 – Estrutura do amostrador de sedimentos utilizada na 1ª medição

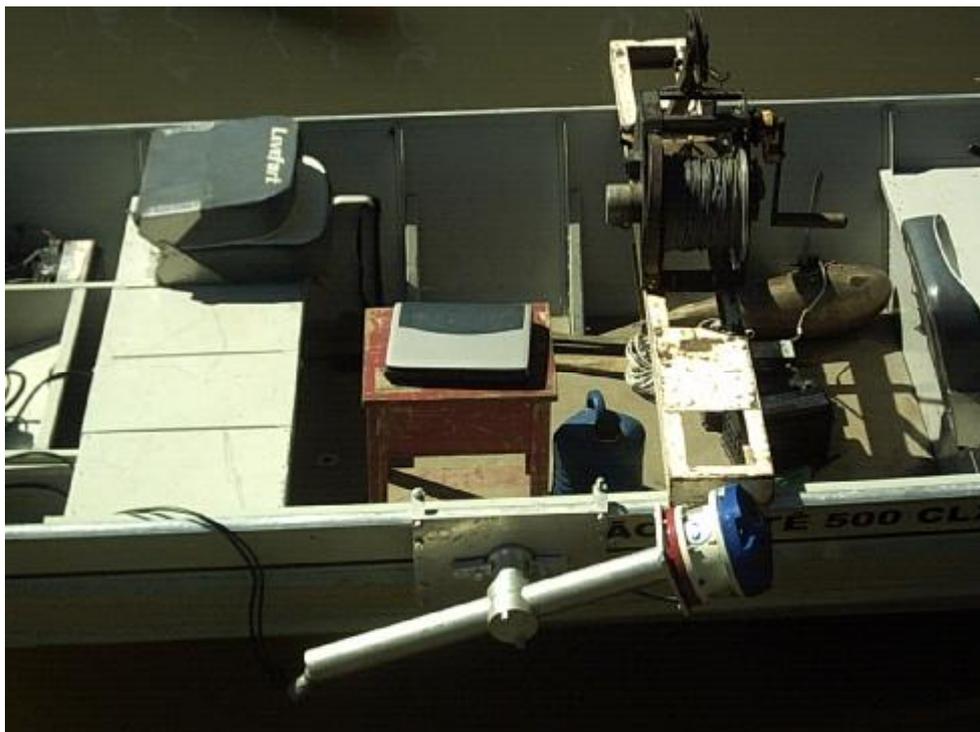


Figura 4.7 – Estrutura do amostrador de sedimentos e do ADCP utilizada na 2ª medição

4.1.4 Procedimentos de amostragem

Para a determinação da concentração dos sedimentos suspensos, as medições acústicas e as coletas de amostras foram realizadas em duas verticais na primeira medição e em três verticais na segunda medição, sendo cinco pontos em cada vertical. Assim, a primeira vertical (V1) foi localizada próxima da margem esquerda, a vertical (V3) na posição central do rio, e a vertical (V2) entre essas duas. A localização das verticais de medição está esquematizada na Figura 4.8, onde L é a largura da seção transversal, V1, V2 e V3 são as verticais medidas e os números de 1 a 5 indicam os pontos amostrados, que correspondem, respectivamente, a 20 %, 30 %, 50 %, 60 % e 80 % da profundidade de cada vertical.

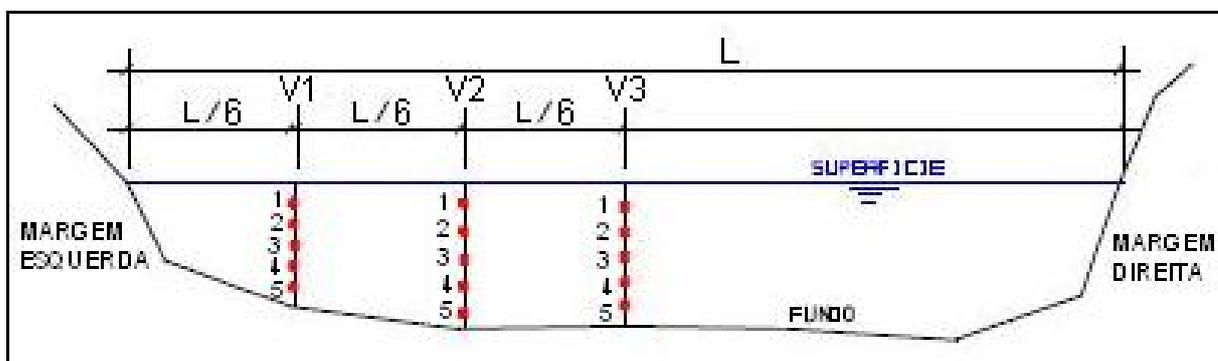


Figura 4.8 – Localização das verticais e dos pontos de amostragem
(Fonte: adaptado de TERABE, 2003)

A coleta de uma quantidade suficiente de amostra de água e sedimentos feita com o amostrador P-61, garrafa de 0,473 l e bico de 3/16 polegadas teve duração de aproximadamente 60 segundos. Durante este tempo, o ADCP emitiu, recebeu e registrou as informações acústicas a uma taxa de 2 *pings* por segundo, ou seja, para cada ponto amostrado foram obtidos em torno de 120 valores instantâneos (*ensembles*⁴) de velocidade e ABS para cada um dos quatro *beams* e para todas as profundidades (*bins*) daquela vertical. Assim, para cada ponto amostrado, a concentração determinada da amostra foi relacionada com a média desses valores de *backscatters*.

Para a correta identificação e correlação dos dados, durante a execução das medições e coletas das amostras foram observadas as seguintes informações para cada ponto:

- data e hora;
- número e profundidade da vertical e distância em relação à margem;
- número e profundidade do ponto;
- número do *ensemble* ao iniciar a coleta;
- número do *ensemble* ao terminar a coleta.

Foram coletadas, ao todo, 25 garrafas com amostras. Essas amostras formaram 50 pares de dados, 25 pares com as concentrações de sedimentos em suspensão, obtidas das amostras analisadas em laboratório e o *backscatter* médio dos quatro *beams*, e outros 25 pares com a concentração das amostras e o *backscatter* medido com valores do *beam* 1.

4.2 Procedimentos de laboratório

Os procedimentos de laboratório envolveram a determinação da concentração de sedimentos suspensos (Css) através da análise das amostras coletadas com o amostrador mecânico. A coleta das amostras foi realizada conforme os esquemas demonstrados nas Figuras 4.6 e 4.7.

A concentração dos sedimentos em suspensão das amostras foi determinada no laboratório de sedimentos do IPH – UFRGS, pelo método da evaporação. Carvalho (1994), descreve detalhadamente este método que consiste em colocar toda a amostra em um recipiente de vidro (*becker*) e após, deixar em repouso por alguns dias até os sedimentos se

⁴ Informações gravadas pelo ADCP equivalentes a uma vertical na coluna d'água.

depositarem no fundo do *becker*. Então, é feita uma sifonagem da água “limpa” para diminuir o tempo de evaporação do resto da mistura. O volume amostrado é previamente medido. A parte que não foi sifonada é levada à estufa a 100 graus até a água ser totalmente evaporada. É realizada a pesagem dos sedimentos em balança de precisão e descontado o valor do peso do copo. A concentração de sedimentos é calculada como a razão entre o peso seco do material e o volume amostrado. Esta concentração é corrigida pelo acréscimo do valor estimado da concentração da água “limpa” sifonada anteriormente, obtido pela análise de uma amostra de 50 ml, retirada do volume sifonado.

De acordo com Gray et al.(2000), as incertezas analíticas do método de análise utilizado podem chegar até 40 % em concentrações baixas (~10 mg.l⁻¹), até 20 % para valores de concentrações entre 100 mg.l⁻¹ e 1000 mg.l⁻¹, e diminuem proporcionalmente com o aumento das concentrações para valores maiores que 1000 mg.l⁻¹. Essas incertezas podem estar relacionadas à dificuldade de pesar precisamente quantidades muito pequenas de sedimentos.

4.3 Métodos de Conversão do Sinal Acústico em C_{ss}

A seguir são apresentados os métodos utilizados para a estimativa de concentração de sedimentos em suspensão com a utilização de informações provenientes de um equipamento acústico por Efeito Doppler. Os métodos correspondem ao método de Deines (DEINES, 1999), Mayerle e Poerbandolo (MAYERLE; PERBANDOLO, 2002), Gartner (GARTNER, 2002) e a comparação direta entre a concentração dos sedimentos em suspensão medida em laboratório e valores de *backscatters* registrados pelo ADCP (C_{ss} x ABS).

4.3.1 Método de Deines

A estimativa da concentração de sedimentos em suspensão através do método de Deines foi realizada com a utilização da equação 14.

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + \frac{(EC_i - EC_r)}{10} \right]} \quad (14)$$

onde,

C_i = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número i (mg.l⁻¹);

C_r = concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibragem (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).

4.3.2 Método de Mayerle e Poerbandolo

A concentração de sedimentos em suspensão estimada pelo método de Mayerle e Poerbandolo foi realizada através da equação 15.

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + KM \frac{(E_{ci} - E_{cr})}{10} \right]} \quad (15)$$

onde,

C_i = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número i (mg.l⁻¹);

C_r = concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibragem (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 = coeficiente proposto por Mayerle e Poerbandolo.

O coeficiente KM é um valor empírico, introduzido na equação de Deines por Mayerle e Poerbandolo para aprimorar a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. Os autores recomendam valores de KM entre 0,35 e 0,45. Na utilização deste método foram considerados sete valores para o coeficiente KM : 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,45 e 0,55. Deste modo, foram calculados sete perfis para cada vertical, chamados de M&P 15, M&P 20, M&P 25, M&P 30, M&P 35, M&P 45 e M&P 55, correspondentes aos respectivos coeficientes KM .

4.3.3 Método de Gartner

A estimativa da concentração de sedimentos em suspensão através do método de Gartner foi realizada com a utilização da equação 16.

$$C_i = 10^{(E_{ci} \cdot A + B)} \quad (16)$$

onde,

C_i = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número i (mg.l⁻¹);

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

A e B são, respectivamente, o coeficiente angular e o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, determinados por regressão dos valores correspondentes de intensidade do eco e

concentração de sedimentos, medidos simultaneamente, em uma plotagem mono-log na forma da equação 17.

$$\log_{10}(C_i) = EC_i.A + B \quad (17)$$

A partir da equação 17, foram determinados os coeficientes A e B utilizando o conjunto de pares de informações referente aos cinco pontos medidos em cada vertical. Este processo foi chamado de Gartner 5. Ainda, os coeficientes A e B foram determinados através da utilização do conjunto de todos os pontos medidos de todas as verticais, onde este processo foi denominado Gartner T.

4.3.4 Método “Css x ABS”

Este método consiste na determinação de uma correlação direta entre a média dos sinais acústicos de *backscatters* (ABS) obtidos diretamente pelo equipamento e as respectivas concentrações dos sedimentos em suspensão (Css) determinadas em laboratório.

$$C_i = EC_i.A + B \quad (18)$$

onde,

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

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

A e B são, respectivamente, o coeficiente angular e o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, determinados por regressão dos valores correspondentes de intensidade do eco e concentração de sedimentos.

As estimativas feitas pelo método “Css x ABS” foram obtidas para o conjunto de todas as medições realizadas. A estimativa realizada por este método foi comparada diretamente com os métodos de Gartner 5 e Gartner T.

4.4 Metodologia de cálculo

O equipamento por Efeito Doppler utilizado registrou, para cada célula de profundidade (*bin*), um valor de *backscatter* para cada um dos quatro *beams*. Para a estimativa de Css em cada método, para cada ponto medido, foram consideradas duas formas de obtenção de dados. A primeira forma considerou o valor médio dos quatro *beams* de cada célula, ou seja, o dB Médio. A outra forma de utilização dos dados considerou os valores de *backscatter* apenas de um dos *beams*, o *Beam 1*, posicionado estrategicamente em direção ao amostrador mecânico.

Assim, o processo de cálculo das estimativas de concentração de sedimentos em suspensão foi dividido em duas fases. A primeira fase envolveu a identificação dos valores do coeficiente KM e do nível de referência, referentes ao método de Mayerle e Poerbandolo, que melhor estimam a C_{ss} em cada ponto medido de cada vertical. O objetivo desta fase é a determinação de um valor de KM e um nível de referência para ser utilizado na estimativa dos perfis de todas as verticais. Na segunda fase, as estimativas de C_{ss} realizadas com o coeficiente KM e o nível de referência definidos na primeira fase são comparadas com as estimativas de concentração provenientes dos demais métodos. A Figura 4.9 apresenta a estrutura do processo de cálculo realizado neste trabalho.

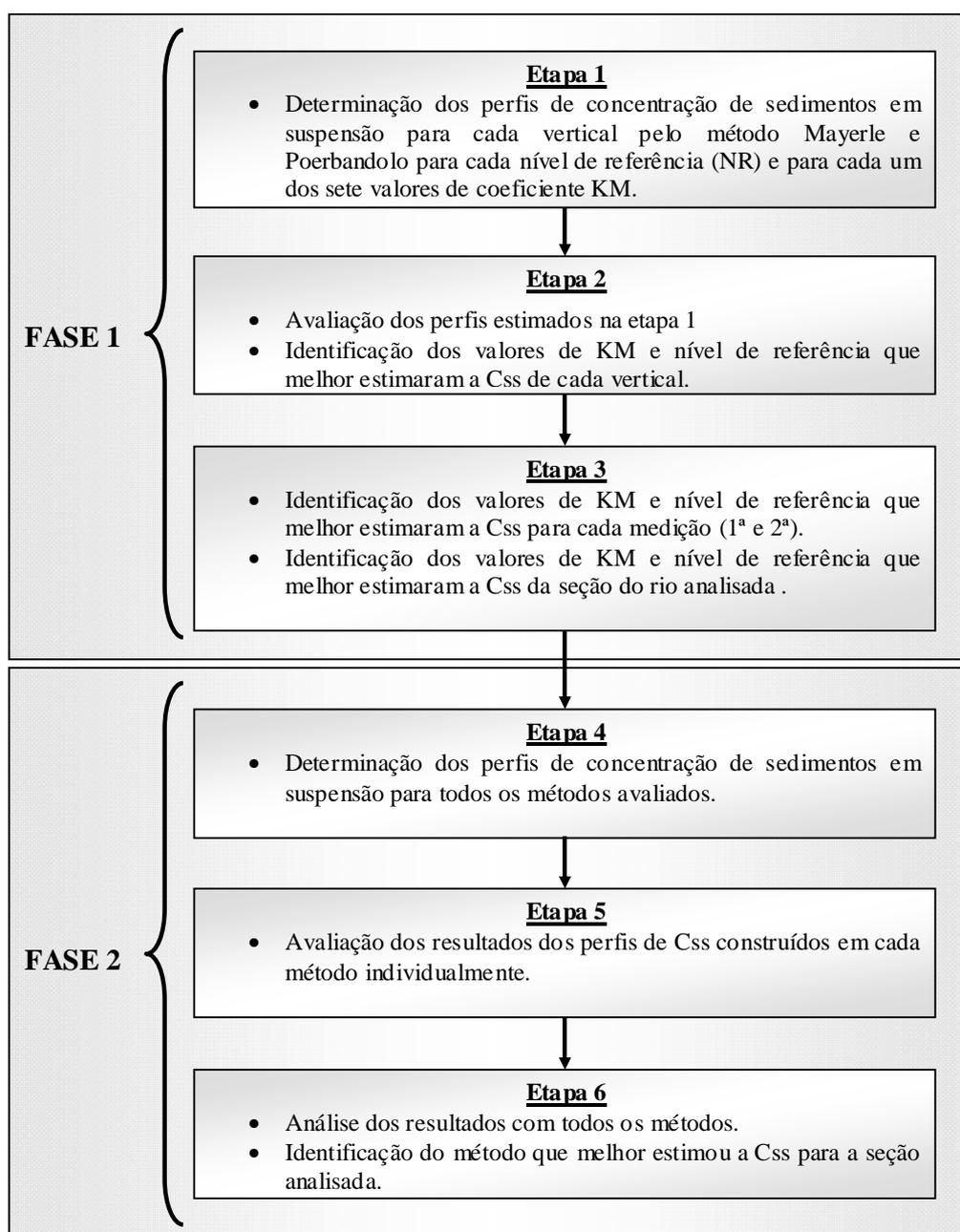


Figura 4.9 – Estrutura da metodologia de cálculo

A primeira fase de cálculos foi dividida em três etapas. Na etapa 1, foram estimados os perfis de C_{ss} para cada uma das verticais medidas, de ambas as medições, apenas para o método Mayerle e Poerbandolo (M&P), testando de forma individual cada um dos sete valores para o coeficiente KM, correspondentes a 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,45, 0,55. Como foram amostrados cinco pontos em cada vertical, cada ponto foi considerado uma vez como nível de referência (NR%), obtendo-se assim um conjunto de cinco perfis de cada vertical para cada nível de referência.

Na etapa 2, os valores de C_{ss} obtidos nos perfis de cada KM foram comparados com os valores medidos através das relações de correlação e das faixas dos fatores de discrepância. Assim, foram determinados, para cada uma das verticais, o coeficiente KM e o nível de referência (NR%) que melhor aproximaram os valores de concentração estimados daqueles calculados em laboratório através das amostras de água e sedimentos.

As faixas dos fatores de discrepância têm sido utilizadas por alguns autores para avaliar a eficiência dos métodos de conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão. As faixas dos fatores de discrepância são baseadas na razão de discrepância definida por Van Rijn (1984), representada pela equação 19.

$$r = \frac{C_{estimado}}{C_{medido}} \quad (19)$$

onde, $C_{estimado}$ é a concentração estimada pela amostragem acústica e C_{medido} é a concentração medida através de amostragem mecânica ou óptica.

A avaliação é feita com base na porcentagem dos resultados obtidos que resultam dentro de uma determinada faixa de variação de r , chamado de fator. A Tabela 4.4 relaciona o fator com a respectiva faixa de variação de r .

Tabela 4.4 – Fator e faixa de variação de r

Fator r	Faixa de variação
Fator 1,25	0,80 – 1,25
Fator 1,50	0,75 – 1,50
Fator 2,00	0,50 – 2,00
Fator 3,00	0,33 – 3,00
Fator 5,00	0,20 – 5,00

(Fonte: LU, 2003)

Diferentemente de Lu (2003), que considerou aceitável um resultado em que 70% (ou mais) das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, foram considerados satisfatórios os resultados superiores a 70% e iguais a 100% do perfil estimado dentro da faixa do fator r igual a 1,5.

Na última etapa da primeira fase, referente à etapa 3, foram identificados os melhores valores de coeficiente KM e nível de referência para cada uma das duas medições realizadas em datas diferentes. Estes valores foram comparados e foram selecionados o melhor KM e o melhor nível de referência para a seção analisada do rio, chamada de $[PV_{x,y}(NR\%)]$. O sub-índice “x” identifica a medição (1 ou 2) e o sub-índice “y” representa a vertical (1, 2 ou 3, correspondentes às verticais V1, V2 e V3, respectivamente).

A segunda fase do processo de cálculo também foi realizada em três etapas. A etapa 4 consistiu na estimativa dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão para todos os métodos avaliados: Deines, M&P, Gartner 5, Gartner T e “Css x ABS”. O valor do coeficiente KM definido na etapa 3 foi utilizado para a aplicação do método M&P, e o ponto do nível de referência também definido na etapa anterior foi utilizado para os métodos de Deines e M&P.

Na etapa 5, os perfis de concentração de sedimentos em suspensão foram avaliados para cada método, individualmente, através da análise das faixas dos fatores de discrepância. A última etapa do processo de cálculo compreendeu a comparação das estimativas de Css entre os métodos, possibilitando a identificação do método que melhor estimou as concentrações de sedimentos em suspensão na seção do rio estudada. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, que abrangem os dados utilizados como base para os cálculos, obtidos pelos equipamentos, e os valores de concentração de sedimentos em suspensão estimados pelos métodos testados. Os cálculos para estimativa da concentração de sedimentos com a utilização de informações do ADCP, calculados os valores médios dos quatro *beams* (dB médio), e apenas com os valores do *beam* 1 são apresentados separadamente.

As Tabelas 5.1 a 5.5 mostram as intensidades dos *backscatters* dos quatro *beams* e as concentrações medidas em laboratório para cada ponto medido de cada uma das medições nas verticais. A análise destas tabelas indica que a variação das concentrações medidas apresentou comportamentos diferentes para as verticais analisadas. Em algumas verticais, as concentrações mais elevadas estiveram mais próximas da superfície e em outras, mais próximas do fundo. Este fato repetiu-se para as concentrações mais baixas de cada vertical. As verticais V2 de ambas as medições e a vertical V1 da segunda medição apresentaram perfis das concentrações em forma de *zig-zag*, intercalando valores maiores e menores. Embora tenha apresentado essa variação ao longo do perfil, a vertical V2 da segunda medição foi a que apresentou os menores valores em todos os pontos. Ainda, esta vertical V2 apresentou a menor diferença entre os valores máximo e mínimo de concentração, igual a $4,19 \text{ mg.l}^{-1}$. A maior variação dos valores medidos corresponde à vertical V3 da segunda medição, cuja diferença dos valores de concentração medidos foi $10,3 \text{ mg.l}^{-1}$.

Em relação aos dados de *backscatters*, de todos os pontos amostrados, somente em dois deles os valores do *beam* 1 foram maiores do que os valores do dB médio, conforme os dados da Tabela 5.3, para a profundidade de 50% e da Tabela 5.5, para a profundidade de 80%. Em média, as intensidades do *beam* 1 foram 2,24 decibéis menores do que as do dB médio. A maioria das estimativas de *C_{ss}* realizadas tanto para o dB médio como para o *beam* 1, resultou em valores maiores do que os medidos, com exceção dos resultados estimados pelos métodos de Deines e M&P45, que subestimaram quase todos os valores.

