

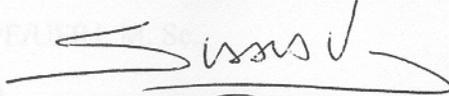
OBTENÇÃO DE PERFIS DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO NOS RIOS DA BACIA AMAZÔNICA A PARTIR DO SINAL DE
RETORNO ACÚSTICO (*BACKSCATTERING*) DE UM PERFILADOR DOPPLER
ACÚSTICO DE CORRENTE (ADCP)

João Franswilliam Barbosa

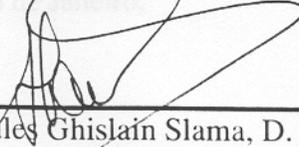
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.



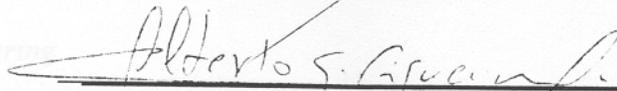
Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D. Sc.



Prof^a. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.



Prof. Jules Ghislain Slama, D. Sc.



Prof. Alberto Garcia de Figueiredo Júnior, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2005

FRANSWILLIAM, JOÃO BARBOSA

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) [Rio de Janeiro] 2005

IX 120p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Oceânica, 2005)

Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1 – Acústica Submarina

2 – ADCP

3 – *Backscattering*

4 – Concentração

5 – Sedimentos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Francisco e Helena (*in memoriam*).
À minha esposa Luciana.
Aos meus filhos Isabella e João Pedro.

AGRADECIMENTOS

À Professora Susana Vinzón, pela orientação, apoio e dedicação a mim dispensados.

Ao Professor Carlos Eduardo Parente Ribeiro, pela co-orientação e por tudo o que fez pelo desenvolvimento da acústica submarina na Marinha brasileira.

Ao Instituto Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (Marinha do Brasil) e, em especial, aos comandantes Renato, Ricardo, Ana Cláudia e Lúcia Artusi e aos funcionários Bete, Dante e Otis, sem o apoio dos quais eu não conseguiria concluir o trabalho.

À Luciana, por tudo de bom que representa e pelo incentivo que sempre me dá quando quero realizar um sonho.

Aos meus irmãos Carloto, Tilinha, Carlúcia, Carlos, Vicente, Gilmar e Josélia, pelo amor, carinho, ajuda e dedicação na formação do meu caráter.

Aos amigos Fábio Lopes, Maurício César e Xavier por estarem sempre prontos a ajudar na superação das dificuldades impostas pela vida.

À minha filha bebel, para parar de reclamar que o nome dela não aparece nesta tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (MSc.)

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)

João Franswilliam Barbosa

Abril/2005

Orientadores: Susana Beatriz Vinzón

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa: Engenharia Oceânica

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo de perfis de concentração de sedimentos, tendo como base o sinal de retorno acústico oriundo de um ADCP. Para tal objetivo, faz-se necessário o conhecimento dos mecanismos de propagação do som em águas rasas, o desenvolvimento e a validação de modelos e de técnicas de processamento temporal e espacial usados em acústica submarina, além de características inerentes ao próprio local de estudo, como composição e granulometria do sedimento em suspensão.

São apresentadas as diversas etapas do desenvolvimento dessa metodologia, desde a coleta de dados até a obtenção dos perfis de concentração propriamente ditos. Aqui serão mostradas, de forma resumida, as principais técnicas existentes para obtenção desses perfis a partir do uso das mais diversas teorias. Segue-se um resumo das características de funcionamento do equipamento usado para obtenção dos perfis de intensidade sonora da região de estudo e, por fim, mostraremos os resultados obtidos, a partir das teorias de Rayleigh e da base matemática proposta por Peter Thorne, Hay, Sheng e Hanes, entre outros.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

ESTIMATION OF SUSPENDED SEDIMENTS CONCENTRATION PROFILES OF
AMAZON RIVERS FROM ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER (ADCP)
BACKSCATTERING

João Franswilliam Barbosa

April/2005

Advisors : Susana Beatriz Vinzón

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department : Oceanic Engineering

This research presents the development for a methodology of sediments concentration calculation along profiles, based on backscattering from an ADCP. For this, it is necessary the knowledge of sound propagation mechanisms in shallow waters, the development and the validation of time-space processing techniques models and used in submarine acoustics. Besides this, inherent characteristics of the investigated location, such as suspended sediment composition and grain-size are also necessary.