Tabela 5.1 – Dados da vertical V2 da 1ª medição

Medição: 1ª		Vertical: 2ª			Profundidade (H): 5,5 m		
Amostra (h)	% H	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB médio	C (mg/l)
1,11	0,20	77,03	83,06	81,83	80,17	80,52	17,99
1,61	0,29	73,19	79,72	78,01	76,35	76,82	13,18
2,86	0,52	69,08	74,80	74,28	72,40	72,64	15,53
3,36	0,61	68,89	73,36	72,24	71,43	71,48	12,14
4,36	0,79	66,61	71,51	70,33	69,41	69,47	14,51

Tabela 5.2 – Dados da vertical V3 da 1ª medição

Medição: 1ª		Vertical: 3ª			Profundidade (H): 6,2 m		
Amostra (h)	% H	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB médio	C (mg/l)
1,11	0,18	76,18	80,73	79,25	79,17	78,84	16,48
1,86	0,30	69,63	75,07	73,47	72,62	72,70	9,85
3,11	0,50	69,33	74,58	73,41	72,97	72,57	16,62
3,86	0,62	70,24	75,08	73,52	72,69	72,88	15,94
4,86	0,78	69,21	75,41	72,99	72,63	72,56	11,21

Tabela 5.3 – Dados da vertical V1 da 2ª medição

Medição: 2ª		Vertical: 1ª			Profundidade (H): 6,2 m		
Amostra (h)	% H	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB médio	C (mg/l)
1,24	0,20	63,38	68,63	67,40	66,21	66,41	9,00
1,86	0,30	63,21	69,06	66,50	67,32	66,52	*
3,1	0,50	73,00	71,80	69,70	70,10	71,15	15,58
3,72	0,60	67,50	73,57	70,96	69,34	70,34	9,51
4,96	0,80	70,31	72,66	70,61	69,96	70,80	17,29

* Ponto com problema na determinação da concentração

Tabela 5.4 – Dados da vertical V2 da 2ª medição

Medição: 2ª		Vertical: 2ª			Profundidade (H): 5,3 m		
Amostra (h)	% H	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB médio	C (mg/l)
1,06	0,20	64,93	69,66	68,51	67,55	67,66	8,74
1,59	0,30	62,57	68,31	66,44	65,36	65,67	7,25
2,65	0,50	64,45	67,53	65,36	64,89	65,56	8,64
3,18	0,60	64,44	67,54	66,16	65,62	65,94	5,44
4,24	0,80	66,06	67,89	68,01	65,87	66,96	9,63

Tabela 5.5 – Dados da vertical V3 da 2ª medição

Medição: 2ª		Vertical: 3ª			Profundidade (H): 6,37 m		
Amostra (h)	% H	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB médio	C (mg/l)
1,27	0,20	64,07	71,42	69,41	67,77	68,17	*
1,91	0,30	63,35	68,93	67,41	65,84	66,38	15,55
3,18	0,50	65,97	70,42	69,85	68,79	68,76	18,43
3,82	0,60	66,33	71,71	67,88	67,34	68,31	9,99
5,1	0,80	68,98	68,52	67,28	66,13	67,73	8,17

* Ponto com problema na determinação da concentração

A seguir serão apresentados os resultados das estimativas de C_{ss} realizadas com o valor médio do *backscatter* dos quatro *beams* (dB médio) e com as informações de *backscatter* do *beam* 1.

5.1 Resultados para os cálculos com o dB médio

5.1.1 Coeficientes KM e NRs testados

Com os sete valores testados para o coeficiente KM foram gerados, para todas as verticais de cada medição e para cada nível de referência (NR), os perfis estimados das concentrações utilizando o dB médio de cada ponto medido, totalizando 23 gráficos com sete perfis estimados em cada um. A análise destes perfis permitiu determinar os melhores coeficientes KM e um nível de referência para serem utilizados pelos métodos de Deines e M&P na comparação com os outros métodos testados.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam o total de ocorrências que os perfis foram estimados pelos coeficientes KM, por vertical. A Tabela 5.6 indica o número de vezes em que cada KM, em cada vertical, estimou pelo menos 70% do perfil de C_{ss} com valores dentro da faixa de $r = 1,5$. A Tabela 5.7 informa quantas vezes cada KM, para cada vertical, estimou todo o perfil (100%) dentro desta faixa do fator r .

Tabela 5.6 – Nº de estimativas dos KM maiores que 70% em $r = 1,5$, para o dB médio

Medição	Vertical	Valores de coeficiente KM							Total de ocorrências
		0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,45	0,55	
1	2	4	4	2	2	1	0	0	13
1	3	3	3	2	1	0	0	0	9
2	1	1	1	3	3	3	3	3	17
2	2	4	4	4	4	4	4	4	28
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		12	12	11	10	8	7	7	
%		52	52	48	43	35	30	30	

Tabela 5.7 – Nº de estimativas dos KM iguais a 100% em $r = 1,5$, para o dB médio

Medição	Vertical	Valores de coeficiente KM							Total de ocorrências
		0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,45	0,55	
1	2	3	3	1	0	0	0	0	7
1	3	1	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	1	1	2
2	2	1	2	2	2	2	2	2	13
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		5	5	3	2	2	3	3	
%		22	22	13	9	9	13	13	

Os coeficientes KM de 0,15 e 0,20 foram os que mais vezes melhoraram os valores estimados por Deines. Considerando o critério de 70%, foram 12 vezes e em 5 vezes eles estimaram todos os pontos do perfil (100%) dentro da faixa do $r = 1,5$.

O melhor nível de referência (NR) foi encontrado, analisando-se os resultados mostrados nas Tabelas 5.8 e 5.9, que indicam o total de ocorrências que os perfis foram estimados por todos os NRs, por vertical. A Tabela 5.8 apresenta o número de vezes em que cada NR, em cada vertical, estimou pelo menos 70% do perfil e a Tabela 5.9 indica o número de vezes em que cada NR, em cada vertical, estimou 100% do perfil dentro da faixa de r igual a 1,5.

Tabela 5.8 – N° de estimativas dos NR maiores que 70% em $r = 1,5$, para o dB médio

Medição	Vertical	Níveis de referência (NR)					Total de ocorrências
		20%	30%	50%	60%	80%	
1	2	2	0	4	5	2	13
1	3	2	0	3	4	0	9
2	1	5	-	7	0	5	17
2	2	7	7	7	0	7	28
2	3	-	0	0	0	0	0
Total		16	7	21	9	14	
%		57	25	60	26	40	

Tabela 5.9 – N° de estimativas dos NR iguais a 100% em $r = 1,5$, para o dB médio

Medição	Vertical	Níveis de referência (NR)					Total de ocorrências
		20%	30%	50%	60%	80%	
1	2	1	0	3	2	1	7
1	3	1	0	0	0	0	1
2	1	1	-	1	0	0	2
2	2	6	7	0	0	0	13
2	3	-	0	0	0	0	0
Total		9	7	4	2	1	
%		32	25	11	6	3	

Na estimativa das concentrações, considerando o nível de referência a 20% da profundidade de cada vertical, obteve-se em 9 vezes o perfil todo (100%) dentro da faixa de r de 1,5. Para o critério de pelo menos 70% do perfil dentro desta faixa, este NR estimou apenas 3% a menos do que o NR de 50%.

Os pontos estimados na vertical V2, considerando as duas medições, foram os que mais se aproximaram das concentrações medidas. No total, 70 estimativas foram feitas nesta vertical, nas duas medições. Em 41 vezes o perfil estimado esteve pelo menos 70% dentro da faixa de $r = 1,5$ e em 20 vezes todo o perfil estimado esteve dentro desta faixa do fator r . Na vertical 2, o NR = 20% da profundidade, foi o que melhor estimou os valores de C_{ss}. Nas duas medições este ponto estimou em 9 vezes o perfil de C_{ss} considerando pelo menos 70%

dos valores dentro da faixa de r igual a 1,5. Ainda, este NR estimou todo o perfil (100%) dentro desta faixa do fator r , em 7 vezes.

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 observa-se que os coeficientes KM 0,15 e 0,20 foram os que melhor estimaram os valores das concentrações, apresentando o mesmo desempenho tanto para o critério de 70% quanto para o de 100% do perfil dentro do fator r de 1,5. Entre as estimativas feitas por estes dois KMs no ponto identificado como melhor (NR = 20% da vertical V2), na primeira medição os coeficientes angulares obtidos na regressão linear foram maiores, e neste caso melhores, do que os da segunda medição. O coeficiente angular para o KM de 0,20 foi o mais próximo da unidade, chegando a 0,7909, indicando uma inclinação da reta de regressão mais próxima de 45 graus, e ao mesmo tempo, o seu coeficiente linear foi o menor (2,067), indicando um menor deslocamento da reta em relação à origem dos dados no eixo das abscissas. Assim, o KM que melhor ajustou uma reta de regressão dentro da faixa de r igual a 1,5 foi o valor de 0,20, seguido do coeficiente KM igual a 0,15.

Desta forma, o ponto que foi utilizado como nível de referência, para gerar as estimativas das outras verticais e compará-las com as estimativas realizadas com os outros métodos, foi o NR = 20% da profundidade, referente à vertical V2 da primeira medição. Assim, o ponto [PV x,y (NR%)], obtido ao final da etapa 3 do processo de cálculo, onde “ x ” é o número da vertical, “ y ” é a medição e NR% é o nível de referência corresponde a [PV1,2(20%)], calculado com os coeficientes KM iguais a 0,15 e 0,20.

5.1.2 Estimativas – 1ª Medição/Vertical 2

A seguir, na Figura 5.1, são apresentados os resultados das estimativas obtidos pelos métodos testados na mesma vertical e medição onde se determinou o ponto que melhor resultou como nível de referência [PV1,2(20%)].

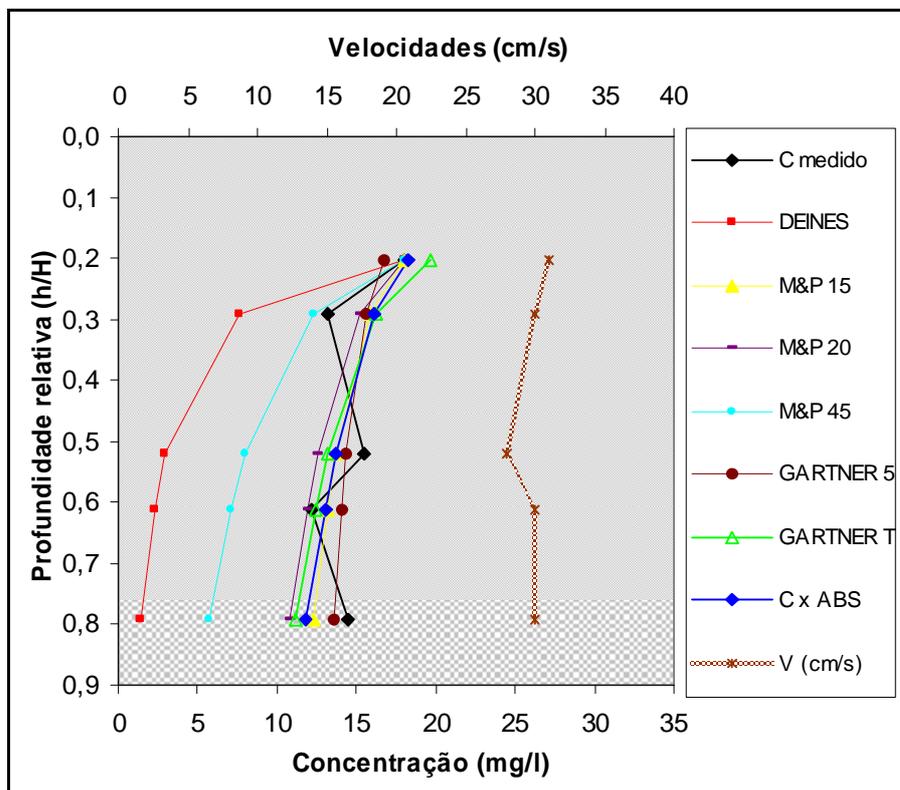


Figura 5.1 – Perfis de C_{ss} para V2 da medição 1 a partir do melhor NR – dB médio

Nesta vertical, as velocidades foram praticamente constantes, variando de 28 a 31 cm.s^{-1} . A variação do perfil das concentrações medidas não acompanhou o perfil de velocidades, porém os perfis das C_{ss} estimadas apresentaram uma variação semelhante a do perfil de velocidades.

A Figura 5.2 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou a mesma forma dos perfis das estimativas, diminuindo com a profundidade. O perfil inicia com o valor de 80,52 decibéis no ponto a 20% da profundidade da vertical e chega em 69,47 decibéis na posição a 80% da profundidade. O ponto localizado na posição a 50% da profundidade foi onde ocorreu a maior variação entre as intensidades dos *backscatters* instantâneos. A diferença entre os valores registrados pelo ADCP durante o tempo de amostragem neste ponto chegou a 8,15 decibéis.

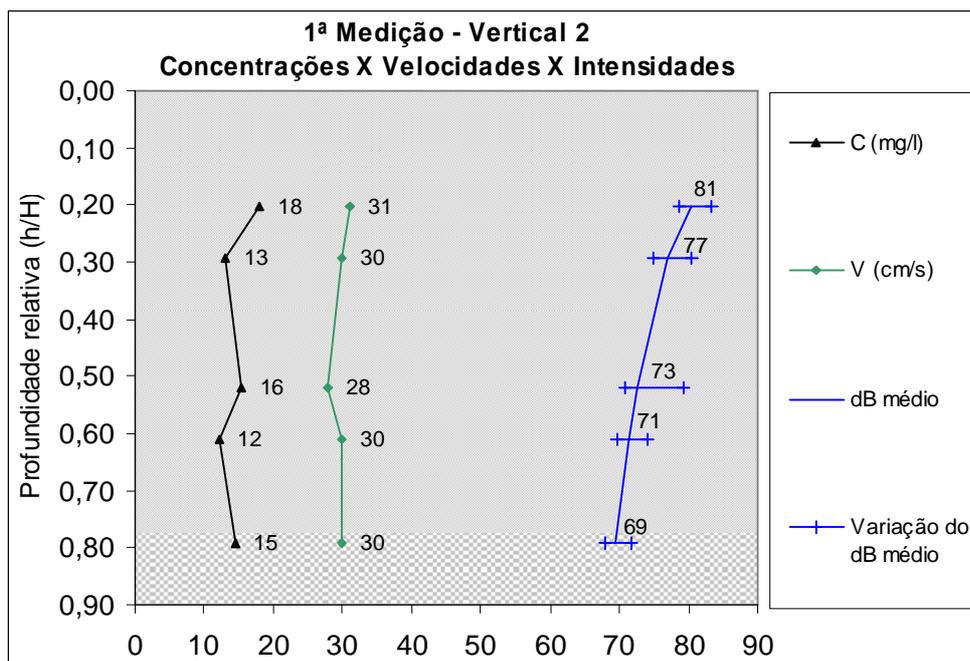


Figura 5.2 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 1 – dB médio

Na Figura 5.3 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e ainda equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V2 da primeira medição. A Tabela 5.10 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.10 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V2 – dB médio

Medição 1 Vertical 2 - dB Médio - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	20%	100%	80%	40%	100%	100%	100%
2	40%	100%	100%	80%	100%	100%	100%
3	40%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.3 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45 graus. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que as estimativas mais ajustadas em relação às faixas de r foram obtidas pelo método de Gartner T, seguido pelos métodos de “C_{ss} X ABS”, M&P20 e M&P15.

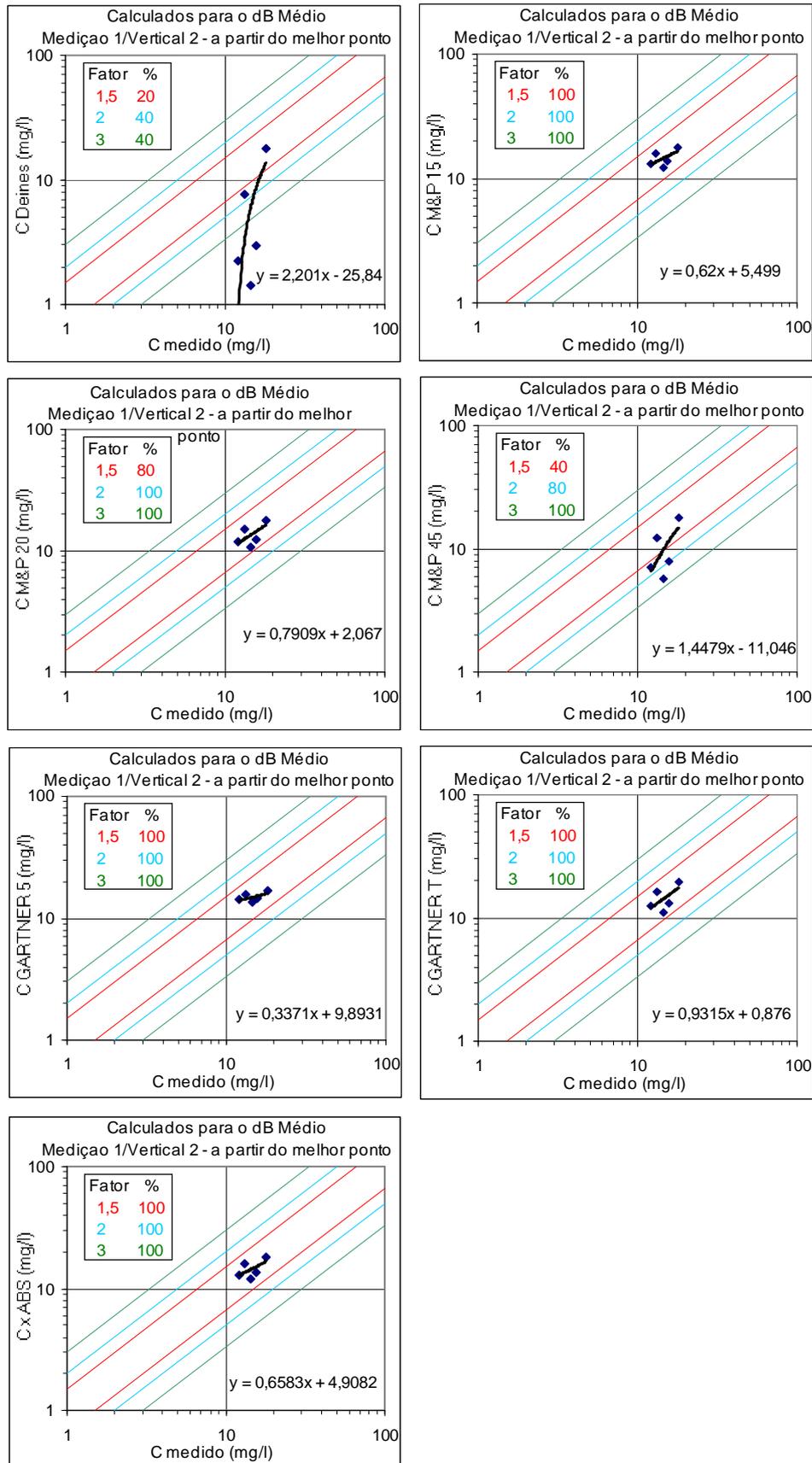


Figura 5.3 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1, vertical 2) – dB médio

5.1.3 Estimativas – 1ª Medição/Vertical 3

Os perfis estimados pelos métodos testados para a vertical 3 da primeira medição obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)] são apresentados na Figura 5.4.

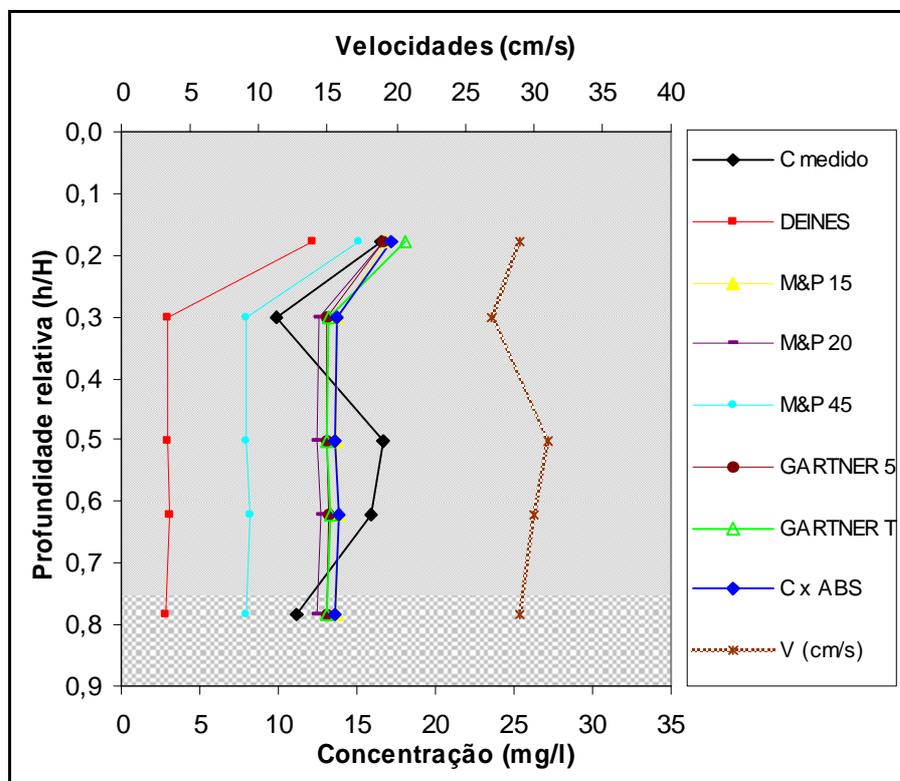


Figura 5.4 – Perfis de C_{ss} para V3 da medição 1 a partir do melhor NR – dB médio

Os valores das velocidades nesta vertical apresentaram pouca variação. A menor velocidade foi de 27 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, medida na posição a 30% da profundidade da vertical e o maior valor foi de 31 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, na metade do perfil. A forma do perfil das velocidades foi muito semelhante à variação do perfil das concentrações medidas, porém com amplitudes menores entre os valores de cada ponto. Os perfis das C_{ss} estimadas apresentaram perfis praticamente constantes do ponto a 30% da profundidade até o ponto a 80% da profundidade da vertical.

A Figura 5.5 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma semelhante à do perfil de C_{ss} estimado, iniciando com um valor maior próximo à superfície, 78,84 decibéis, e diminuindo para 72,70 decibéis no ponto a 30% da profundidade, mantendo-se praticamente constante até a posição a 80% da profundidade onde alcançou 72,56 decibéis. A maior variação entre os *backscatters* instantâneos ocorreu no ponto localizado a 20% da profundidade da vertical. A diferença entre os valores registrados durante o tempo de amostragem neste ponto foi de 8,05 decibéis.