Several development stages of the methodology are presented, from concentration profile data collection. It will be shown the main techniques for obtaining such profiles starting from the use of the most several theories. Afterwards, a summary of the equipment operation characteristics used for obtaining of the profiles of sound intensity at the study area and, finally, we will show the results, starting from the theories of Rayleigh and of the mathematical base proposed by Peter Thorne, Hay, Sheng and Hanes, among other researchers.

“Não há melhor maneira de manter um povo submisso do que entregar-lhe o produto pronto, acabado, inibindo-o de produzir, ele mesmo, o que necessitar.”

Abraham Lincoln

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 – HISTÓRICO, APLICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS DE UM ADCP | 4 |
| 2.1 – O ADCP e o Laboratório de Instrumentação Oceanográfica da Engenharia Oceânica | 6 |
| 2.2 – Aplicações do ADCP | 7 |
| 2.3 – O ADCP e Seu Princípio de Funcionamento | 8 |
| 2.4 – O Uso do ADCP no Brasil | 20 |
| 2.5 – Principais Definições Usadas no Emprego de um ADCP | 20 |
| 2.6 – Principais Cuidados para se Usar os Dados Provenientes de um ADCP | 22 |
| 3 – AS CAMPANHAS DE COLETAS DE DADOS | 23 |
| 3.1 – O Projeto “Hidrologia da Bacia Amazônica (HiBAm)” | 23 |
| 3.2 – A Coleta de Dados | 25 |
| 4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 31 |
| 4.1 – Considerações Iniciais | 31 |
| 4.1.1 – Retroespalhamento Ótico (OBS) | 33 |
| 4.1.2 – Transmissão Ótica | 33 |
| 4.1.3 – Reflectância do Feixe Focado | 34 |
| 4.1.4 – Difração LASER | 34 |
| 4.1.5 – Nuclear | 34 |
| 4.1.6 – Reflectância Espectral | 35 |
| 4.1.7 – Digital Ótico | 35 |
| 4.1.8 – Pressão Diferencial | 46 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.9 – Tubo Vibrante | 36 |
| 4.1.10 – Acústico | 37 |
| 4.2 – Metodologia Acústica | 39 |
| 4.2.1 – O Uso do Sinal de Retroespalhado Para Obtenção Concentração de Massa | 40 |
| 4.3 – Formulação Matemática | 42 |
| 4.4 – O Método Explícito | 45 |
| 4.5 – O Método Implícito | 48 |
| 4.6 – O Método Prático | 49 |
| 4.6.1 – Passos Necessários para Calcular o Coeficiente Absoluto do Sinal de retorno | 57 |
| | |
| 5 – ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS | 64 |
| 5.1 – Cálculo do Coeficiente de Atenuação da Água (α_w) | 65 |
| 5.2 – Arquivos de Intensidade, Concentração e Granulometria das Amostras | 68 |
| 5.3 – A Curva de Rayleigh | 73 |
| 5.4 – A Intensidade do Sinal de Retorno | 76 |
| 5.5 – Estimativas do Sinal de Retorno Usando ADCP | 77 |
| 5.6 – Análise dos Dados Coletados no Rio Amazonas | 90 |
| 5.7 – Análise dos Dados Coletados no Rio Madeira | 93 |
| 5.8 – Análise dos Dados Coletados no Rio Solimões | 96 |
| 5.9 – Cálculo da Correlação Entre o Sinal de Retorno e a Concentração de sedimentos | 98 |
| | |
| 6 – OBTENÇÃO DE PERFIS DE CONCENTRAÇÃO | 104 |
| | |
| 7 – RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÃO | 108 |
| | |
| 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |

ANEXOS

- ANEXO A** - **Informações Sobre a Região Amazônica;**
- ANEXO B** - **Formulação Matemática;**
- ANEXO C** - **Arquivos de Granulometria;**
- ANEXO D** - **Gráficos de Granulometria;**
- ANEXO E** - **Gráficos de Intensidade do Sinal de Retorno e de Concentração de Sedimentos;**
- ANEXO F** - **Gráficos do Capítulo 5;**
- ANEXO G** - **Lista dos Arquivos de Concentração;**
- ANEXO H** - **Correlação Entre a Intensidade do Sinal de Retorno e a Concentração de sedimentos;**
- ANEXO I** - **Programas MATLAB;**
- ANEXO J** - **Dados Usados Nesta Tese**

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O Perfilador Doppler-Acústico de Corrente, ou, como é mundialmente conhecido no meio hidrológico, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), é uma ferramenta que, ao longo das últimas duas décadas vem sendo utilizada com enorme sucesso para medições de correntes e vazão de rios, entre outros.