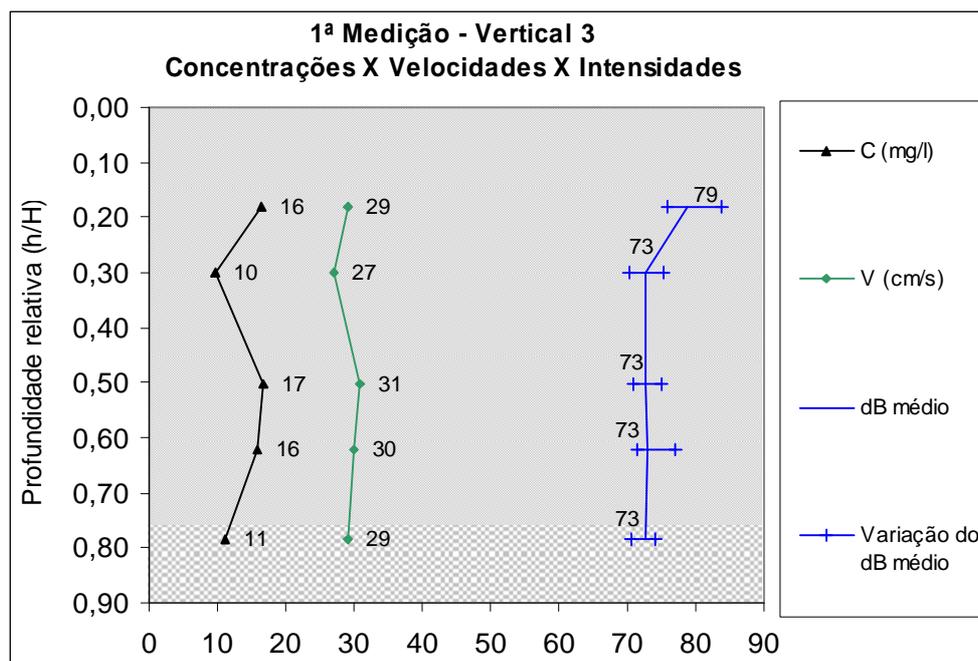


Figura 5.5 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 1 – dB médio

Na Figura 5.6 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V3 da primeira medição. A Tabela 5.11 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.11 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V3 – dB médio

Medição 1 Vertical 3 - dB Médio - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	20%	100%	100%	40%	100%	100%	100%
2	40%	100%	100%	80%	100%	100%	100%
3	40%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.6 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, observa-se que os valores de coeficiente angular dos métodos de M&P15, M&P20, Gartner 5, Gartner T e “C_{ss} X ABS” apresentaram valores próximos de zero, indicando não haver uma relação linear entre as estimativas destes métodos com as concentrações medidas. Embora o coeficiente angular obtido para o método de Deines tenha sido o maior desta vertical, nenhum valor foi estimado dentro da faixa do fator r de 1,5 e apenas 20% dos pontos estimados ficaram dentro da faixa de $r = 3$.

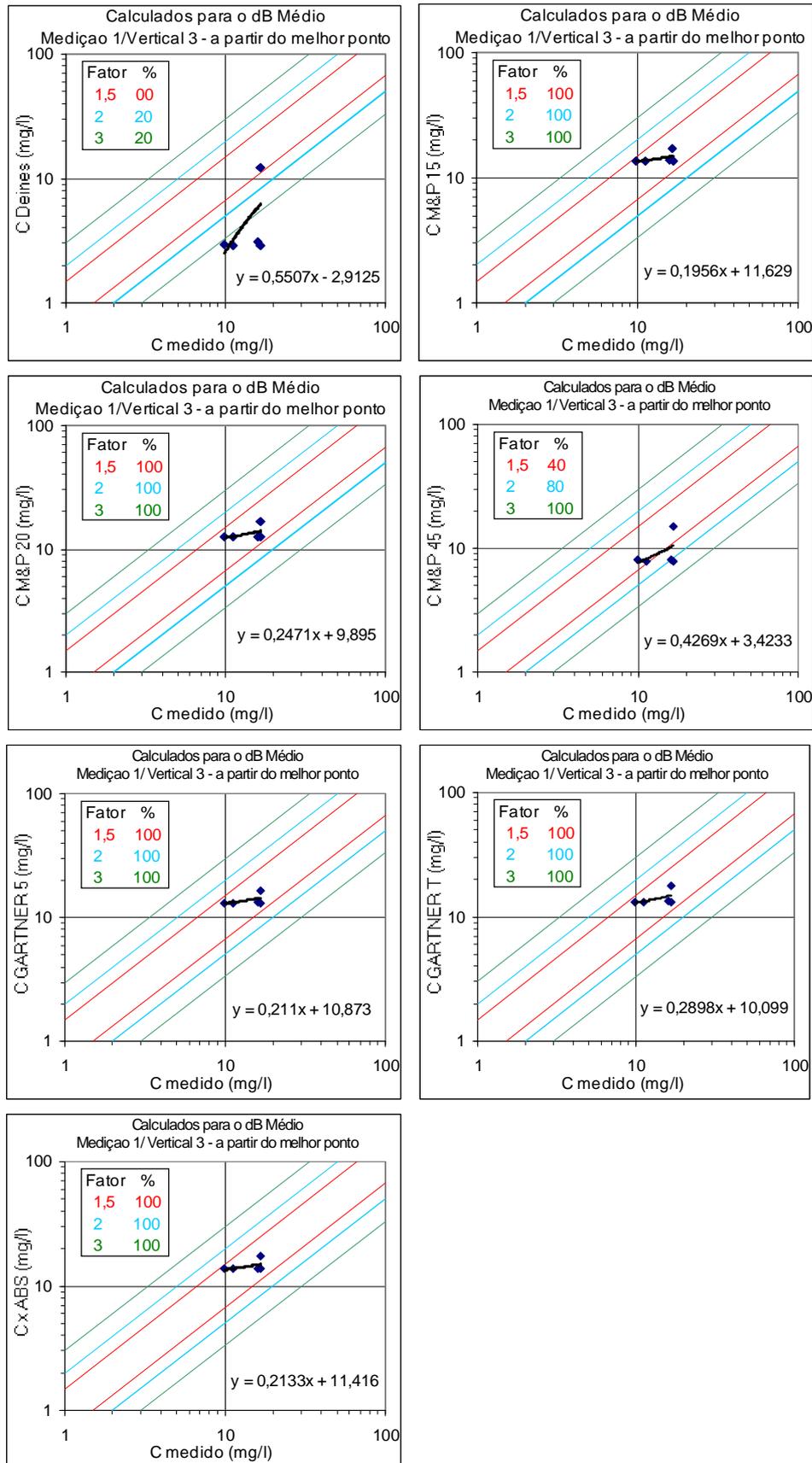


Figura 5.6 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 3) – dB médio

5.1.4 Estimativas – 2º Medição/Vertical 1

Na Figura 5.7 são apresentados os perfis de C_{ss} estimados pelos métodos para a vertical 1 da segunda medição, obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)].

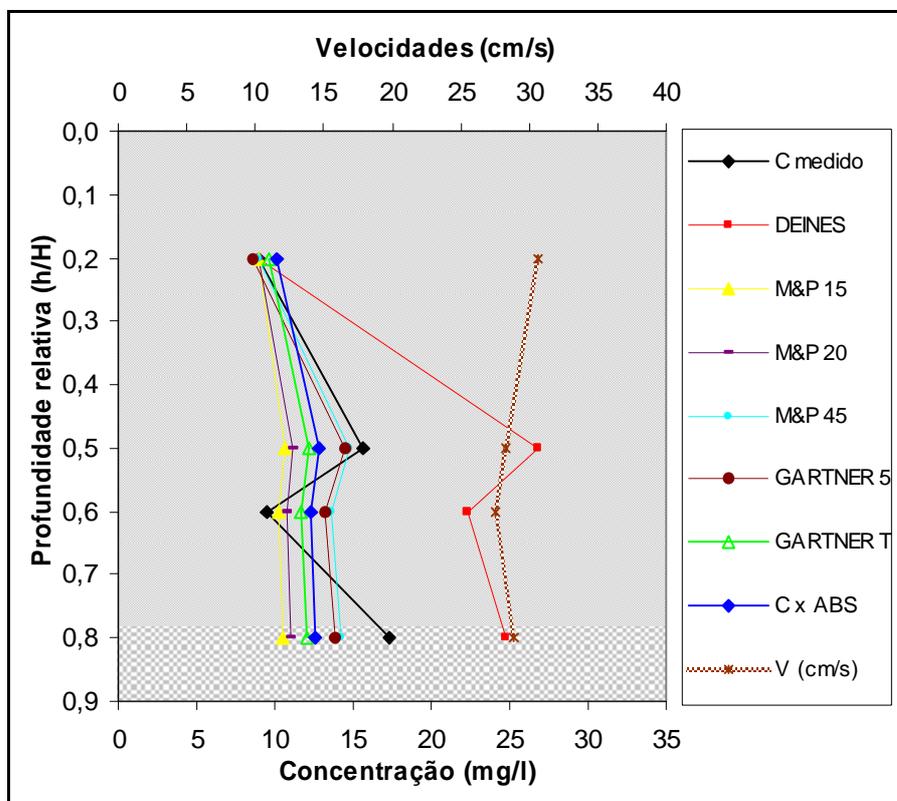


Figura 5.7 – Perfis de C_{ss} para V1 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio

As velocidades nesta vertical praticamente não apresentaram variação. A diferença entre o maior valor, 31 cm.s^{-1} , medido na posição a 20% da profundidade e a menor velocidade, 28 cm.s^{-1} , verificada nas posições a 50% e 60% da profundidade, foi de 3 cm.s^{-1} . A forma do perfil das velocidades mostra alguma semelhança com o perfil das concentrações medido apenas da metade da vertical para baixo. Da metade da vertical para cima, o perfil das concentrações apresenta valores menores, enquanto que, no perfil das velocidades os valores aumentam. Esta relação também se verifica para os perfis das C_{ss} estimadas.

A Figura 5.8 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma semelhante à do perfil das estimativas de C_{ss}, porém com amplitude menor entre os valores de cada ponto. A maior variação entre os *backscatters* instantâneos ocorreu no ponto a 80% da profundidade da vertical. A diferença entre os valores durante o tempo de amostragem neste ponto chegou a 15,18 decibéis.

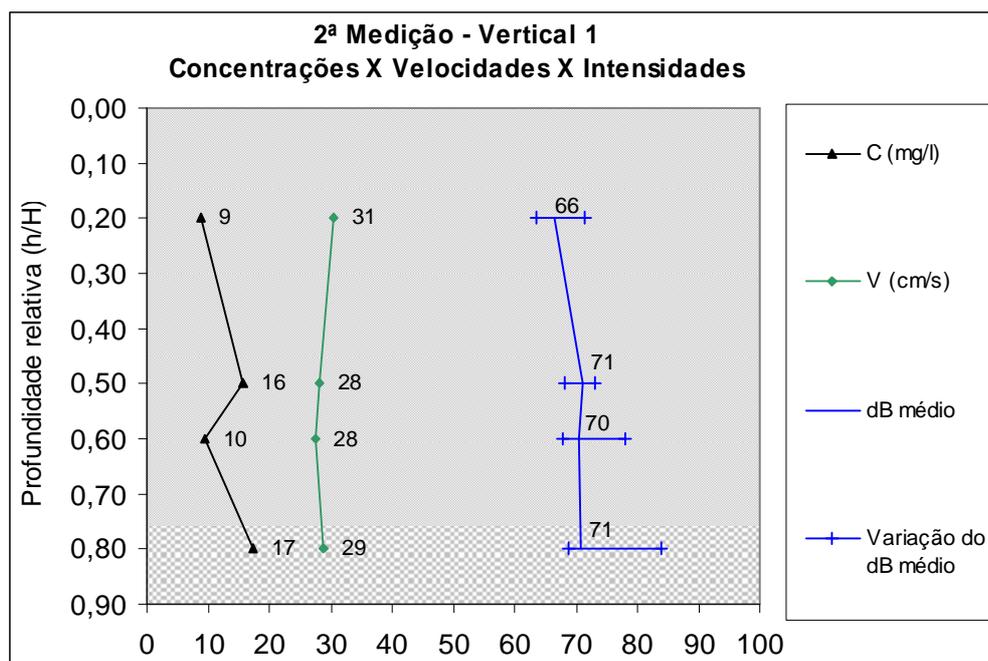


Figura 5.8 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V1 da medição 2 – dB médio

Na Figura 5.9 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V1 da segunda medição. A Tabela 5.12 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.12 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V1 – dB médio

Medição 2 Vertical 1 - dB Médio - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	50%	50%	50%	100%	100%	75%	75%
2	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	100%						

As equações apresentadas na Figura 5.9 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45 graus. Deste modo, observa-se que os valores de coeficiente angular dos métodos de M&P15, M&P20, Gartner 5, Gartner T e “C_{ss} X ABS” apresentaram valores de mesma ordem de grandeza do que os observados para a vertical V3 da primeira medição. Nesta vertical, o método de Deines estimou 50% dos valores dentro da faixa do fator r de 1,5 e 75% dentro da faixa do fator $r = 2$. O método M&P45 foi o que apresentou a melhor correlação e ainda com 100% dos valores estimados dentro da faixa do fator r de 1,5.

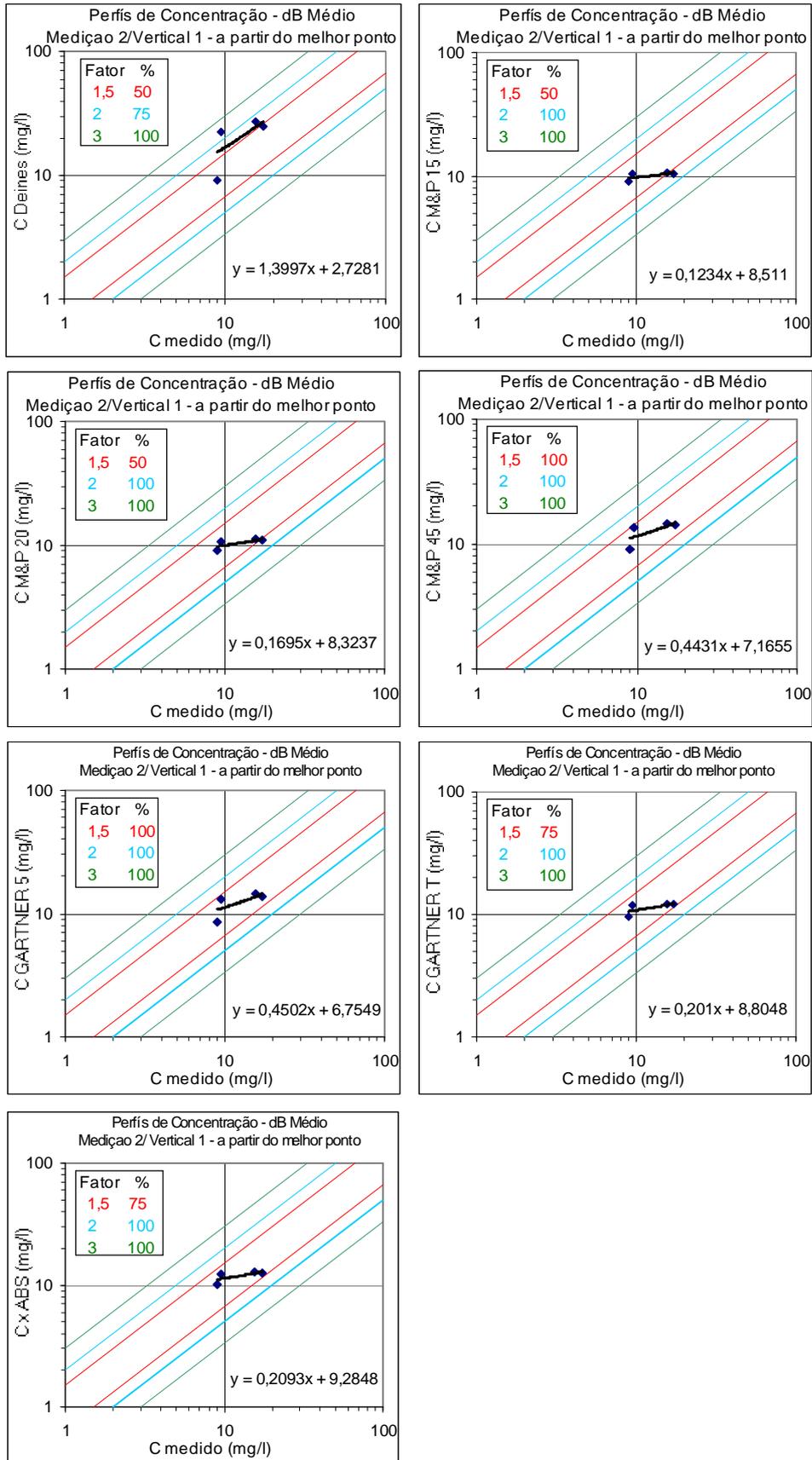


Figura 5.9 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 1) – dB médio

5.1.5 Estimativas – 2º Medição/Vertical 2

Os perfis estimados pelos diversos métodos para a vertical 2 da segunda medição, obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)] estão apresentados na Figura 5.10.

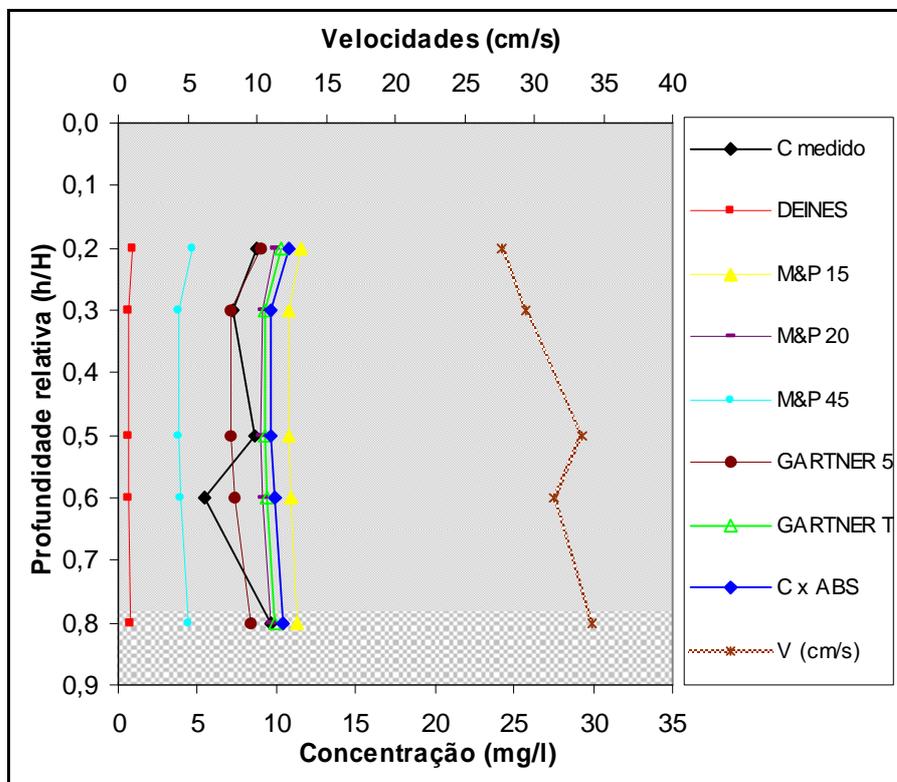


Figura 5.10 – Perfis de C_{ss} para V2 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio

Nesta vertical, os valores do perfil das velocidades aumentaram diretamente com a profundidade, iniciando em 28 cm.s^{-1} , próximo da superfície, e chegando no ponto a 80% da profundidade com 34 cm.s^{-1} . A variação do perfil das concentrações medidas não acompanhou a variação do perfil de velocidades apenas no ponto mais próximo da superfície. Os perfis de todos os métodos de estimativa das C_{ss} apresentaram valores praticamente constantes.

A Figura 5.11 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou valores praticamente constantes. O maior valor foi de 67,66 decibéis no ponto a 20% da profundidade da vertical e o menor foi 65,56 decibéis na posição a 50% da profundidade. O ponto localizado na posição a 80% da profundidade foi onde ocorreu a maior variação entre as intensidades dos *backscatters* instantâneos. A diferença entre todos os valores neste ponto chegou a 16,55 decibéis.

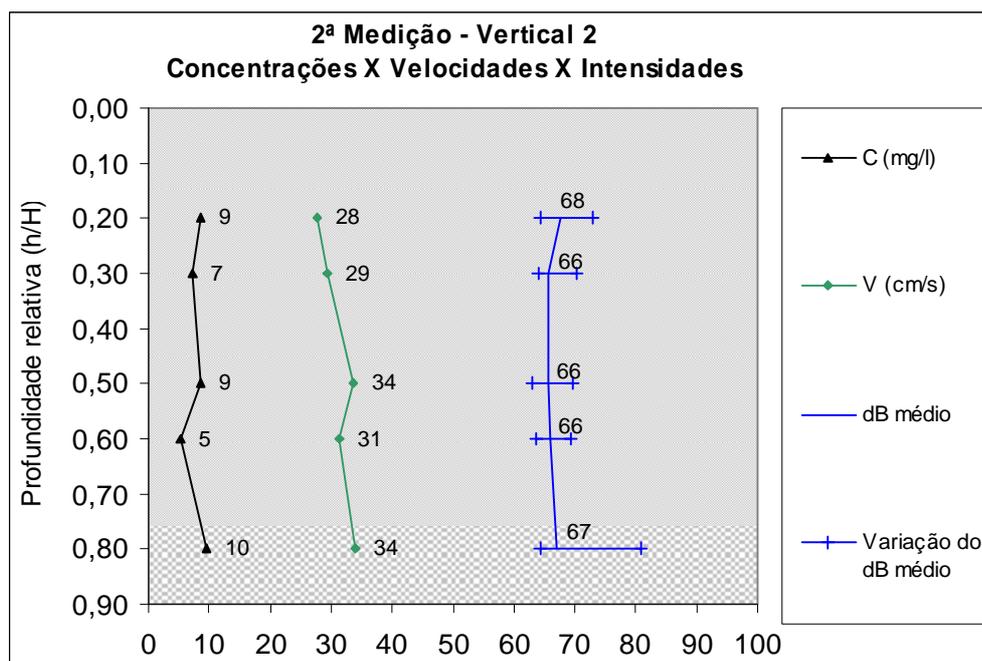


Figura 5.11 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 2 – dB médio

Na Figura 5.12 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V2 da segunda medição. A Tabela 5.13 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.13 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V2 – dB médio

Medição 2 Vertical 2 - dB Médio - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	0%	80%	80%	0%	100%	80%	80%
2	0%	100%	100%	60%	100%	100%	100%
3	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.12 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que, mesmo que o método de Gartner 5 tenha sido o único a estimar 100% dos pontos dentro da faixa do fator r de 1,5, o seu coeficiente angular, assim como o dos demais métodos, também foi um valor muito baixo. Isso indica que a equação ajustada não acompanha a inclinação das faixas do fator r . Nesta vertical, nenhum valor foi estimado pelo método de Deines nem mesmo dentro da faixa de r igual a 3.

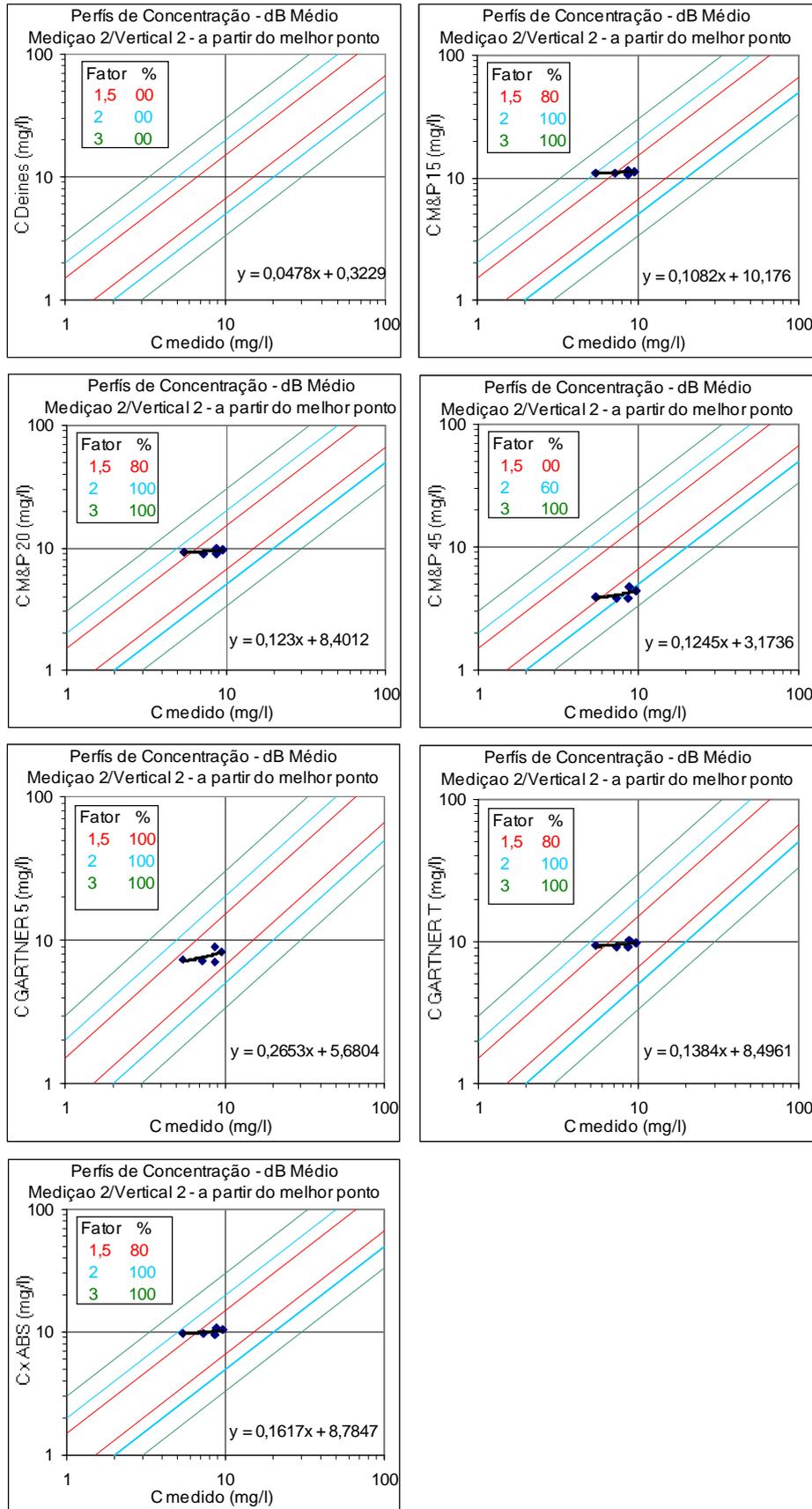


Figura 5.12 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 2) – dB médio

5.1.6 Estimativas – 2º Medição/Vertical 3

Na Figura 5.13 são apresentados os perfis estimados pelos diversos métodos para a vertical 3 da segunda medição, obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)]

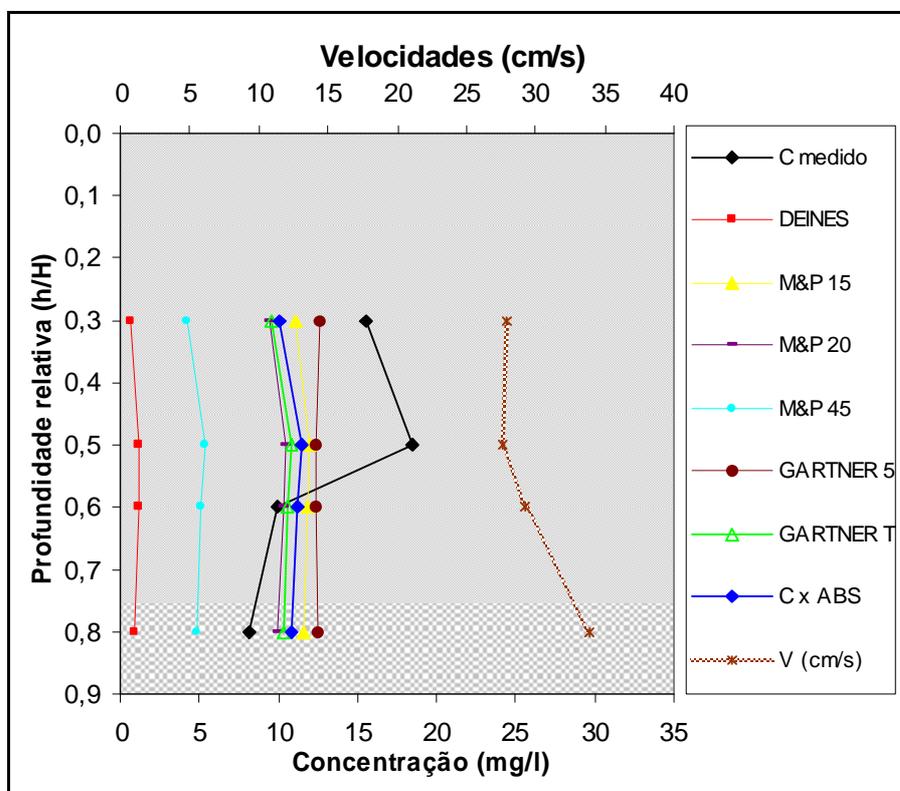


Figura 5.13 – Perfis de C_{ss} para V3 da medição 2 a partir do melhor NR – dB médio

As velocidades nesta vertical aumentaram conforme o aumento da profundidade. A diferença entre o maior valor, 34 cm.s^{-1} , medida na posição a 80% da profundidade e a menor velocidade, 28 cm.s^{-1} , verificada nas posições a 30% e 50% da profundidade, foi de 6 cm.s^{-1} . A forma do perfil das velocidades é inversa à forma do perfil das concentrações medidas. Nos pontos com as maiores concentrações, foram verificadas as menores velocidades e, no ponto próximo ao fundo, com a maior velocidade, obteve-se o menor valor de concentração. Os perfis das estimativas de C_{ss} foram praticamente constantes.

A Figura 5.14 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma semelhante à do perfil das concentrações medidas, porém com amplitude muito menor entre os valores de cada ponto. A maior variação entre os *backscatters* instantâneos ocorreu no ponto a 60% da profundidade da vertical. A diferença entre os ABS durante o tempo de amostragem neste ponto foi de 15,23 decibéis.

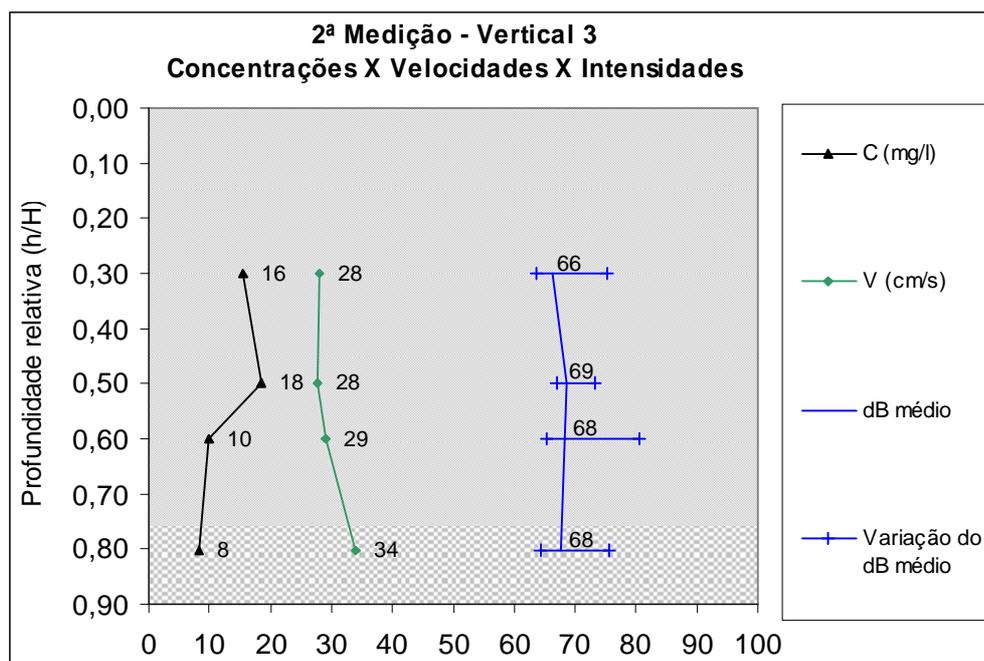


Figura 5.14 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 2 – dB médio

Na Figura 5.15 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V3 da segunda medição. A Tabela 5.14 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.14 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V3 – dB médio

Medição 2 Vertical 3 - dB Médio - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	0%	50%	50%	0%	50%	50%	50%
2	0%	100%	100%	50%	100%	100%	100%
3	0%	100%	100%	50%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.15 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que nenhum método estimou mais do que 50% dos valores de C_{ss} dentro da faixa do fator r de 1,5. Além disso, os coeficientes angulares de todos os métodos foram praticamente zero, indicando que para esta vertical nenhuma equação ajustada acompanha a inclinação das faixas do fator r , caracterizando esta como a pior vertical estimada pelos métodos testados.

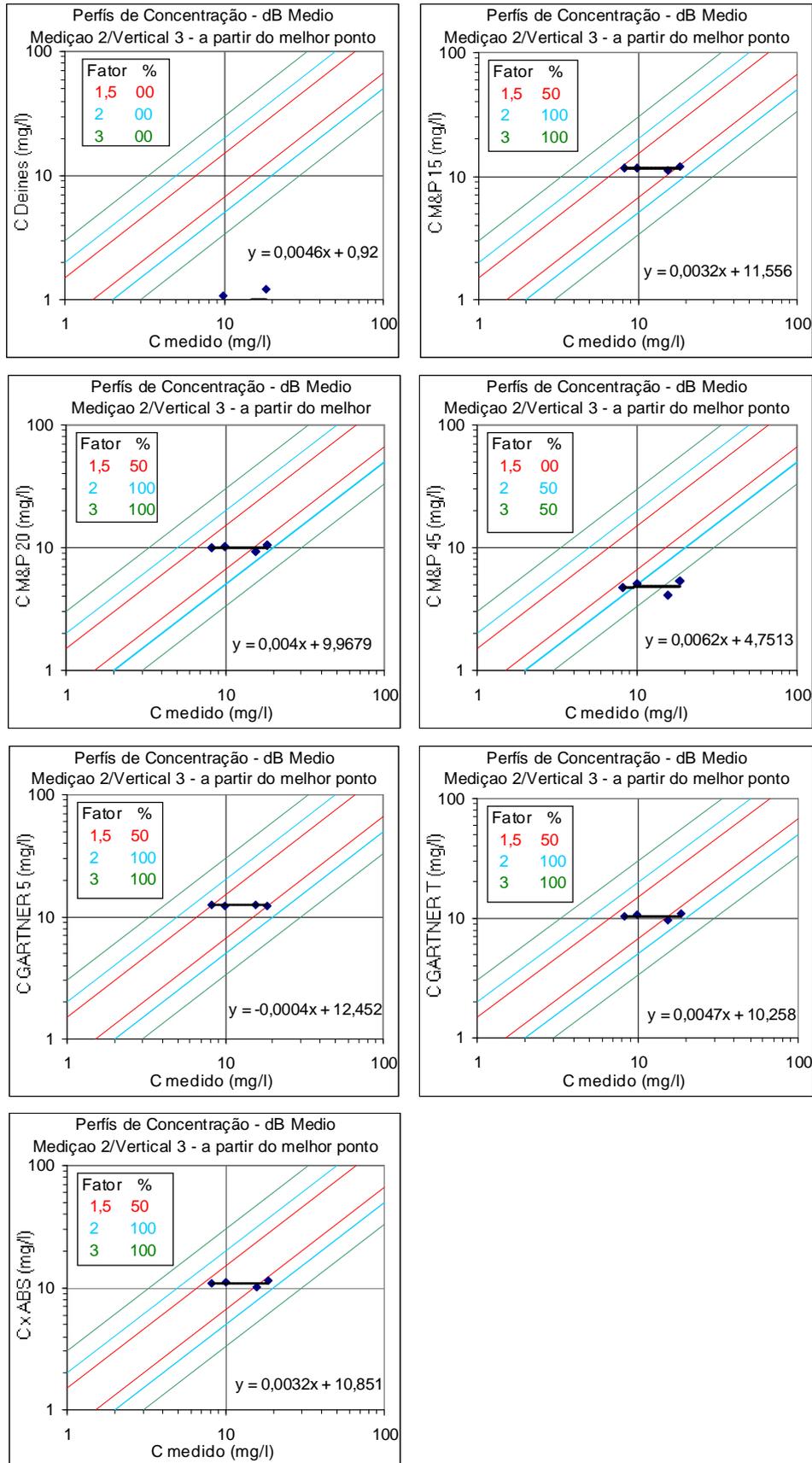


Figura 5.15 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 3 – vertical 3) – dB médio

5.1.7 Relações do método “Css x ABS” para o dB médio

As estimativas calculadas pelo método “Css x ABS” foram feitas com a relação obtida com todos os dados medidos, ou seja, o conjunto dos dados das duas medições. A Figura 5.16 apresenta esta relação, bem como as relações obtidas apenas com os dados de cada medição separadamente. A análise das relações permite identificar a formação de dois grupos distintos de pontos, onde os dados da primeira medição apresentaram, de forma geral, valores maiores de intensidade (ABS).

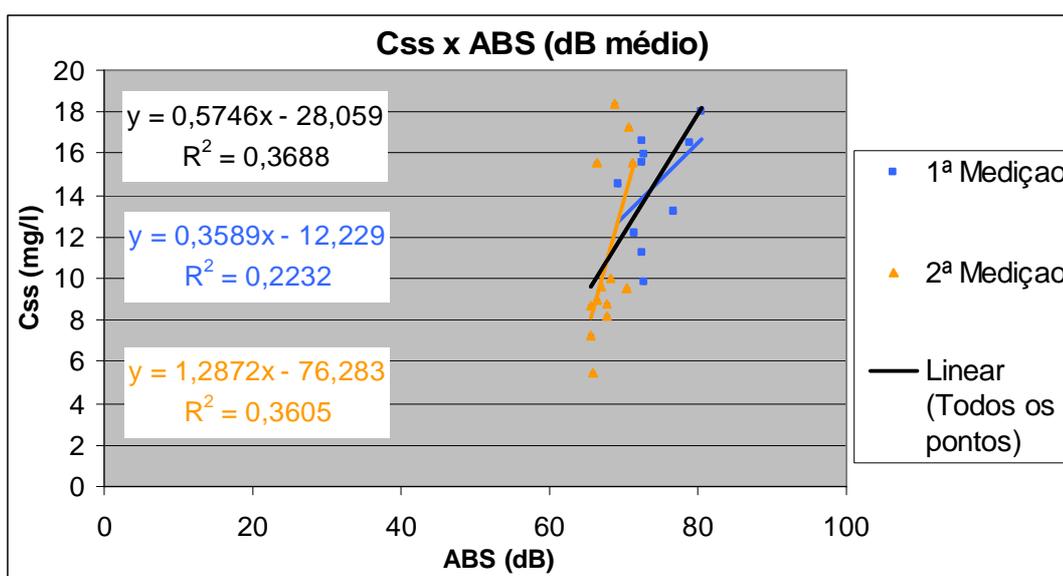


Figura 5.16 – Relações do método “Css x ABS” para os dados das duas medições – dB Médio

5.1.8 Resumo dos resultados para o dB médio

A partir das análises realizadas, observou-se que o método de Deines foi o que apresentou as piores estimativas dos valores de concentração. Apenas na vertical V1 da segunda medição, os valores estimados foram maiores do que os medidos, ou seja, superestimados. Nas demais verticais todos os pontos do perfil foram subestimados. Porém, ainda na vertical V1 da segunda medição, o método obteve o seu melhor desempenho, estimando 100% do perfil dentro do fator r igual a 3 e 75% do perfil dentro do fator r igual a 2. Nas verticais V2 e V3 da segunda medição, nenhum ponto foi estimado dentro do fator r igual a 3.

O segundo pior método, comparando-se os valores estimados com os medidos, foi o método M&P45, que utiliza o coeficiente KM recomendado por Lu (2003), igual a 0,45. O seu desempenho ao longo das verticais foi semelhante ao método de Deines. Porém, na

vertical V1 da segunda medição, o método M&P45 obteve 100% do perfil dentro da faixa de r igual a 1,5 e na sua pior estimativa, corresponde à vertical V3 da segunda medição, 50% do perfil ficou dentro da faixa de r igual a 2.

A pequena diferença entre os valores dos coeficientes KM de 0,15 e 0,20 (métodos M&P15 e M&P20, respectivamente) fez com que estes tivessem praticamente o mesmo desempenho nas estimativas das concentrações. A diferença entre estes dois métodos foi apenas da vertical 2 da primeira medição, onde o método M&P15 estimou todo o perfil dentro do fator r igual a 1,5 enquanto o método M&P20 obteve 80% dos pontos estimados dentro desta faixa do fator r .

Os métodos de Gartner 5, Gartner T e “Css x ABS” foram os que obtiveram os melhores resultados. Destes, os métodos que utilizaram todos os dados para construir as suas equações (Gartner T e “Css x ABS”) tiveram o desempenho exatamente igual. Nas melhores estimativas (verticais 2 e 3 da primeira medição) obtiveram 100% dos perfis dentro da faixa de r igual a 1,5, enquanto que na vertical 3 da segunda medição, a porcentagem dos pontos estimados dentro deste fator de r foi de apenas 50% para ambos os métodos.

Para os cálculos realizados com a média dos quatro *Beams* (dB médio), o melhor método foi o Gartner 5, pois apenas na vertical 3 da segunda medição não estimou 100% dos perfis dentro da faixa de r igual a 1,5. Nesta vertical, o método estimou 50% dos pontos dentro desta faixa do fator r .

As tabelas 5.15 e 5.16 apresentam o percentual do número de vezes que cada método estimou os valores de C_{ss} dentro da faixa de r igual a 1,5, para cada uma das verticais. A Tabela 5.15 apresenta os percentuais estimados superiores a 70% e a Tabela 5.16, os percentuais iguais a 100% do perfil, para os dados calculados com os dB médios.

Tabela 5.15 – Porcentagem de estimativas maiores que 70% em $r = 1,5$ para dB médio

dB Médio		Mais de 70% do perfil dentro de $r = 1,5$							Total de ocorrências
Medição	Vertical	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	C _{ss} xABS	
1	2	20%	100%	80%	40%	100%	100%	100%	5
1	3	0%	100%	100%	40%	100%	100%	100%	5
2	1	50%	50%	50%	100%	100%	75%	75%	4
2	2	0%	80%	80%	0%	100%	80%	80%	5
2	3	0%	50%	50%	0%	50%	50%	50%	0
> 70%		0	3	3	1	4	4	4	
%		0	60	60	20	80	80	80	

Tabela 5.16 – Porcentagem de estimativas iguais a 100% em $r = 1,5$ para dB médio

dB Médio		100% do perfil dentro de $r = 1,5$							Total de ocorrências
Medição	Vertical	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CssxABS	
1	2	20%	100%	80%	40%	100%	100%	100%	4
1	3	0%	100%	100%	40%	100%	100%	100%	5
2	1	50%	50%	50%	100%	100%	75%	75%	2
2	2	0%	80%	80%	0%	100%	80%	80%	1
2	3	0%	50%	50%	0%	50%	50%	50%	0
= 100%		0	2	1	1	4	2	2	
%		0	40	20	20	80	40	40	

5.2 Resultados para os cálculos com o *backscatter* do *beam 1*

5.2.1 Coeficientes KM testados

Com os sete valores testados para o coeficiente KM foram gerados, para todas as verticais de cada medição e para cada nível de referência (NR), os perfis estimados das concentrações utilizando os valores de decibéis apenas do *beam 1*, de cada ponto medido. A avaliação destes perfis permitiu determinar o melhor coeficiente KM e o nível de referência que melhor estimou os dados de concentração.

As Tabelas 5.17 e 5.18 apresentam o total de ocorrências que os perfis foram estimados pelos coeficientes KM, por vertical. A Tabela 5.17 indica o número de vezes em que cada KM, em cada vertical, estimou pelo menos 70% do perfil de C_{ss} com valores dentro da faixa de $r = 1,5$. A Tabela 5.18 informa quantas vezes cada KM, para cada vertical, estimou todo o perfil (100%) dentro desta faixa do fator r .