No Brasil seu uso é recente, pois o marco inicial em nosso País se deu na Bacia Amazônica em 1994, através de uma equipe franco-brasileira do projeto Hidrologia da Bacia Amazônica (projeto HiBAm), composta por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), hoje Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e do Instituto Francês para a Pesquisa e o Desenvolvimento em Cooperação (IRD), ex-ORSTOM.

Desde então, foram dezenas de campanhas de campo realizadas com a participação de um sem-número de instituições de pesquisas, que muito contribuíram para um melhor conhecimento da hidrologia e do fluxo de sedimentos nos rios, não só da região amazônica, como também de outras regiões brasileiras.

Um dos possíveis empregos para este equipamento é a determinação de concentração de sedimentos em suspensão, a partir do seu sinal de retorno ou, como é conhecido, “*backscattering*”, onde se concentrará o escopo deste trabalho.

O desenvolvimento de técnicas de processamento que permitam correlacionar o eco do sinal transmitido à concentração de sedimentos presentes na água é o objetivo desta tese. Seu uso continuado em experimentos de campo permitirá, simultaneamente, um melhor conhecimento dos processos envolvidos na propagação do som e o próprio aperfeiçoamento das técnicas empregadas no processamento de sinais acústicos.

Esta dissertação se propõe a apresentar, a partir de dados coletados em campanhas do projeto HiBAm, o desenvolvimento de um método que possibilite essa correlação. Parte-se de um conjunto de especificações e requisitos básicos, sendo as diversas etapas descritas.

O Capítulo 2 traz um breve histórico desse equipamento, suas aplicações, características e princípio de funcionamento, além do seu desenvolvimento, onde são mostrados alguns trabalhos desenvolvidos pelo Programa de Engenharia Oceânica (PENO) da Coordenação de Pesquisa de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE); traz, ainda, os conceitos básicos de propagação do som, e os fatores que motivaram a escolha da região; dando-se ênfase especial a sua importância científica e sócio-econômica.

O capítulo 3 versará sobre as campanhas de coleta de dados. Aqui será apresentado o projeto “Hidrologia da Bacia Amazônica (HiBAm)”, e como este projeto de cooperação entre vários órgãos nacionais e estrangeiros, tem contribuído para um melhor conhecimento da Região Amazônica. Nele serão abordados, entre outros assuntos, os equipamentos e as técnicas empregadas em campo, além de um breve relato dos diversos dados coletados ao longo de diversas campanhas desse projeto.

No Capítulo 4, a abordagem estará relacionada com a análise dos dados coletados, onde serão feitas algumas considerações sobre a granulometria, a concentração de sedimentos e a intensidade do sinal de retorno para as diferentes estações de coleta nos três principais rios abordados por esse estudo: Rio Amazonas, Rio Solimões e Rio Madeira.

O Capítulo 5 versará sobre a teoria que fundamenta a obtenção de perfis de concentração de sedimentos, tomando como base o “*backscattering*”, onde serão citados os principais autores e métodos existentes de cálculo.

Já o Capítulo 6 mostrará os resultados alcançados, com o cálculo do coeficiente de correlação para a intensidade do sinal de retorno medido em relação à concentração de sedimentos finos, areias e concentração total, apartir da teoria aplicada aos dados efetivamente coletados. Serão calculados, ainda, alguns perfis de concentração de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica, como resultado do processamento sinal acústico de retorno do ADCP.

No Capítulo 7 será feita uma análise dos resultados obtidos, com uma proposta de trabalhos futuros e a conclusão.

Capítulo 2

HISTÓRICO, APLICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS DE UM ADCP

O ADCP é um equipamento que transmite ondas sonoras através da água, com frequências predeterminadas (neste trabalho, foram empregadas as frequências de 300, 600 e 1200 kHz).

O som emitido choca-se com partículas carregadas pela corrente d'água, onde é refletido em forma de eco ao aparelho transceptor que, por intermédio de seus sensores, filtra o sinal recebido e o transmite para um computador dotado de um software específico que coordena as ações de todo o sistema, recebendo, armazenando e disponibilizando os dados em forma de gráficos ou tabelas.