Tabela 5.17 – N° de estimativas dos KM maiores que 70% em $r = 1,5$, para o *beam 1*

Medição	Vertical	Valores de coeficiente KM							Total de ocorrências
		0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,45	0,55	
1	2	4	4	3	2	1	0	0	14
1	3	3	3	2	2	1	1	1	13
2	1	2	4	4	4	4	2	2	22
2	2	4	4	4	4	4	4	4	28
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		13	15	13	12	10	7	7	
%		57	65	57	52	43	30	30	

Tabela 5.18 – N° de estimativas dos KM iguais a 100% em $r = 1,5$, para o *beam* 1

Medição	Vertical	Valores de coeficiente KM						Total de ocorrências	
		0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,45		0,55
1	2	4	4	1	0	0	0	0	9
1	3	1	0	0	0	0	0	0	1
2	1	1	1	2	2	2	1	0	9
2	2	1	1	1	0	0	1	1	5
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		7	6	4	2	2	2	1	
%		30	26	17	9	9	9	4	

Para as estimativas feitas com os dados do *beam* 1, o melhor coeficiente KM foi o valor de 0,15, pois em 7 vezes estimou todos os valores de um perfil dentro da faixa de r igual a 1,5. Considerando o critério de pelo menos 70% do perfil estimado dentro desta faixa de r , o coeficiente KM de 0,20 foi o que mais atingiu este resultado, 15 vezes, duas a mais do que o KM de 0,15.

O melhor nível de referência (NR) foi encontrado através da análise dos resultados mostrados nas Tabelas 5.19 e 5.20, que indicam o total de ocorrências que os perfis foram estimados por todos os NRs, por vertical. A Tabela 5.19 apresenta o número de vezes em que cada NR, em cada vertical, estimou pelo menos 70% do perfil e a Tabela 5.20 indica o número de vezes em que cada NR, em cada vertical, estimou 100% do perfil dentro da faixa de r igual a 1,5.

Tabela 5.19 – N° de estimativas dos NR maiores que 70% em $r = 1,5$, para o *beam* 1

Medição	Vertical	Níveis de referência (NR)					Total de ocorrências
		20%	30%	50%	60%	80%	
1	2	2	0	4	5	3	14
1	3	2	0	3	5	3	13
2	1	6	-	5	5	6	22
2	2	7	7	7	0	7	28
2	3	-	0	0	0	0	0
Total		17	7	19	15	19	
%		61	25	54	43	54	

Tabela 5.20 – N° de estimativas dos NR iguais a 100% em $r = 1,5$, para o *beam* 1

Medição	Vertical	Níveis de referência (NR)					Total de ocorrências
		20%	30%	50%	60%	80%	
1	2	2	0	3	2	2	9
1	3	1	0	0	0	0	1
2	1	3	-	3	0	3	9
2	2	0	3	0	0	2	5
2	3	-	0	0	0	0	0
Total		6	3	6	2	7	
%		21	11	17	6	20	

Para os dados do *beam* 1, o NR que melhor estimou os perfis também foi o ponto a 20% da profundidade das verticais. Das estimativas calculadas com este NR, 21% apresentaram todo o perfil estimado dentro da faixa de $r = 1,5$ e considerando o critério de pelo menos 70% do perfil dentro desta faixa, foram 61% das vezes.

Considerando apenas os dados do *beam* 1, a vertical que mais vezes estimou pelo menos 70% dos perfis dentro da faixa de $r = 1,5$, assim como para os cálculos com o dB médio, também foi a vertical V2, 42 vezes. Ainda, a vertical V2, nas duas medições, foi a que mais estimou os valores dentro do critério de 100% do perfil em $r = 1,5$, representando 14 vezes, conforme a Tabela 5.20. Desta forma, o ponto que melhor estimou os valores de C_{ss} foi o NR = 20% da profundidade da vertical V2.

Da mesma forma que para os cálculos realizados para o dB médio, observa-se nas Tabelas 5.17 e 5.18 que os coeficientes KM de 0,15 e 0,20 também foram os que melhor estimaram os valores das concentrações. Em relação às estimativas feitas por estes dois coeficientes na profundidade que melhor estimou a C_{ss}, ou seja, o ponto a 20% da vertical V2, na primeira medição, os coeficientes angulares obtidos na regressão linear foram melhores, ou seja, foram mais próximos da unidade do que os da segunda medição. O coeficiente angular para o KM de 0,20 apresentou o valor mais alto, igual a 0,7316, indicando uma inclinação da reta de regressão mais próxima de 45°, e ao mesmo tempo, o seu coeficiente linear foi o menor, igual a 3,0759, indicando um menor deslocamento da reta em relação à origem dos dados no eixo das abscissas. Assim, o KM que melhor ajustou uma reta de regressão dentro da faixa de $r = 1,5$, neste ponto, foi o valor de 0,20, seguido do coeficiente KM igual a 0,15.

Desta forma, o ponto que foi utilizado como nível de referência, com os dados do *beam* 1, para gerar as estimativas das outras verticais e compará-las com as estimativas realizadas com os outros métodos, foi o NR = 20% da profundidade, referente à vertical V2 da primeira medição. Este ponto foi chamado de [PV1,2(20%)], e foi utilizado para os cálculos com os coeficientes KM de 0,15 e 0,20.

5.2.2 Estimativas – 1ª Medição/Vertical 2

A seguir, na Figura 5.17, são apresentados os resultados das estimativas obtidos pelos métodos testados na mesma vertical e medição onde se determinou o ponto que melhor resultou como nível de referência [PV1,2(20%)].

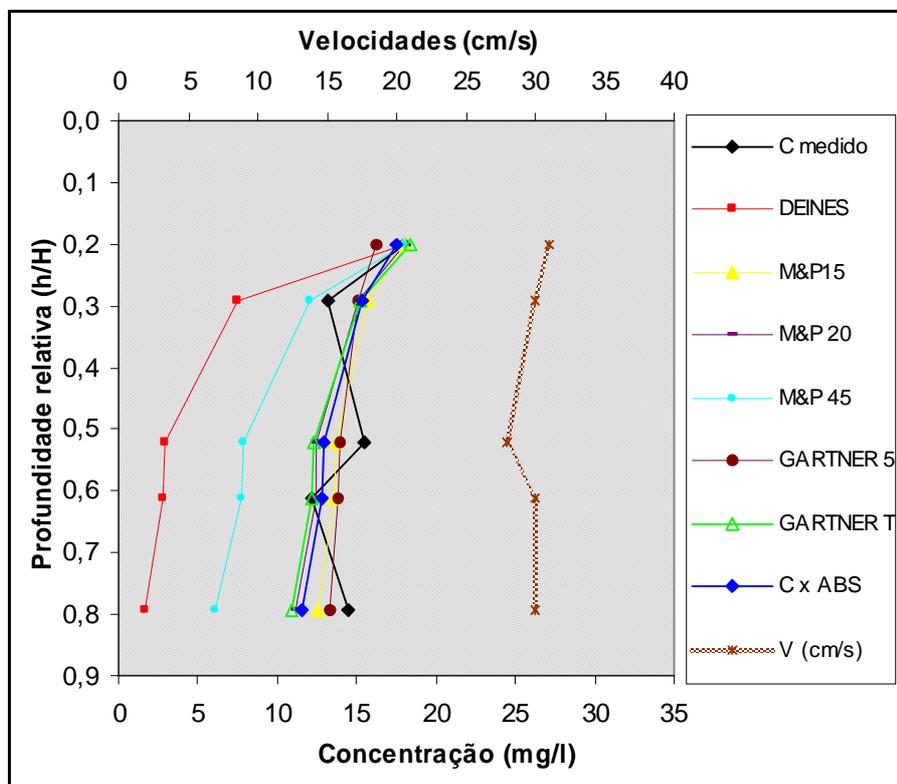


Figura 5.17 – Perfis de C_{ss} para V2 da medição 1 a partir do melhor NR – *beam 1*

Nesta vertical, as velocidades foram praticamente constantes, variando de 28 a 31 cm.s^{-1} . A variação do perfil das concentrações medidas não acompanhou o perfil de velocidades, porém os perfis das C_{ss} estimadas apresentaram uma variação semelhante a do perfil de velocidades.

A Figura 5.18 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou a mesma forma dos perfis das estimativas, diminuindo com a profundidade. O perfil inicia com o valor de 77,03 decibéis no ponto a 20% da profundidade da vertical e chega em 66,61 decibéis na posição a 80% da profundidade. O ponto localizado na posição a 30% da profundidade foi onde ocorreu a maior variação entre as intensidades dos *backscatters* instantâneos. A diferença entre os valores registrados pelo ADCP durante o tempo de amostragem neste ponto chegou a 13,10 decibéis.

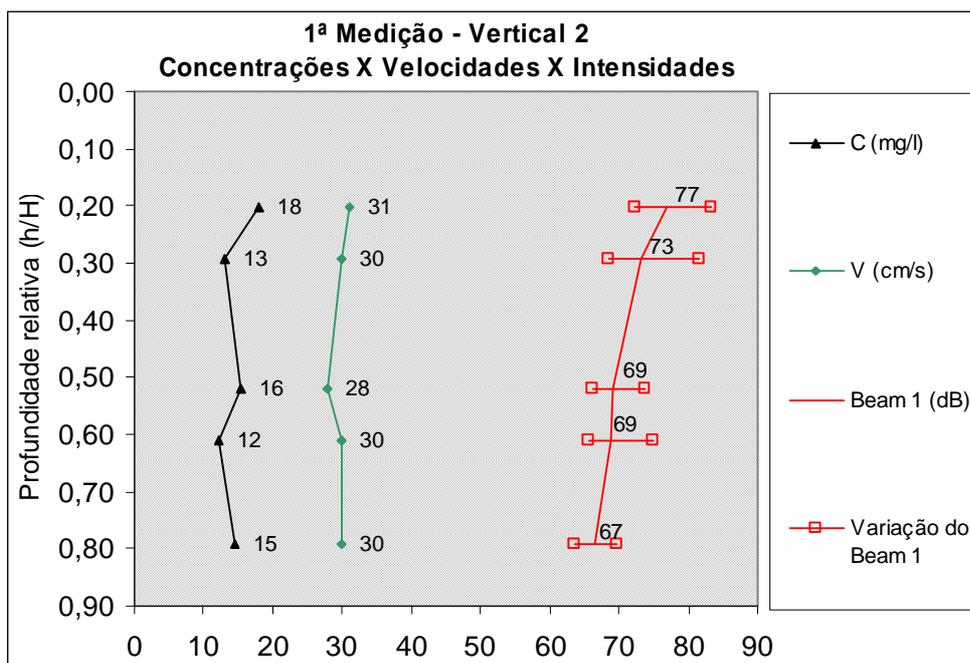


Figura 5.18 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 1 – *beam 1*

Na Figura 5.19 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V2 da primeira medição. A Tabela 5.21 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.21 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V2 – *beam 1*

Medição 1 Vertical 2 - Beam 1 - PV1,2(20%)							
r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	20%	100%	100%	40%	100%	80%	100%
2	40%	100%	100%	80%	100%	100%	100%
3	40%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.19 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que as estimativas mais ajustadas em relação às faixas de r , assim como para os cálculos realizados com o dB médio, foram obtidas pelo método de Gartner T, seguido pelos métodos de “C_{ss} X ABS”, M&P20 e M&P15.

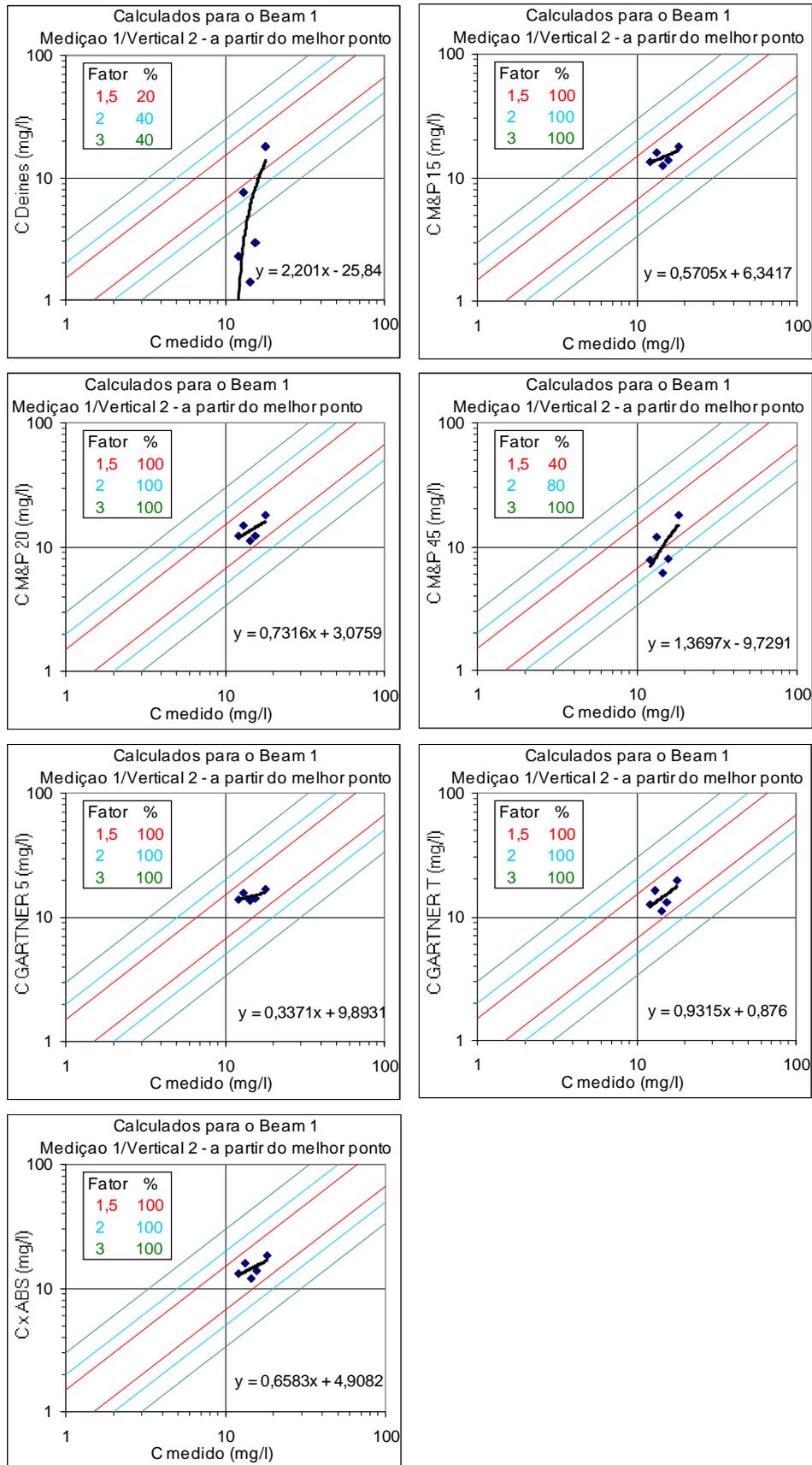


Figura 5.19 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 2) – beam 1

5.2.3 Estimativas – 1ª Medição/Vertical 3

Os perfis estimados pelos métodos testados para a vertical 3 da primeira medição obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)] são apresentados na Figura 5.20.

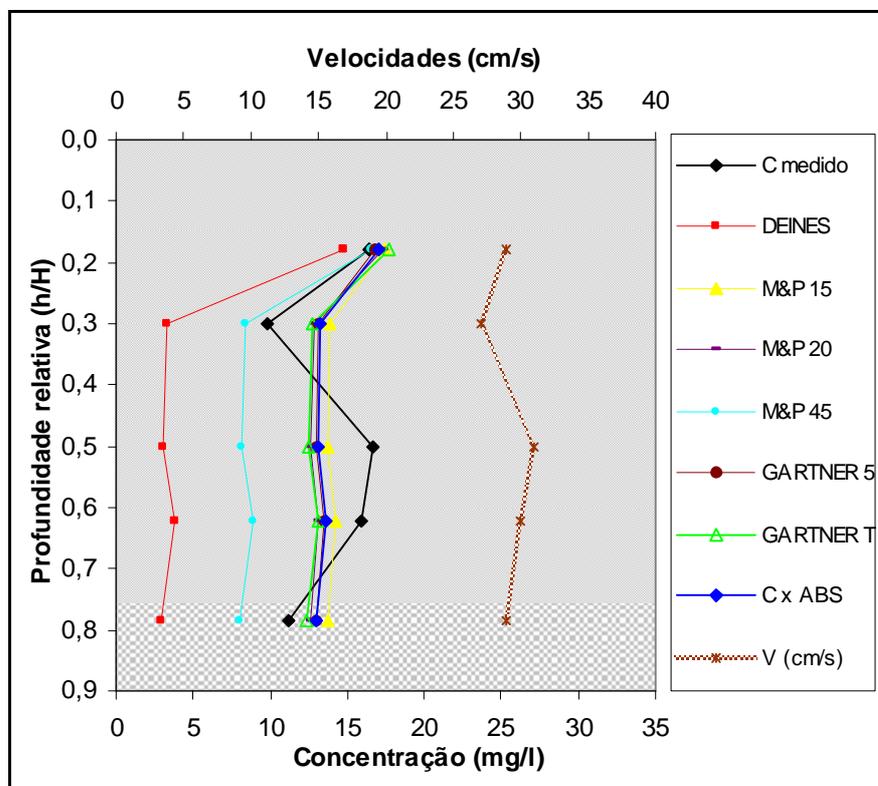


Figura 5.20 – Perfis de C_{ss} para V3 da medição 1 a partir do melhor NR – beam 1

Os valores das velocidades nesta vertical apresentaram pouca variação. A menor velocidade foi de 27 cm.s⁻¹, medida na posição a 30% da profundidade da vertical e o maior valor foi de 31 cm.s⁻¹, na metade do perfil. A forma do perfil das velocidades foi muito semelhante à variação do perfil das concentrações medidas, porém com amplitudes menores entre os valores de cada ponto. Os perfis das C_{ss} estimadas apresentaram-se praticamente constantes a partir do ponto a 30% da profundidade em direção ao fundo da vertical.

A Figura 5.21 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma semelhante à do perfil de C_{ss} estimado, iniciando com um valor maior próximo à superfície, 76,18 decibéis, e diminuindo para 69,63 decibéis no ponto a 30% da profundidade, mantendo-se praticamente constante até a posição a 80% da profundidade onde alcançou 69,61 decibéis. A maior variação entre os *backscatters* instantâneos ocorreu no ponto localizado a 60% da profundidade da vertical, chegando a 16,80 decibéis, diferente dos cálculos com o dB médio onde isso ocorreu no ponto a 20%.

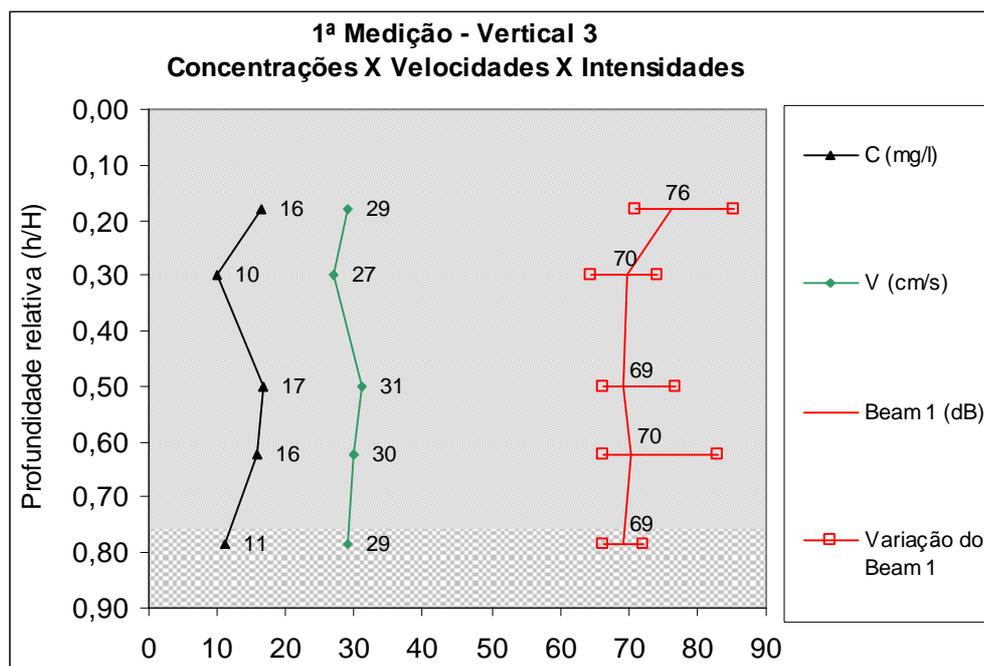


Figura 5.21 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 1 – *beam 1*

Na Figura 5.22 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V3 da primeira medição. A Tabela 5.22 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.22 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 1, V3 – *beam 1*

Medição 1 Vertical 3 - Beam 1 - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	20%	100%	100%	40%	100%	100%	100%
2	20%	100%	100%	80%	100%	100%	100%
3	40%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.22 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, observa-se que os valores de coeficiente angular dos métodos M&P15, M&P20, Gartner 5, Gartner T e “C_{ss} X ABS” apresentaram os valores mais próximos de zero, indicando não haver uma relação linear entre as estimativas destes métodos com as concentrações medidas. Embora o coeficiente angular obtido para o método de Deines tenha sido o maior desta vertical, mais próximo de 1, nenhum valor foi estimado dentro da faixa do fator r de 1,5 por este método, e apenas 20% dos pontos estimados ficaram dentro da faixa de variação do fator $r = 3$.

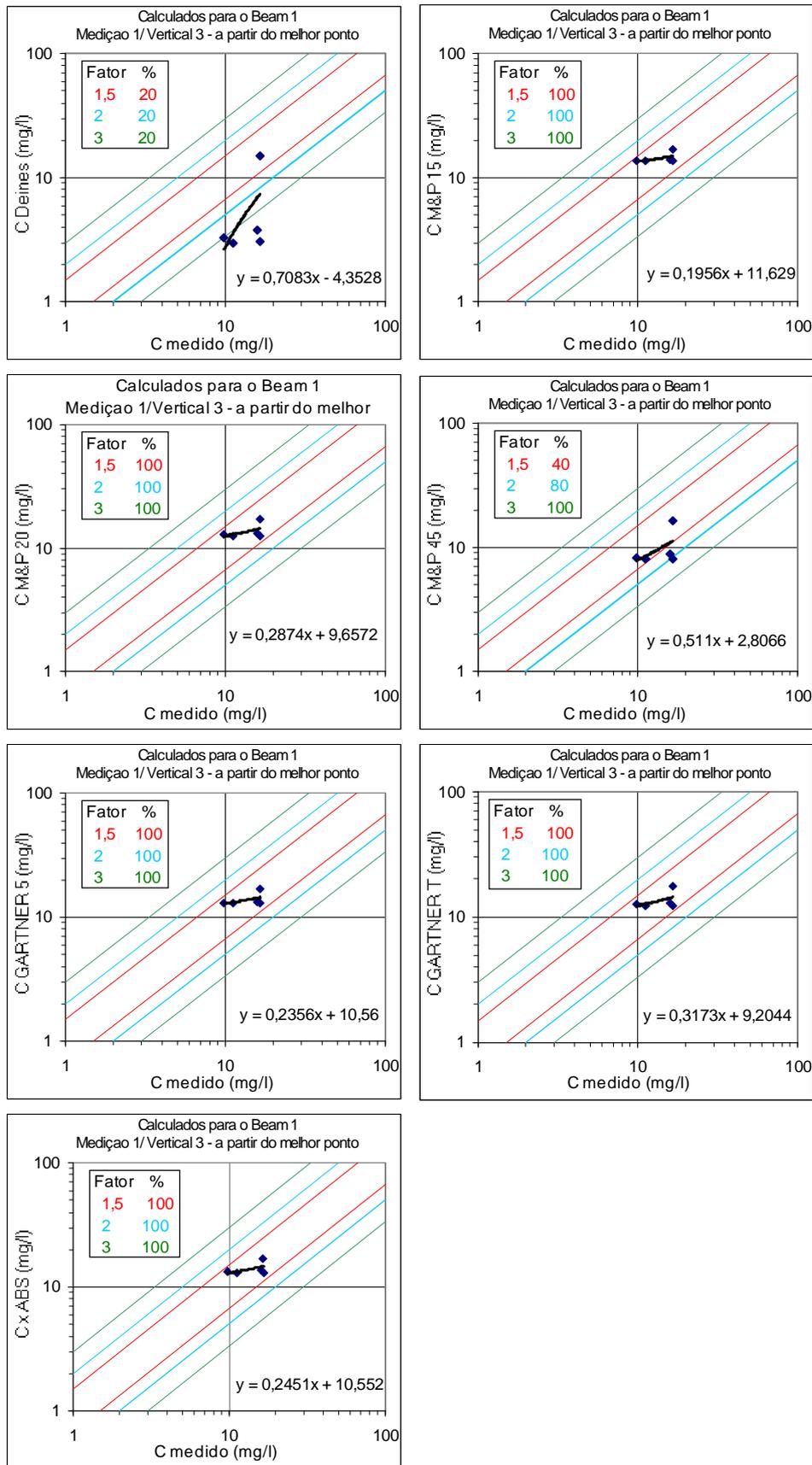


Figura 5.22 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 1 – vertical 3) – beam 1

5.2.4 Estimativas – 2º Medição/Vertical 1

Na Figura 5.23 são apresentados os perfis de C_{ss} estimados pelos métodos para a vertical 1 da segunda medição, obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)].

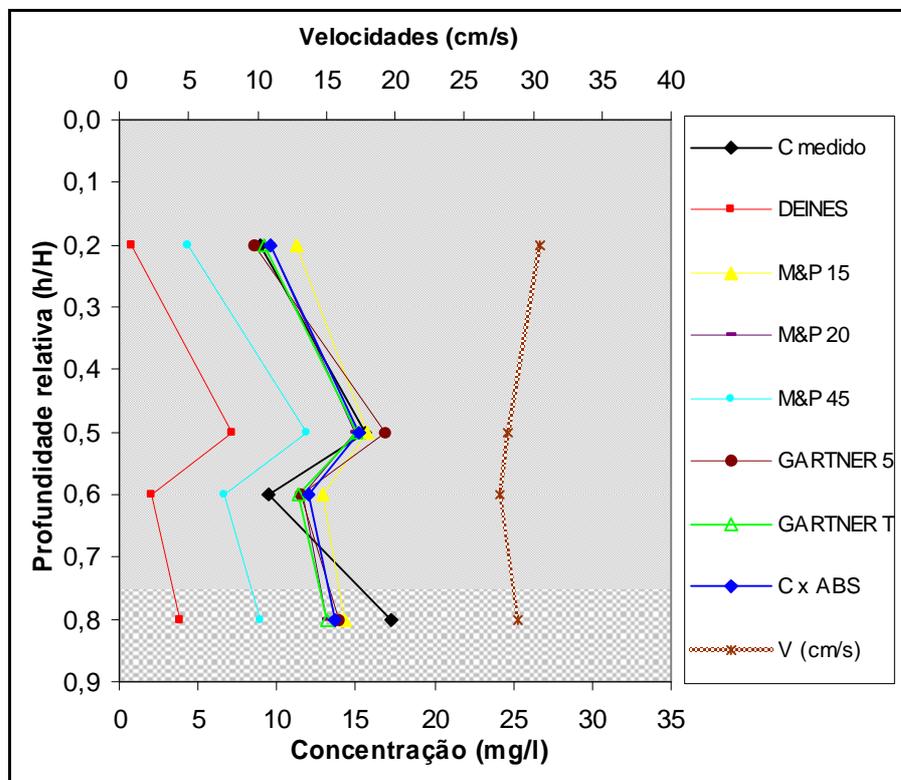


Figura 5.23 – Perfis de C_{ss} para V1 da medição 2 a partir do melhor NR – beam 1

As velocidades nesta vertical praticamente não apresentaram variação. A diferença entre o maior valor, 31 cm.s^{-1} , medido na posição a 20% da profundidade e a menor velocidade, 28 cm.s^{-1} , verificada nas posições a 50% e 60% da profundidade, foi de 3 cm.s^{-1} . A forma do perfil das velocidades mostra alguma semelhança com o perfil das concentrações medido apenas da metade da vertical para baixo. Da metade da vertical para cima, o perfil das concentrações apresenta valores menores, enquanto que, no perfil das velocidades os valores aumentam. Esta relação também se verifica para os perfis das C_{ss} estimadas.

A Figura 5.24 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma semelhante à do perfil das estimativas de C_{ss}, inclusive na ordem de grandeza da amplitude das diferenças entre os valores de cada ponto. A maior variação entre os *backscatters* instantâneos chegou a 15,18 decibéis e ocorreu no ponto a 20% da profundidade, diferente dos resultados para os cálculos como dB médio.

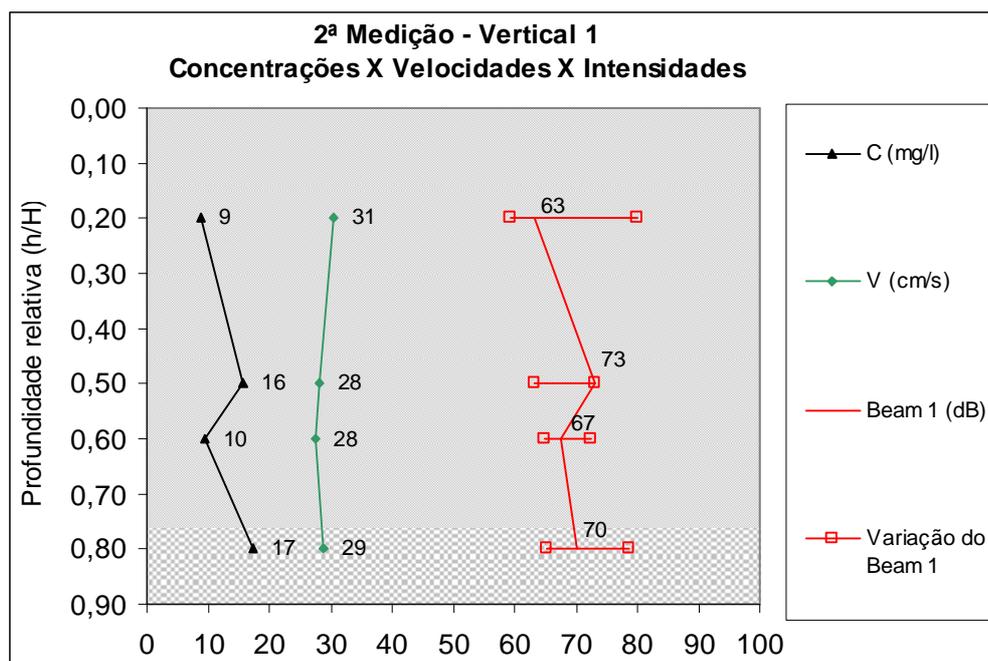


Figura 5.24 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V1 da medição 2 – beam 1

Na Figura 5.25 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V1 da segunda medição. A Tabela 5.23 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.23 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V1 – beam 1

Medição 2 Vertical 1 - Beam 1 - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	0%	100%	100%	25%	100%	100%	100%
2	0%	100%	100%	75%	100%	100%	100%
3	25%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.25 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, observa-se que os valores dos coeficientes angular de todos os métodos utilizados apresentaram valores mais próximos da unidade do que os obtidos nesta mesma vertical para a os cálculos realizados com o dB médio, embora o método de Deines tenha estimado apenas 25% dos valores dentro da faixa do fator r igual a 3 e o método M&P45 só conseguiu estimar todo o perfil dentro da faixa do fator r igual a 3.

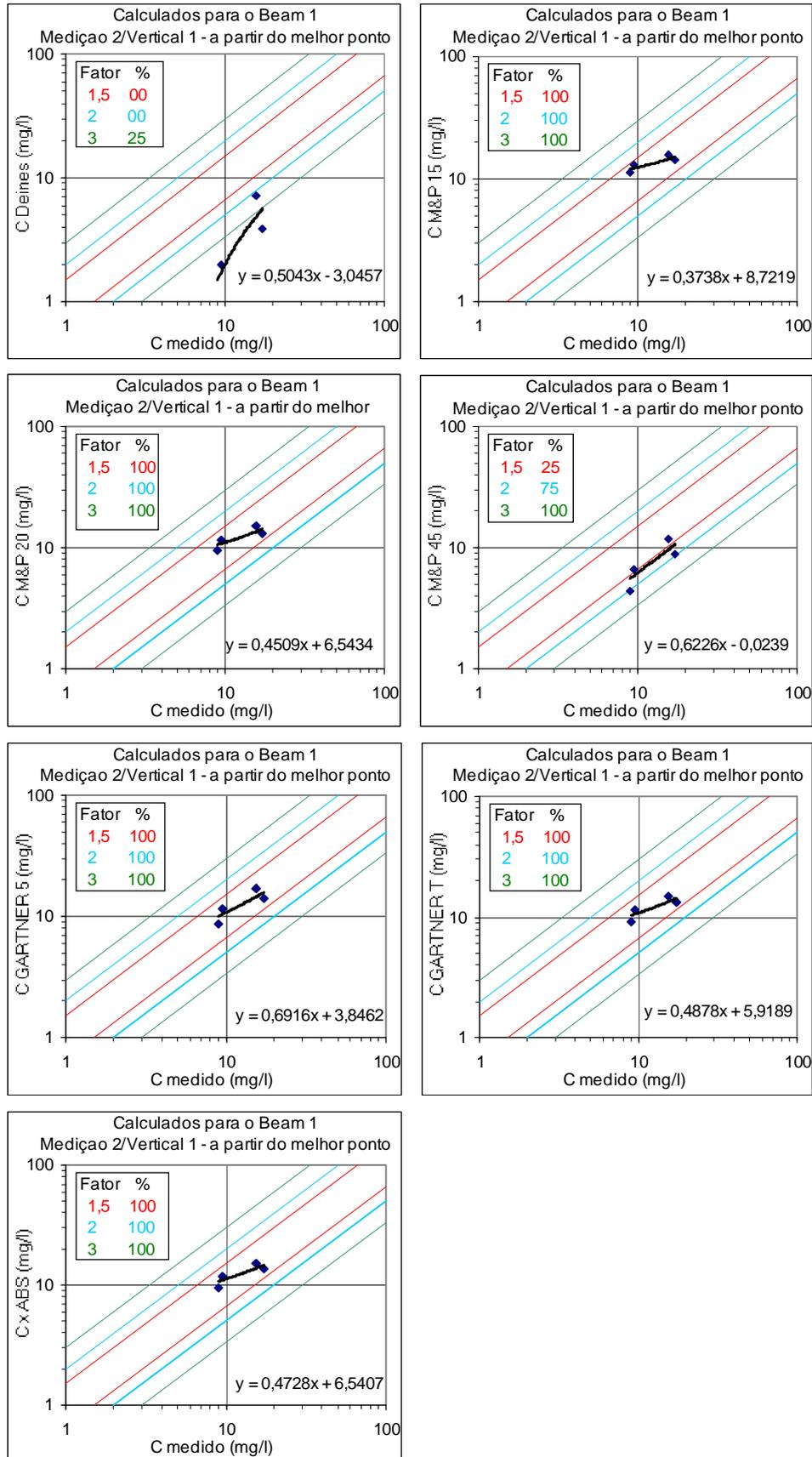


Figura 5.25 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 1) – beam 1

5.2.5 Estimativas – 2º Medição/Vertical 2

Os perfis estimados pelos diversos métodos para a vertical 2 da segunda medição, obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)] estão apresentados na Figura 5.26.

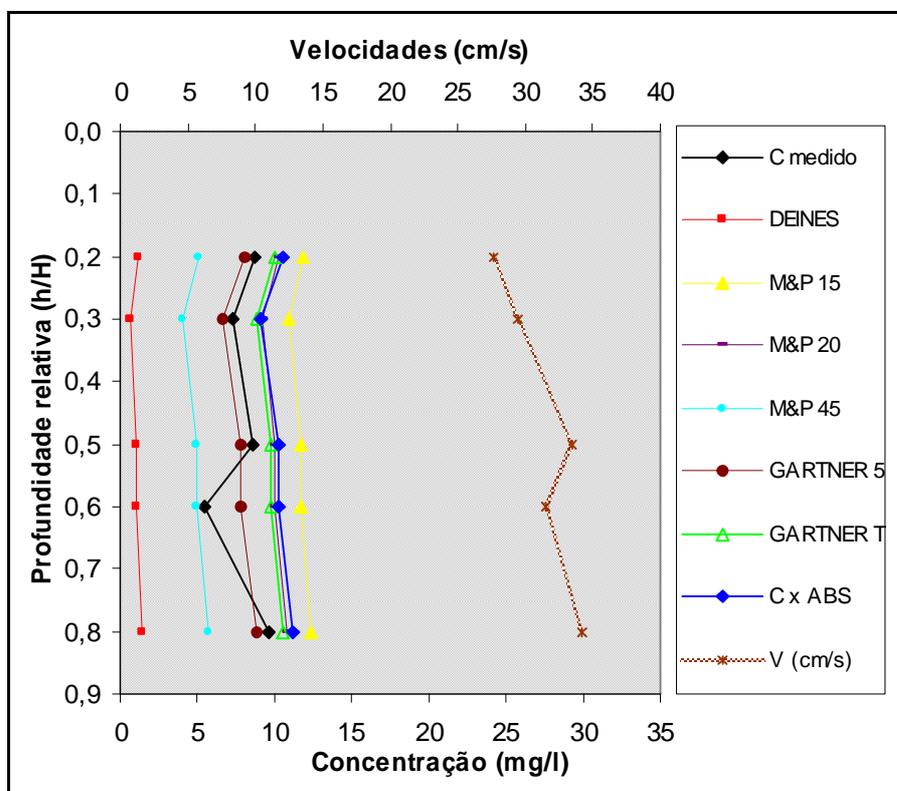


Figura 5.26 – Perfis de C_{ss} para V2 da medição 2 a partir do melhor NR – beam 1

Nesta vertical, os valores do perfil das velocidades aumentaram diretamente com a profundidade, iniciando em 28 cm.s⁻¹, próximo da superfície, e chegando no ponto a 80% da profundidade com 34 cm.s⁻¹. A variação do perfil das concentrações medidas não acompanhou a variação do perfil de velocidades apenas no ponto mais próximo da superfície. Os perfis de todos os métodos de estimativa das C_{ss} apresentaram valores praticamente constantes.

A Figura 5.27 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou valores praticamente constantes. O maior valor foi de 66,06 decibéis no ponto a 80% da profundidade da vertical e o menor foi 62,57 decibéis na posição a 30% da profundidade. O ponto localizado na posição a 80% da profundidade foi onde ocorreu a maior variação entre os *backscatters* instantâneos. A diferença entre os valores observados durante todo o tempo de amostragem neste ponto chegou a 30,30 decibéis.

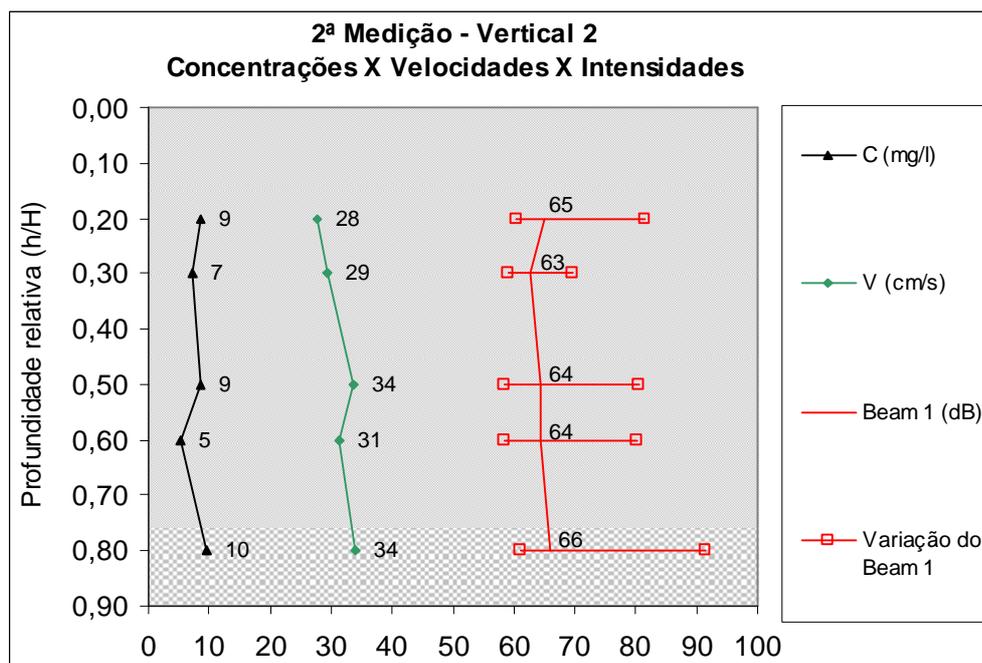


Figura 5.27 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V2 da medição 2 – beam 1

Na Figura 5.28 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V2 da segunda medição. A Tabela 5.24 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.24 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V2 – beam 1

Medição 2 Vertical 2 - Beam 1 - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	0%	60%	80%	20%	100%	80%	80%
2	0%	80%	100%	100%	100%	100%	100%
3	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.28 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que, mesmo que o método de Gartner 5 tenha sido o único a estimar 100% dos pontos dentro da faixa do fator r de 1,5, o seu coeficiente angular, assim como o dos demais métodos, também foi um valor muito baixo. Isso indica que a equação ajustada não acompanha a inclinação das faixas do fator r . Do mesmo modo que para o dB médio, nenhum valor foi estimado pelo método de Deines, nem mesmo dentro da faixa de r igual a 3.

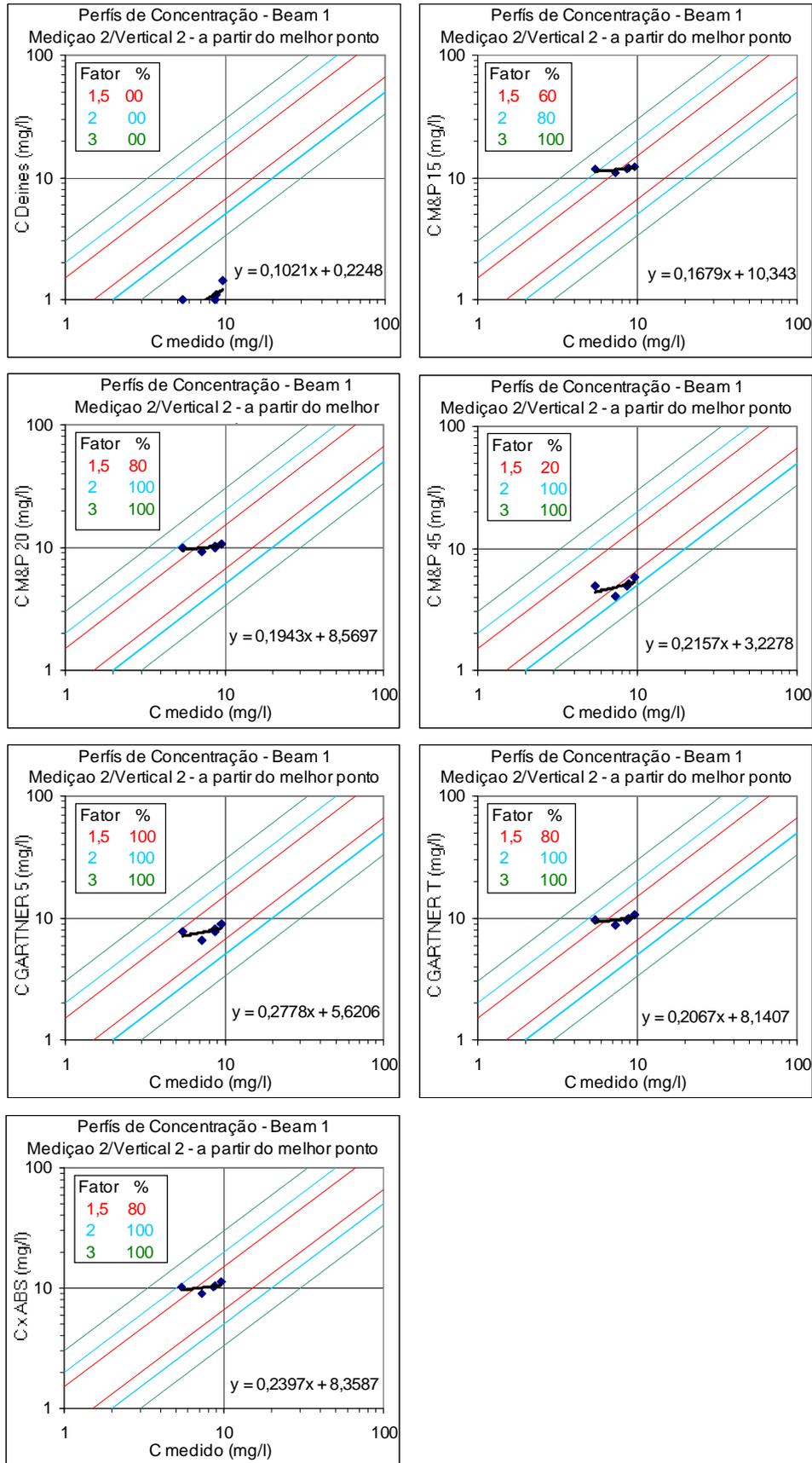


Figura 5.28 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 2) – beam 1

5.2.6 Estimativas – 2º Medição/Vertical 3

Na Figura 5.29, são apresentados os perfis estimados pelos diversos métodos para a vertical 3 da segunda medição obtidos com o melhor nível de referência [PV1,2(20%)].