Os primeiros esforços direcionados à obtenção de medições de correntes que fizessem uso do efeito Doppler remontam ao início da década de 60.

Vários foram os pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa; entre outros, podemos citar KOCZY (1963), e KRONENGOLD & VLASAK (1965), que trabalharam fazendo uso de pulso curto com transmissor e receptor em separado, utilizando uma frequência de 10MHz (CARVALHO, 1999).

O “*National Data Buoy Project*” (NDBP), desenvolveu um dispositivo capaz de medir a velocidade do navio em relação ao fundo através do efeito Doppler de um eco

produzido por uma transmissão inclinada, o que pode ser considerado como os precursores dos ADCPs.

Depois de aproximadamente 7 (sete) anos de análises e experimentos fazendo-se uso de dispositivos fundeados ou montados em embarcações, o *Engineering Development Lab* (EDL), órgão ligado à NOAA, através dos pesquisadores EMMANUEL & MANDICS (1973), concluiu que seria possível obter a estimativa da seção reta espalhada fazendo-se uso das técnicas Doppler, desde que se tivessem informações básicas de concentração e distribuição de tamanhos dos espalhadores na região de estudo (CARVALHO, 1999).

Após anos de pesquisa, somente em 1983 é que organismos americanos começaram a vislumbrar a possibilidade de tornar comercial os Perfiladores Doppler-Acústico de Corrente a bordo de navios de oportunidade. Como aperfeiçoamento dessa idéia inicial, foram incluídas pesquisas para desenvolver métodos alternativos para perfilagens de correntes, aqui incluindo-se o sistema Doppler transverso, o sonar Doppler coerente e o sonar de correlação. O aumento do interesse, tanto por parte da comunidade científica quanto comercial, foi quase que imediato. Já em novembro desse mesmo ano, foi realizado em Washington um simpósio sobre perfiladores acústicos, com ênfase na sua aplicação marítima.

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

Os trabalhos do “Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica – HiBAm” e de outras instituições (CPRM, ITAIPU, COPEL, SUDERHSA, MARINHA, etc.) que se seguiram

àqueles precursores mostraram a vantagem fundamental deste equipamento para melhorar os conhecimentos sobre a hidrologia e também sobre os fluxos de sedimentos nos grandes rios, tanto da região Amazônica, quanto de outras regiões brasileiras.

Destacam-se os trabalhos realizados por Naziano Filizola, da Agência Nacional de Águas (ANA), Valdemar Guimarães, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Jean Guyot (IRD), na medição de vazão e estimativa do fluxo de sedimentos nos grandes rios da bacia amazônica, além dos estudos realizados pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) sobre o uso do ADCP em pequenos e médios cursos d'água, num trabalho conjunto de Geraldo Lúcio Tiago Filho, Augusto Nelson Carvalho Viana, Geysa Tibúrcio Caetano e Ricardo Matheus dos Santos.

2.1 – O ADCP e o Laboratório de Instrumentação Oceanográfica da Engenharia Oceânica

O estudo relacionado ao uso, aplicação e técnicas de processamento do sinal acústico de ADCP no âmbito da Engenharia Oceânica e, em particular, ao Laboratório de Instrumentação Oceanográfica, iniciou-se com RUIZ em 1992, que desenvolveu um ecobatímetro. Mais tarde este equipamento foi adaptado por UCHOA (1995), para funcionar como um ADCP monocanal, pois, à época, tinha-se o objetivo de compreender os processos de espalhamento acústico no mar, e assim obter o domínio das técnicas de processamento Doppler. CARVALHO (1999) deu continuidade a esses estudos ao defender sua tese “INVESTIGAÇÕES SOBRE UM PERFILADOR ACÚSTICO (ADCP) DE FAIXA-LARGA”, enquanto BARREIRA (2004) defendeu sua tese de mestrado intitulada “OBSERVAÇÃO DE CORRENTES COM ADCP”

Destaca-se aqui o grande esforço feito por eles na busca de tentar sintetizar melhor o funcionamento desse instrumento, bem como mostrar as muitas possibilidades de aplicação das técnicas acústicas remotas.