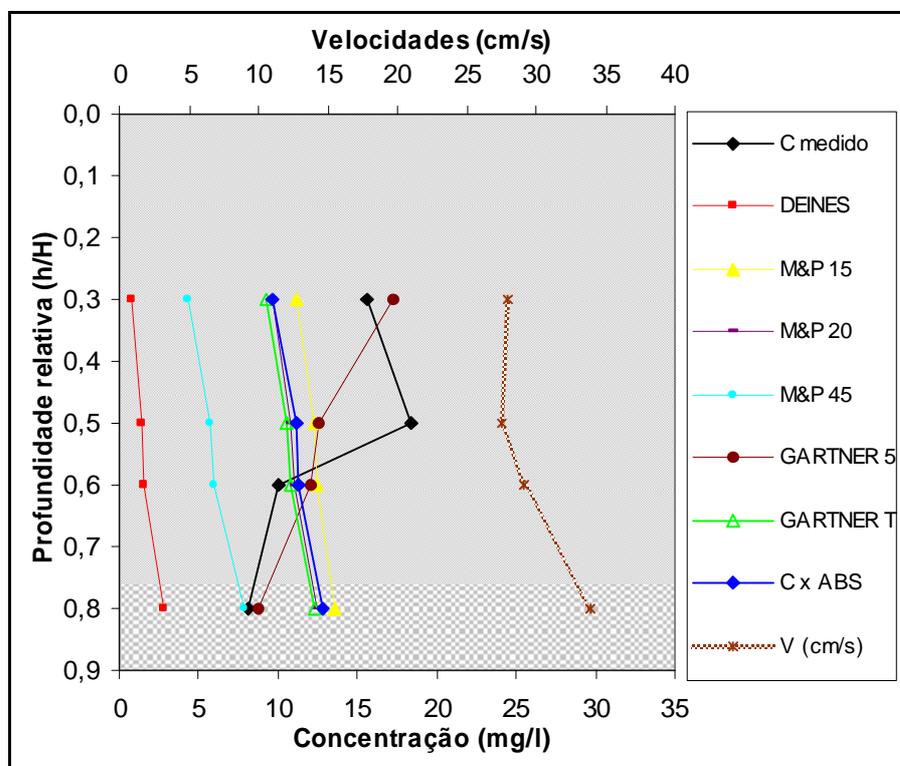


Figura 5.29 – Perfis de C_{ss} para V3 da medição 2 a partir do melhor NR – beam 1

As velocidades nesta vertical aumentaram conforme o aumento da profundidade. A diferença entre o maior valor, 34 cm.s^{-1} , medida na posição a 80% da profundidade e a menor velocidade, 28 cm.s^{-1} , verificada nas posições a 30% e 50% da profundidade, foi de 6 cm.s^{-1} . A forma do perfil das velocidades é inversa à forma do perfil das concentrações medidas. Nos pontos com as maiores concentrações, foram verificadas as menores velocidades e, no ponto próximo ao fundo, com a maior velocidade, obteve-se o menor valor de concentração. Com exceção do método Gartner 5, que apresentou a mesma tendência de crescimento que os valores medidos, os perfis das estimativas de C_{ss} foram praticamente constantes.

A Figura 5.30 apresenta as variações observadas dos valores das concentrações medidas, das velocidades em cada ponto e dos *backscatters* ao longo do perfil. O perfil dos valores de *backscatters* apresentou uma forma mais semelhante à do perfil das velocidades do que com o perfil das concentrações medidas. A variação dos *backscatters* instantâneos, em todos os pontos desta vertical, esteve perto do valor máximo de 24,60 decibéis, observado a 60% da profundidade da vertical.

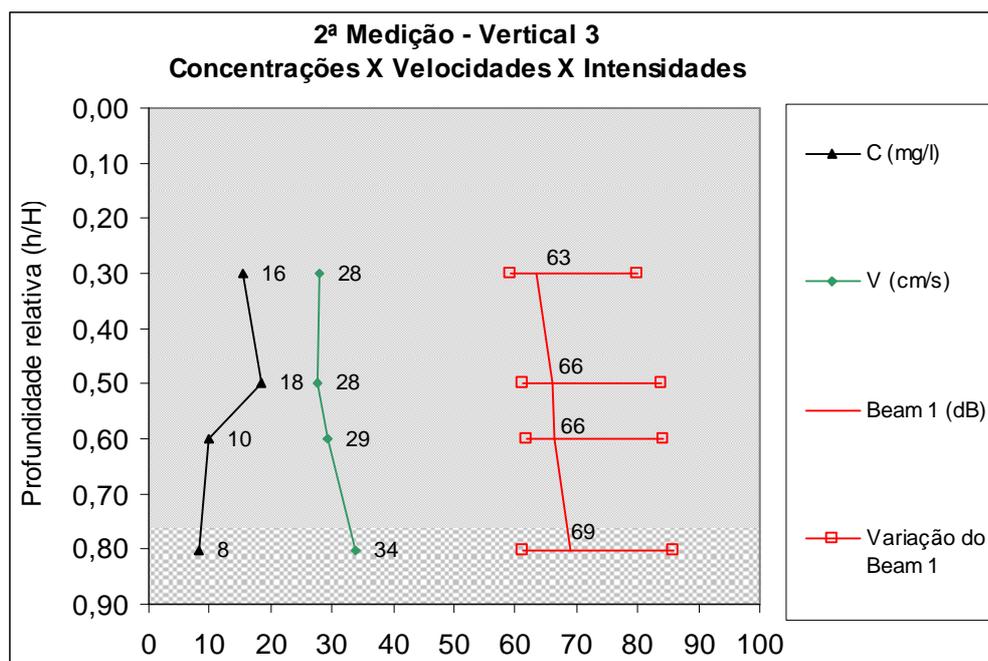


Figura 5.30 – Perfis de C_{ss} medidos, velocidades e ABS da V3 da medição 2 – dB médio

Na Figura 5.31 estão indicadas as porcentagens de estimativas resultantes dentro dos fatores de discrepâncias e as equações de correlações ajustadas para cada um dos perfis estimados para a vertical V3 da segunda medição. A Tabela 5.25 compara as porcentagens encontradas dentro de cada faixa do fator r de todos os métodos. Nesta tabela, os valores destacados indicam que o método estimou pelo menos 70% dos pontos da vertical dentro da respectiva faixa de variação do fator r .

Tabela 5.25 – Porcentagem de valores nas faixas do fator r , medição 2, V3 – *beam 1*

Medição 2 Vertical 3 - Beam 1 - PV1,2(20%)							
Fator r	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CxABS
1,5	0%	25%	25%	25%	75%	25%	25%
2	0%	100%	100%	50%	100%	100%	100%
3	25%	100%	100%	50%	100%	100%	100%

As equações apresentadas na Figura 5.31 indicam a disposição dos valores estimados por cada método, em relação às faixas dos fatores de discrepância, que têm inclinações de 45°. Deste modo, avaliando-se os valores dos coeficientes angular e linear das equações percebe-se que apenas o método de Gartner 5 estimou mais do que 25% dos valores de C_{ss} dentro da faixa do fator r de 1,5. Com exceção do método de Gartner 5, os coeficientes angulares de todos os métodos foram muito próximos de zero, indicando que para esta vertical as equações ajustadas pelos demais métodos não acompanham a inclinação das faixas do fator r , caracterizando a vertical V3 como a pior vertical estimada pelos métodos testados.

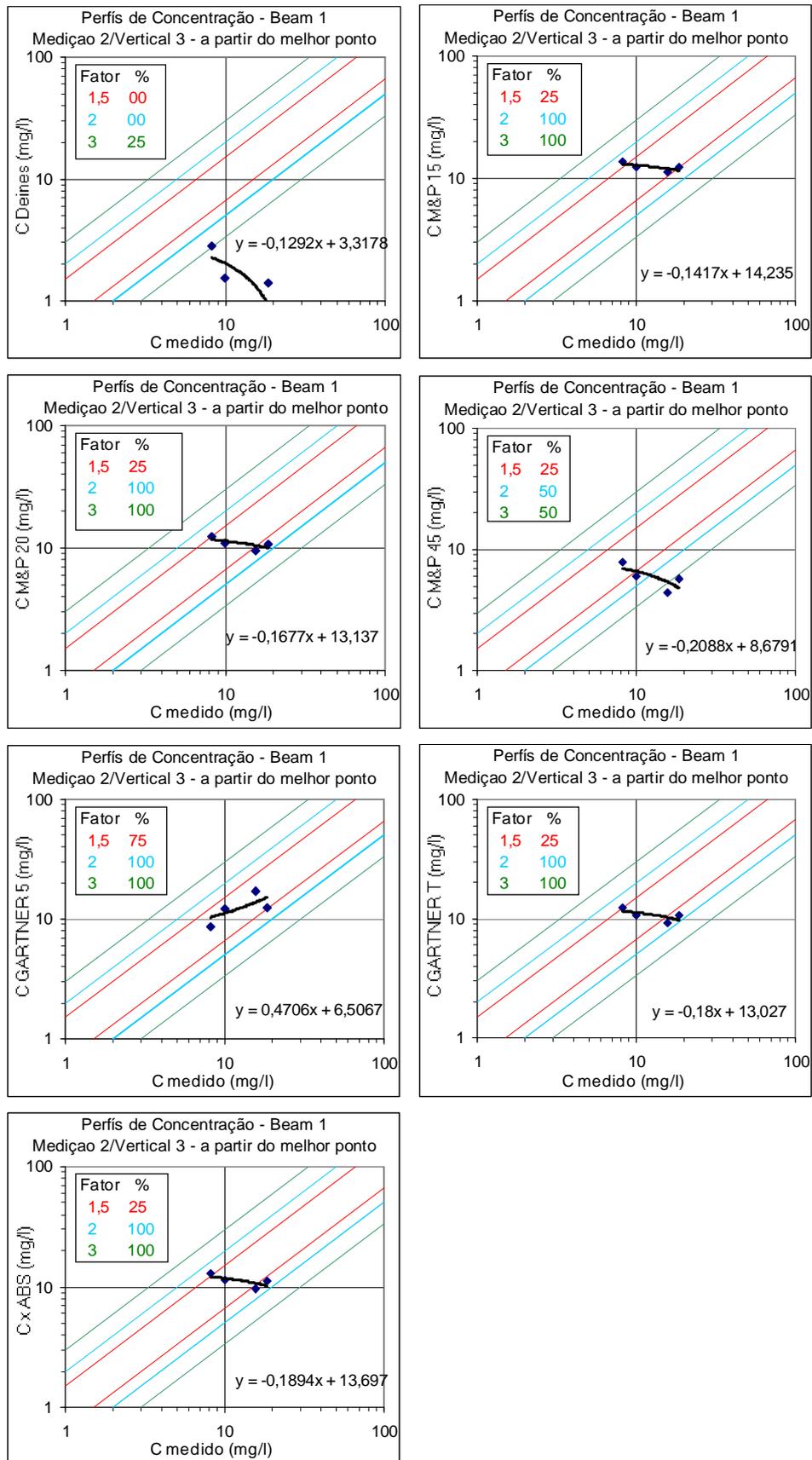


Figura 5.31 – Faixas de r e % dos valores em cada faixa (Medição 2 – vertical 3) – beam 1

5.2.7 Relações do método “Css x ABS” para o Beam 1

A Figura 5.32 apresenta as relações obtidas para o método “Css x ABS” para os calculados com os dados do *beam* 1. Neste caso, os valores das intensidades (ABS) medidos na primeira medição se aproximaram mais dos valores da primeira medição em comparação com o observado para os cálculos com o dB médio.

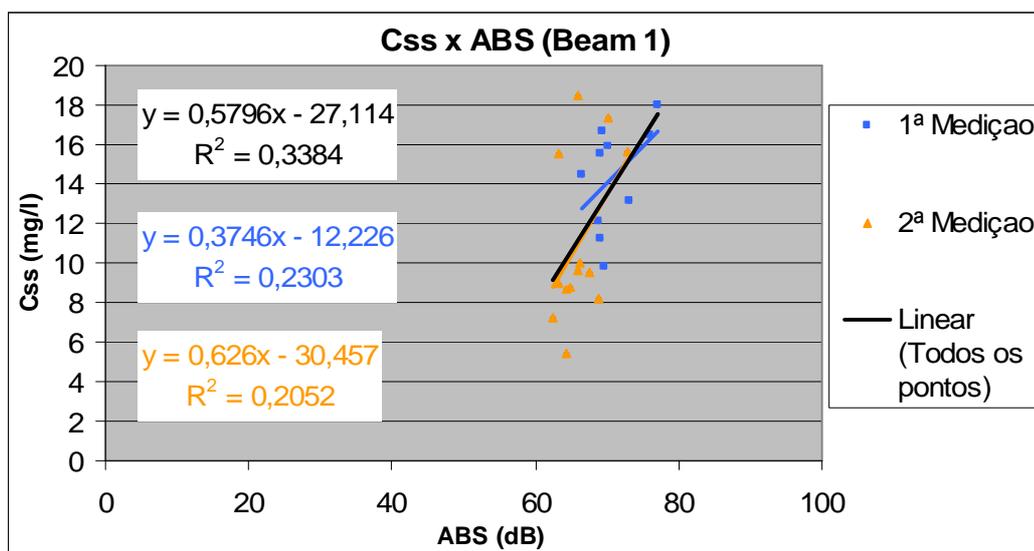


Figura 5.32 – Relações do método “Css x ABS” para os dados das duas medições – *Beam* 1

5.2.8 Resumo dos resultados para o Beam 1

A análise dos resultados com os dados do *beam* 1 permitiu identificar que o método de Deines também foi o que apresentou as piores estimativas das concentrações. Em quase todas as verticais os valores estimados foram menores do que os medidos, ou seja, subestimados. O melhor desempenho deste método, foi na vertical V2 da primeira medição, apenas 20% do perfil ficou dentro do fator r de 1,5 e 20% do perfil dentro do fator r igual a 2. Na vertical V2 da segunda medição, o método de Deines apresentou a pior estimativa, onde nenhum ponto ficou dentro do fator r igual a 3.

O segundo pior método, da mesma forma que nos cálculos com o dB médio, foi o método M&P45, correspondente ao KM de 0,45. O seu desempenho ao longo das verticais foi semelhante ao de Deines, subestimando quase todos os pontos estimados. Porém, nas verticais V2 e V3 da primeira medição, obteve 40% do perfil dentro da faixa de r igual a 1,5 e 80% dos pontos dentro do fator r igual a 2. Na vertical V3 da segunda medição, o método M&P45 apresentou a pior estimativa, onde apenas 25% dos valores ficaram dentro da faixa de r igual a 1,5 e 50% dos pontos ficaram dentro dos limites de r igual a 2.

Para os cálculos com o *beam* 1, os métodos M&P15 e M&P20 apresentaram praticamente o mesmo desempenho. A diferença entre estes dois métodos foi apenas na vertical V2 da segunda medição, onde o método M&P15 estimou apenas 60% do perfil dentro do fator r de 1,5 enquanto o método M&P20 obteve 80% dos pontos dentro deste fator de r .

O método “Css x ABS” apresentou exatamente o mesmo desempenho do método M&P20, com 100% dos pontos estimados dentro da faixa de r igual a 1,5 em três verticais, 80% em uma vertical, e ambas obtiveram apenas 25% dos pontos dentro deste r na vertical V3 da segunda medição. Nesta vertical, o método Gartner T também obteve este mesmo desempenho (25%), diferindo dos métodos M&P20 e “Css x ABS” apenas na vertical V2 da primeira medição, onde estimou 80% do perfil dentro do fator r igual a 1,5 e não 100%.

Também para os cálculos realizados com o *beam* 1, o melhor método foi o Gartner 5. Em quatro verticais, este método estimou todo o perfil dentro da faixa de r igual a 1,5. Apenas na vertical V3 da segunda medição, o método estimou 75% dos pontos dentro desta faixa do fator r . As tabelas 5.26 e 5.27 apresentam o percentual do número de vezes, para o *beam* 1, que cada método estimou dentro da faixa de r igual a 1,5, para cada vertical. Em destaque, estão os percentuais estimados superiores a 70%, e igual a 100% do perfil respectivamente.

Tabela 5.26 – Porcentagem de estimativas maiores que 70% em $r = 1,5$ para o *Beam* 1

Beam 1		Mais de 70% do perfil dentro de $r = 1,5$							
Medição	Vertical	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CssxABS	Total de ocorrências
1	2	20%	100%	100%	40%	100%	80%	100%	5
1	3	20%	100%	100%	40%	100%	100%	100%	5
2	1	0%	100%	100%	25%	100%	100%	100%	5
2	2	0%	60%	80%	20%	100%	80%	80%	4
2	3	0%	25%	25%	25%	75%	25%	25%	1
> 70%		0	3	4	0	5	4	4	
%		0	60	80	0	100	80	80	

Tabela 5.27 – Porcentagem de estimativas iguais a 100% em $r = 1,5$ para o *Beam* 1

Beam 1		100% do perfil dentro de $r = 1,5$							
Medição	Vertical	Deines	M&P15	M&P20	M&P45	Gartner 5	Gartner T	CssxABS	Total de ocorrências
1	2	20%	100%	100%	40%	100%	80%	100%	4
1	3	20%	100%	100%	40%	100%	100%	100%	5
2	1	0%	100%	100%	25%	100%	100%	100%	5
2	2	0%	60%	80%	20%	100%	80%	80%	1
2	3	0%	25%	25%	25%	75%	25%	25%	0
= 100%		0	3	3	0	4	2	3	
%		0	60	60	0	80	40	60	

5.3 Resultados Gerais

Nas Figuras 5.16 e 5.32, relativas aos cálculos com o dB médio e com o *beam 1*, respectivamente, são apresentadas as relações obtidas pelo método “Css x ABS”, para os dados medidos, na primeira e segunda medição, separadamente, resultantes de dois conjuntos de pontos distintos, um para cada medição. Cada uma dessas figuras apresenta também uma única relação considerando todo o conjunto de dados formado pelas duas medições. Observe-se que as relações construídas com o *beam 1* são mais parecidas e estão mais próximas entre si do que as obtidas com o dB médio. Isso resultou em um melhor desempenho deste método para as estimativas calculadas apenas com as informações acústicas do *beam 1*.

Para os cálculos com o dB médio, os métodos que utilizaram alguma forma de regressão entre os dados (Gartner 5, Gartner T e “Css x ABS”) obtiveram os melhores resultados. Destes, Gartner T e “Css x ABS” que utilizam todos os dados medidos, obtiveram um desempenho muito semelhante. O melhor método foi o Gartner 5 que utilizou apenas os dados das próprias verticais. Também para o *beam 1*, o método Gartner 5 foi o melhor. Porém, o desempenho das estimativas feitas pelos métodos M&P15, M&P20, Gartner T e “Css x ABS” foi bastante semelhante e próximo do desempenho do melhor método. Em ambos os casos, dB médio e *beam 1*, todos os métodos estimaram consideravelmente melhor os valores das concentrações do que o método de Deines. Embora o método M&P45 também tenha melhorado as estimativas do método de Deines, os resultados não confirmaram a recomendação feita por Lu (2003) para a utilização do coeficiente KM igual a 0,45, pois os valores de 0,15 e 0,20 para este coeficiente obtiveram resultados melhores.

A pior vertical tanto para os cálculos com o dB médio como para o *beam 1*, foi a V3 da segunda medição. Considerando o dB médio, para os métodos que utilizam o coeficiente KM e os métodos que utilizam alguma regressão, os melhores resultados foram de apenas 50% dos pontos estimados dentro do fator r igual a 1,5, mesmo para o método Gartner 5 que utilizou somente os valores deste vertical para construir a sua relação. Em relação aos cálculos com o *beam 1*, somente o Gartner 5 conseguiu obter 75% dos pontos dentro da faixa de r igual a 1,5. Todos os outros métodos obtiveram apenas 25% do perfil dentro desta faixa do fator r .

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A possibilidade de desenvolvimento de uma tecnologia que execute a medição da vazão do rio e ao mesmo tempo permita a realização de uma estimativa da concentração dos sedimentos transportados em suspensão merece ser melhor estudada. Assim, considerando os objetivos deste estudo e a pequena faixa de variação de concentrações trabalhada, verificou-se que é possível a utilização dos equipamentos acústicos por Efeito Doppler para a estimativa da concentração de sedimentos suspensos, mais especificamente em relação à aplicação dos métodos empíricos testados.

Seguindo a metodologia desenvolvida, depois de realizadas e analisadas as estimativas de todas as verticais, de ambas as medições, foi possível identificar a existência de um ponto como nível de referência (NR) para esta seção de medição, determinando-se a vertical e a profundidade desse ponto. O NR determinado para a seção foi o ponto localizado a 20% da profundidade da vertical V2, com os dados obtidos na primeira medição.

Em praticamente todos os perfis estimados os coeficientes testados melhoraram as estimativas das concentrações calculadas pelo método de Deines que se mostrou bastante sensível aos incrementos de intensidade do eco ($E_{ci} - E_{cr}$), ou seja, pequenas variações na intensidade do eco conduziram a variações um pouco exageradas nas estimativas.

Os valores do coeficiente KM testados mostraram bastante variação nos resultados obtidos. No melhor ponto da seção, a variação da melhora nos resultados foi inversa ao aumento do valor do coeficiente KM. O coeficiente que obteve os melhores resultados, tanto para os cálculos com o dB médio como para o *beam* 1, foram os valores de 0,15 e 0,20, diferentemente do esperado e recomendado por Lu (2003), entre 0,35 e 0,55.

O método que melhor estimou os valores em todos os pontos de todas as verticais, tanto para o dB médio como para o *beam* 1, foi o Gartner 5, provavelmente porque este utiliza uma relação construída apenas com as informações dos próprios pontos de cada uma das verticais.

Os métodos Gartner T e “Css x ABS” tiveram praticamente o mesmo desempenho, quase tão bons quanto o método Gartner 5, nas estimativas dos valores tanto para o dB médio quanto o *beam* 1. Isso porque os dois utilizam todo o conjunto de dados, de todas as verticais medidas, para a construção das suas equações.