2.2 – Aplicações do ADCP

As principais aplicações relacionadas com uso de ADCP são:

- monitoramento de portos: estudo de correntes em diferentes profundidades;
- em obras marítimas: estudo de mudanças nas correntes marinhas;
- em biologia marinha: análise de correntes verticais e horizontais que possibilitem a oxigenação da água e o deslocamento de nutrientes, essenciais à vida marinha;
- medição direcional de ondas: importante campo em franca expansão e desenvolvimento, em especial quando combinados com radares para monitoramento de ondas, em caso de derramamento de óleo;
- projetos de sistemas oceânicos: estudo dos esforços provocados ao longo de toda a coluna d'água; e
- uma nova possibilidade, objetivo deste trabalho, que é a determinação da quantidade de sólidos em suspensão, a partir do espalhamento do feixe sonoro ocorrido na partícula, usando como base teórica o modelo de espalhamento “*Rayleigh*”, e a formulação matemática proposta por HAY (1991) e THORNE & CAMPBELL (1992).

É nessa última aplicação que se concentrarão os esforços deste trabalho.

2.3 – O ADCP e Seu Princípio de Funcionamento

O ADCP é um equipamento composto por uma sonda, com quatro transdutores e um "deck box", onde os sinais são filtrados e transmitidos para um computador dotado de um software específico capaz de coordenar as ações de todo o sistema, receber os dados, armazenar e disponibilizá-los em forma de gráficos, tabelas etc. Este equipamento transmite ondas sonoras através da água em frequências preestabelecidas que variam entre 75 e 2400 kHz, dependendo do modelo a ser usado. Partículas de matéria presentes na água e carregadas pela corrente, a diferentes profundidades, refletem o sinal sonoro de volta para o aparelho que "escuta" o eco através de seus sensores. Dessa forma, o equipamento constrói um perfil vertical da coluna d'água (RDI, 1989), podendo ainda ser utilizado para medir o seu movimento com relação ao fundo do rio e a distribuição dos sedimentos em suspensão na seção de medição (Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1999).

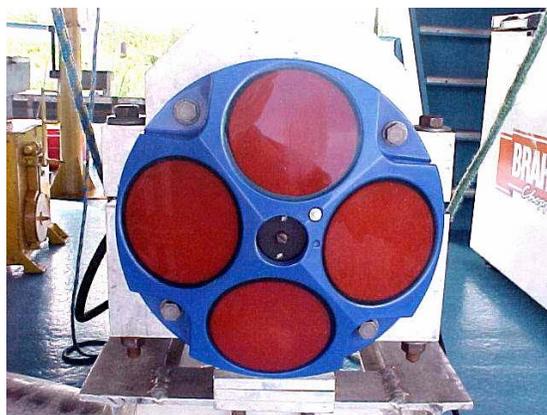


Figura 2.1. Vista dos 4 transdutores acústicos do ADCP utilizados tanto para emitir quanto para receber os pulsos sonoros (Foto J. Werneck).

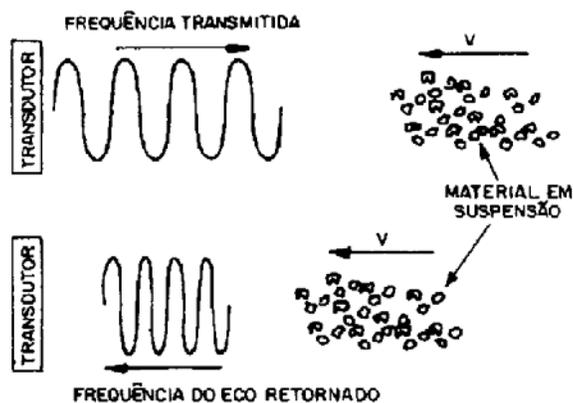


Fig.2.3 - Mudança de frequência causada pelo efeito Doppler (EFEI,1999).

Sabe-se que o efeito Doppler é direcional, o que significa dizer que qualquer mudança de frequência corresponde à uma componente de velocidade ao longo da direção do transdutor e que, em contrapartida, as velocidades perpendiculares à direção do transdutor não produzem nenhum efeito relacionado a esse fenômeno.

Os feixes sonoros do ADCP (figura 2.5) medem duas componentes do vetor da corrente de água. Como elas não estão na mesma direção, podem ser transformadas em dois vetores ortogonais (horizontal e vertical). Um segundo par de feixes sonoros, girados de 90° graus do primeiro par, gera outro conjunto de vetores, totalizando três vetores ortogonais (x, y, z), que são as três componentes do vetor velocidade da corrente (u, v, w), (EFEI,1999).