Entre os métodos que utilizam o coeficiente KM, o método M&P45 melhorou em todos os pontos, de todas as verticais, as estimativas realizadas pelo método de Deines. Porém, comparando-o com os outros métodos, foi o que teve o pior desempenho.

Já os métodos M&P15 e M&P20 que consideram os coeficientes KM respectivamente iguais a 0,15 e 0,20, melhoraram consideravelmente as estimativas do método M&P45, obtendo resultados quase tão bons quanto os métodos Gartner T e Css x ABS.

Os valores das intensidades (ABS) do *beam* 1 foram maiores do que a média dos quatro *beams* (dB médio) apenas em dois pontos. Nestes pontos, o maior valor não chegou a dois decibéis. Nos outros pontos, a diferença máxima dos valores foi de 3,6 decibéis e a média das diferenças foi de 2,3 decibéis. Essa pequena variação nos valores fez com que os resultados dos cálculos realizados com o dB médio e o *beam* 1 não fossem muito diferentes. Um fator que pode ter contribuído para que os resultados com o *beam* 1 e com o dB médio não tenham sido muito diferentes, é que o valor utilizado em cada um dos pontos, tanto para o dB médio quanto para o *beam* 1, representa a média dos *backscatters* obtidos durante o tempo necessário para a realização da amostragem naquele ponto.

O maior valor de concentração medido foi de 18,43 mg.l⁻¹, na posição a 50% da profundidade da vertical V3, durante a segunda medição. Neste ponto todos os métodos obtiveram as suas maiores diferenças entre o valor estimado e o medido, subestimando os resultados. A velocidade medida neste ponto durante a amostragem foi praticamente a mesma dos pontos a 30% e 60% da profundidade. Desta forma, o que pode ter contribuído para a grande diferença do valor estimado por todos os métodos neste ponto, é a grande variação dos valores de *backscatters* observados durante a medição, que chegou a 30,30 decibéis.

As relações obtidas pelo método “Css x ABS” para os dados medidos, na primeira e segunda medição separadamente, resultaram em conjuntos de pontos distintos para ambas as medições, tanto para os cálculos com o dB médio quanto para o *beam* 1, indicando que a

correlação entre concentração de sedimentos e intensidade do eco deve ser calibrada com dados coletados no local e na época de cada medição.

As estimativas calculadas são resultados de uma situação bastante homogênea em relação à concentração. As concentrações dos sedimentos em suspensão medidas foram muito baixas, menores que 20 mg.l^{-1} . Os valores das concentrações medidas mostraram pouca variação em cada vertical, principalmente na vertical que apresentou os melhores resultados, correspondente à vertical V2 de ambas as medições. Na primeira medição, a amplitude foi de $5,9 \text{ mg.l}^{-1}$ e na segunda, apenas $4,2 \text{ mg.l}^{-1}$. Medições em verticais com uma maior amplitude na variação dos valores de concentração de sedimentos ou com valores maiores, como os verificados em ondas de cheia, permitiriam uma análise melhor dos métodos de conversão propostos, pois nessas situações, a parcela de maior importância da carga de sedimentos em suspensão é transportada pelo escoamento entre a meia profundidade e o leito do rio. Portanto, nesse caso, para que se obtenham resultados mais precisos do transporte de sedimentos é provável que o melhor nível de referência esteja em uma posição intermediária neste trecho da vertical, diferentemente do ponto encontrado neste trabalho.

Como neste trabalho não foi determinada a granulometria das amostras, não foi possível definir o tipo de material transportado em suspensão durante as medições. Para a frequência do ADCP utilizado, o pico de sensibilidade dos sedimentos é obtido para diâmetros na ordem de $0,4 \text{ mm}$, o que corresponde a uma classificação da fração areia. Assim é provável que as medições não tenham sido realizadas próximas do pico de sensibilidade das partículas, pois pelas baixas velocidades observadas, o tipo de material mais comum de ser transportado em suspensão corresponde às frações silte e argila. Neste caso, o número de onda deveria ser bem mais baixo, correspondente a frequências na casa de dezenas de MHz, porém isso implicaria em um alcance acústico muito baixo, inviabilizando a utilização desses equipamentos para medição de perfis mais profundos.

6.2 Recomendações

Durante a realização deste trabalho foram observados alguns aspectos importantes, tanto de ordem prática como técnica, que podem ajudar a qualificar ainda mais os estudos relacionando a concentração de sedimentos em suspensão e as informações acústicas de um ADCP.

A relação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão é bastante dependente do tamanho das partículas, nesse sentido sugere-se:

- com o objetivo de melhor caracterizar a relação entre o sinal acústico retornado ao equipamento e as partículas presentes na água, coletar amostras para determinação da granulometria dos sedimentos suspensos. O conhecimento da variação da granulometria do material ao longo da vertical pode esclarecer as causas das variações das intensidades obtidas ao longo do perfil;
- o uso de equipamentos acústicos de multi-frequência, visto que os equipamentos de frequência única não são capazes de diferenciar as variações nas informações de intensidade obtidas de uma mudança na concentração ou de uma mudança no tamanho das partículas;
- a utilização de um amostrador que consiga realizar a amostragem de forma instantânea, permitindo uma correlação com apenas um valor de *backscatter* instantâneo, representando melhor as condições do rio durante a amostragem;
- que sejam realizadas mais medições para que se tenha uma quantidade maior de dados e em épocas diferentes, contemplando as variações sazonais, em pelo menos uma vertical, com análise da granulometria.

Sobre as questões práticas de instalação e obtenção dos dados durante as medições, sugere-se ainda:

- a utilização de equipamentos ópticos, como turbidímetros, para referência, pois uma vez calibrados, permitem a obtenção de grande quantidade de dados com relativa facilidade em relação aos amostradores mecânicos;
- que os métodos empíricos utilizados neste trabalho sejam também verificados utilizando-se valores de *backscatters* absolutos, ou seja, retirando-se dos valores de *backscatter* relativo os ruídos provenientes de qualquer fonte que possa interferir nas medidas da intensidade acústica.
- cuidados na escolha da seção ou vertical no que se refere às velocidades da água, uma vez que o desempenho dos ADCPs depende da relação entre as velocidades da água e do deslocamento do equipamento.

Sugere-se ainda que outros métodos, como aqueles baseados no desenvolvimento teórico da equação do sonar (métodos implícito e explícito) continuem a ser pesquisados e desenvolvidos, pois apesar de todas as suas vantagens, os ADCPs não são ainda muito utilizados no Brasil, principalmente em trabalhos relacionados à concentração de sedimentos. Os poucos estudos já realizados neste sentido, assim como este, indicam a necessidade de um melhor entendimento sobre o funcionamento desta tecnologia e das relações construídas entre os dados hidro-acústicos e as informações dos sedimentos transportados pelos rios.

Poucas pesquisas ainda são realizadas no Brasil sobre hidrometria e sedimentometria, principalmente relacionadas a novas tecnologias e equipamentos. Um maior apoio dos órgãos gestores das redes fluviométricas e sedimentométricas poderia contribuir para que as entidades executoras dos serviços de hidrometria no Brasil pudessem também, além de executar as suas atividades, desenvolver estudos e pesquisas nesta área.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, Y. C.; POTTSMITH, H. C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport: *Marine Geology*, Amsterdam, No. 168, p. 89-114. 2000.
- ANA (Agência Nacional de Águas) Evolução da rede hidrometeorológica nacional. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. Vol. 1, No. 1, Brasília, 2007.
- BACHI, A. F.; BARBOZA E. G.; TOLDO JR, E. E. Estudo da sedimentação do Guaíba. **Revista Quadrimestral de Saneamento Ambiental**. No. 17 Ano 7. 2000.
- 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). **Dissertação de Mestrado**. Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (URFJ), 2005.
- BARREIRA, L. M. Observação de Correntes com ADCP embarcado. **Dissertação de Mestrado**. Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, 2004.
- BUBA, H. Qualidade da medição de vazão com ADCP: fatores influentes. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). CD-ROM, 1997.
- BYRNE, M. J.; PATIÑO, E. Feasibility of using acoustic and optical backscatter instruments for estimating total suspended solids concentrations in estuarine environments. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, Reno, NV, March 25-29, p. 1(3):135-138. 2001.
- CAETANO, G. T. Estudo da Adequação do Uso do Método Acústico Doppler para Medição de Vazão a Pequenos e Médios Cursos D'água. **Dissertação de Mestrado**. Engenharia da Energia. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.
- CARVALHO, M. S. Investigações sobre um perfilador acústico (ADCP) de faixa-larga. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COOPE, RJ, 1999.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS. 372 p., Rio de Janeiro, 1994.
- 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. 154 p., Brasília. 2000.
- CHEVALLIER, P. *Aquisição e Processamento de Dados*. In: TUCCI, C. E. M., **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. ABRH, Porto Alegre, 2ª edição, 1997.

COIADO, E. M., 2003. Produção, Transporte e Deposição de Sedimentos – Introdução In: Paiva, J. B. D. e Paiva, E. M. C. D., Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. ABRH, Porto Alegre, 2003.

DEINES, K. L. *Backscatter estimator using broadband Acoustic Doppler Current Profilers*. In: ANDERSON, S. P.; TERRY, E. A.; WHITE, J. A. R.; WILLIAM, A. J. Proceedings... Working Conference On Current Measurement, No. 6, p. 249-253. San Diego, 1999.

DOWNING, A.; THORNE, P. D.; VINCENT, C. E. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. **Journal of Acoustical Society of America**, No. 97 (3), p. 1614-1620, 1995.

DOWNING, J. P. Suspended sediment and turbidity measurements in streams: What they do and do not mean. Automatic Water Quality Monitoring Workshop, Richmond, B.C., February 12-13, 1996.

FEPAM. Departamento de Qualidade Ambiental. Qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Jacuí. Relatório sobre o monitoramento da qualidade da água na região hidrográfica do Guaíba. Disponível em http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp. Acessado em 30/07/2008. 2005.

FILIZOLA, N. P. Transfer sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Toulouse: **Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier**, 273 p., 2003.

FILIZOLA, N. P.; GUIMARÃES, V. S.; GUYOT, J. L. Medição de Vazão em Grandes Rios – Uso do Perfilador Doppler Acústico de Corrente. In: Freitas, M. A. V., **O Estado das Águas no Brasil**. MME, MMA/SRH, OMM p. 197-211. 1999.

FILIZOLA, N. P.; GUYOT, J. L. Balanço do Fluxo de Sedimentos em Suspensão da Bacia Amazônica. In: Workshop Geotecnologias Aplicadas às áreas de várzea da Amazônia – Ibama, Manaus, AM, 9 p., 2007.

FILIZOLA, N. P.; GUYOT, J. L. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. **Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques**, No. 49(1), 11p., 2004.

FILIZOLA, N. P.; GUYOT, J. L. Uso do sinal do ADCP e a determinação do fluxo de matéria em suspensão nos rios da Amazônia. VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, Vitória, ES, 4 p., 2004.

GAMARO, E. P. **II Curso de Medidores de Vazão Acústica Doppler – Apostila módulo Básico**. Agência Nacional de Águas – ANA. Foz do Iguaçu, Paraná. 110 p., 2006.

GARTNER, J. W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California: **Marine Geology**, Vol. 211, p.169–187, 2004.

GARTNER, J. W. Estimation of suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background. In: Turbidity And Other Sediment Surrogates Workshop, Proceedings... Reno, USA., 2002.

GARTNER, J. W.; CHENG, R. T. The promises and pitfalls of estimating suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profiler. Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, NV, March 25-29, p. 1(3):119-126, 2001.

GARTNER, J. W.; CHENG, T. T.; WANG, P. F.; RICHTER, K. Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations: **Marine Geology**, Vol. 175, Amsterdam, p. 199-219, 2001.

GARTNER, J. W.; GRAY, J. R. Summary of suspended-sediment technologies considered at the interagency workshop on turbidity and other sediment surrogates. USGS, 9 p., 2003.

GOMES, J.; SANTOS, I. Análise comparativa de campanhas de medição de descarga líquida pelos métodos convencional e acústico. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Belo Horizonte, 18 p., CD ROM, 1999.

GOODING, D. J. Photo-optical sedimentation tube. Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29, Reno, Nevada, poster-29, 2001.

GORDON, R. L. **Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of operation, a practical primer**. 2nd edition for broadband ADCPs. RD Instruments, San Diego, USA, 1996.

GRAY, J. R.; GOODING, D. J.; MELIS, T. S.; TOPPING, D. J.; RASMUSSEN, P. P. U.S. Geological Survey suspended-sediment surrogate research, Part II: Optic technologies: Proceedings of the Virginia Water Research Conference, Virginia Tech, Blacksburg, October 8-10, 7 p., 2003.

GRAY, J. R.; MELIS, T. S.; PATIÑO, E.; GOODING, D. J.; DAVID J.; TOPPING, D. J.; LARSEN, M. C.; RASMUSSEN, P. P. U.S. Geological Survey Suspended-Sediment Surrogate Research on Optic, Acoustic and Pressure-Difference Technologies. In: Suspended-sediment technologies considered at the interagency workshop on turbidity and other sediment surrogates. USGS, 10 p., 2003.

HAMILTON, L. J.; SHI, Z.; ZHANG, S. Y. Acoustic backscatter measurements of estuarine suspended cohesive sediment concentration profiles. **Journal of Coastal Research**. No. 14(4), p. 1213-1224, 1998.

HANES, D. M.; VINCENT, C. E.; HUNTLEY, D. A.; CLARKE, T. L. Acoustic measurements of suspended sand concentration in the C2S2 experiment at Stanhope Lane, Prince Edward Island: **Marine Geology** No. 81, p. 185-196, Amsterdam, 1988.

HAY, A. E. Sound scattering from a particle-laden, turbulent jet. **Journal of Acoustical Society of America**, No. 90(4) pt. 1, p. 2055-2074, 1991.

HAY, A. E.; SHENG, J. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multi-frequency acoustic backscatter. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 97, No. C10, p. 15,661-15,677, 1992.

HOLDAWAY, G. P.; THORNE, P. D.; FLATT, D.; JONES, S. E.; PRANDLE, D. Comparison between ADCP and Transmissometer Measurements of Suspended Sediment Concentration. *Continental Shelf Research*, No. (19): 421-441, 1999.

LAND, J. M.; JONES, P. D. Acoustic measurement of sediment flux in rivers and near-shore waters. Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29, 2001, Reno, Nevada, Vol. III, p. 127-134, 2001.

LARSEN, M. C.; ALAMO, C. F.; GRAY, J. R.; FLETCHER, W. Continuous automated sensing of Streamflow density as a surrogate for suspended sediment concentration sampling. Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29, 2001, Reno, Nevada, Vol. III, p. 102-109, 2001.

LEWIS, A. J.; RASMUSSEN, T. C. Determination of suspended sediment concentrations and particle size distributions using pressure measurements. **Journal of Environmental Quality**, No. 28, p. 1490-1496, 1999.

LIBICKI, C.; BEDFORD, K. W.; LYNCH, J. F. The Interpretation and Evaluation of a 3-MHz Acoustic Backscatter Device for Measuring Benthic Boundary Layer Sediment Dynamics. **Journal of the Acoustical Society of America**, No. 85, April, p. 1501-1511, 1989.

LU, Q. Evaluation of empirical approaches for converting acoustic backscatter to suspended sediment concentration. **Dissertation of Master** – Coastal Geosciences and Engineering, University of Kiel. Alemanha. 55 p. 2003.

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

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. A.; SANTOS JÚNIOR, R. C.; SOUZA, W. F. L. Aporte Fluvial e Dispersão de Matéria Particulada em Suspensão na Zona Costeira do Rio São Francisco (SE/AL). *Geochimica Brasiliensis*, No. 21(2)212 - 231, 20 p., 2007.

MENDONÇA, A. S. Quantificação dos Recursos Hídricos (Razões para a Quantificação). In: PAIVA, J. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. ABRH, Porto Alegre, 2003.

MILLIMAN, J. D. Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas. In: Mantoura, R.F.C.; Martin, J. M.; Wollast, R. **Ocean Margin Processes in Global Change**. John Wiley & Sons, p.60-90,1991.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. ABRH, Porto Alegre, 2003.

POERBANDONO, W. C.; MAYERLE, R. Assessment of Approaches for Converting Acoustic Echo Intensity into Suspended Sediment Concentration. In: 3rd FIG Regional Conference. Jakarta, Indonésia, 2004.

RDI. **Acoustic Doppler Current Profilers. Principles of operation: a practical primer**. Publ. San Diego, 1989.

RDI. **Acoustic Doppler Current Profilers. Principles of operation: a practical primer**. Second Edition. Publ. RDI, San Diego, 57 p., 1996.

RODRIGUES, M. S.; GAMARO, P. E. M.; SILVA, L. L.; RIBEIRO, M. O.; MANZOCHI J. M. G. Aquisição de Dados Hidrológicos para os Sistemas de Informações de Recursos Hídricos, quando Começar?. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 25-29 Novembro, 2005, João Pessoa, Paraíba, 2005.

ROTARU, E.; COZ, J. L.; DROBOT, R.; ADLER, M. J.; DRAMAI, G. **ADCP Measurements of Suspended Sediment Fluxes in Banat Rivers**, Romania. National Institute of Hydrology and Water Management. Bucharest, Romania, 2006.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 372p., 2001.

SANTOS, I.; GOMES, J.; BUBA, H. Medições de descarga líquida:método convencional x método acústico. Comparação dos resultados. In: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Vitória, p. 369-378, CD ROM, 1997.

SHENG, J.; HAY, A. E. An examination of the spherical scatter approximation in aqueous suspensions of sand. **Journal of Acoustical Society of America** No. 83(2), February 1988, p. 598-610, 1988.

SIMPSON, M. R. Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler. United States Geological Survey. Open-File Report 01-1. Sacramento, California, 2001.

TERABE, F. R. Estudo sobre o Uso do ADCP para Medição do Transporte Sólido em Suspensão. 2003. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná - UFPA, Curitiba, 2003.

THEVENOT, M. M.; KRAUS, N. C. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary. **Journal Marine Environmental Engineering**, Vol. 1, Gordon and Breach Science Publishers, p. 65-79, 1993.

THEVENOT, M. M.; PRICKETT, T. L.; KRAUS, N. C. Tylers Beach, Virginia, dredged material plume monitoring project. Dredging Research Program Technical Report DRP-92-7, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C, 204 p., 1992.

THORNE, P. D.; HARDCASTLE, P. J. Application of Acoustic Backscattering to Measuring Suspended Sediment Concentration. In: SOULSBY, R. L.; BETTESS, R. *Euromech 262 - Sand Transport in Rivers, Estuaries and the Sea*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1991.

THORNE, P. D.; HARDCASTLE, P. J.; HOGG, A. Observations of Near-bed Suspended Sediment. 1996.

THORNE, P. D.; HARDCASTLE, P. J.; SOULSBY, R.L. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments, **Journal of Geophysics Research**, No. 98, p. 899-910, 1993.

THORNE, P. D.; VINCENT, C. E.; HARDCASTLE, P. J.; REHMAN, S.; PEARSON, N. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. **Marine Geology**, No. 98, Amsterdam, p. 7-16, 1991.

TOLDO Jr, E. E. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos. **Tese de Doutorado**. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS. Porto Alegre. 183 p. Relatório técnico do Projeto de Sedimentação do Complexo Guaíba. 1999. Convênio CECO/IG/UFERSGS - DVP/DMAE. 1994.

TREZZI, H. Viagem pelo coração do Rio Grande. Série de reportagens, em <http://zerohora.clicrbs.com.br/zerohora/jsp/default.jsp?uf=2&local=18§ion=Geral&newsID=a1854208.xml>. Acessado em 30/07/2008, 2008.

UCHÔA, C. A. B. Contribuições ao Desenvolvimento de um Perfilador Acústico de Correntes Oceânicas. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1995.

URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound**. 2nd ed., McGraw Hill, N.Y., 384 p, 1975.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, Part II: Suspended Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, Vol. 110, No. 11, p. 1613-1641, 1984.

VINCENT, C. E.; HANES, D. M.; TAMURA, T.; CLARKE, T. L. The Acoustic Measurement of Suspended Sand in the Surf-zone. In: Int. Conf. Measuring Techniques of Hydraulic Phenomena in Offshore, Coastal and Inland Waters, p. 443-451. Br. Hydraul. Res. Assoc., London, UK. 1986.

VÖRÖSMARTY, C.J.; MEYBECK, M.; FEKETE, B. E; SHARMA, K. Human Impact on Erosion and Sedimentation. Proceedings. Of the Rabat Symposium. IAHS Publ. 245, p.261-273. 1997.

WALL, G. R.; NYSTRON, E. A.; LITTEN, S. Use of an ADCP to Compute Suspended-Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055, 16 p., 2006.

WMO - World Meteorological Organization. **Guide to hydrological practices**. WMO No. 168. 734p., Geneva, 2004.

WREN, D. G.; BARKDOLL, B. D.; KUHNLE, R. A.; DERROW, R. W. Field Techniques for Suspended-Sediment Measurement. **Journal of Hydraulic Engineering**. No. 126(2), p. 97-104. 2000.

WREN, D. G.; KUHNLE, R. A. Surrogate techniques for suspended-sediment measurement. In: Turbidity and Other Surrogates Workshop, April 30-May 2, Reno, NV. 2002.

YOUNG, R. A.; MERRILL, J.; PRONI, J. R.; CLARKE, T. L. Acoustic profiling of suspended sediments in the marine boundary layer, Geophysical Research Letters, No. 9(3). p. 175-178. 1982.

ZALESKI, A. R.; SCHETTINI, C. A. F. A Utilização de Perfiladores Acústicos de Corrente por Efeito Doppler na Determinação do Material Particulado em Suspensão na Água: Aplicações. Centro de Ciências Tecnológicas, da Terra e do Mar – Universidade do Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2005.

ZALESKI, A. R.; SCHETTINI, C. A. F. Procedimentos para Calibração de Perfiladores Acústicos de Corrente por Efeito Doppler na Determinação da Concentração de Material Particulado em Suspensão na Água. Centro de Ciências Tecnológicas, da Terra e do Mar. Universidade do Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2005.

ZALESKI, A. R.; SCHETTINI, C. A. F. Relatório de Calibração de um ADCP modelo Aquadopp Profiler da marca NortekTM para a obtenção de informações sobre Material Particulado em Suspensão na Água. Centro de Ciências Tecnológicas, da Terra e do Mar – Universidade do Vale do Itajaí, SC, 2004.