Figura 2.4 - Christian Johann Doppler (1803 – 1853)

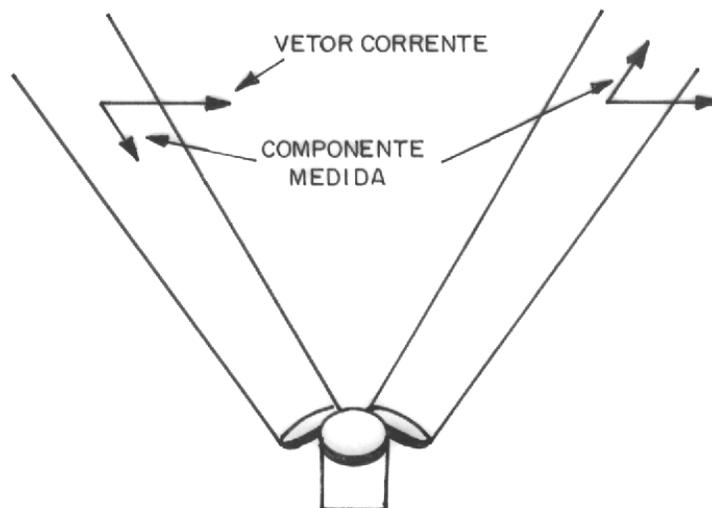


Fig. 2.5 - Geometria dos feixes sonoros do ADCP (EFEI, 1999).

Para um perfeito funcionamento, o equipamento precisa determinar de forma precisa os ganhos do efeito Doppler ocorridos no eco, quando comparados com o pulso originalmente transmitido. São várias as maneiras de se processar o sinal acústico a fim de se perceber esta mudança de frequência; entre elas, podemos citar o uso da Transformadas Rápidas de Fourier e da Autocovariância.

Um instrumento Doppler de simples pulso, transmite um pequeno pulso de som à uma frequência fixa (F_t) na água, ao longo de um feixe acústico estreito. Em resposta, recebe primeiro o reflexo do som na água e depois no fundo. Esses ecos têm uma frequência Doppler diferenciada (F_d), causada pelo movimento relativo entre o transceptor (transmissor/receptor) do ADCP e o material em suspensão na coluna d'água. Assim os ecos refletidos têm um espectro de largura de banda diferente de zero, centrado em F_d . A razão dominante para a largura de banda é o comprimento do pulso transmitido.

Como o feixe sonoro é enviado pela água, o eco recebido, a qualquer instante, é a soma dos ecos individuais das partículas em suspensão atingidas pelo feixe acústico. Na

figura 2.6, pode-se observar que um pulso enviado, ao atingir duas partículas em suspensão na água com velocidade V , relativa ao ADCP, é devolvido de maneira diferente por cada partícula e que as intensidades diminuem, uma vez que nem toda energia é devolvida, pois parte é absorvida pela água ou pela própria partícula de massa ensonificada; observa-se, ainda, que as pulsações de retorno são comprimidas devido ao efeito Doppler e que as fases das duas pulsações de retorno são diferentes. Quando ocorre de haver muitas partículas dissolvidas, cada uma terá a pulsação refletida com fase diferente, e estas diferentes fases e amplitudes produzem um registro, como mostrado na figura 2.7. Durante o trajeto do feixe sonoro ao longo da coluna d'água, ocorre uma mudança contínua na modulação, pois novas partículas são detectadas refletindo, por sua vez, novos ecos, em uma nova fase, diferente da fase das partículas anteriores que deixaram o feixe sonoro, causando uma diminuição na correlação dos sinais.

Chama-se de correlação a comparação do sinal de retorno de um pulso acústico com ele mesmo, pois isso permite deduzir a frequência do pulso de retorno.

É possível ver a correlação como dois instantes separados por um intervalo de tempo t . No instante $t = 0$, os dois instantâneos são os mesmos e a correlação está perfeita, assim como o sinal de retorno vindo do conjunto de partículas. Com o decorrer do tempo, os dois instantâneos assumem posições diferentes, uma vez que o pulso se moveu ao longo da coluna d'água. Assim teremos uma informação de fase diferente, pois as partículas sofrem influência da velocidade da corrente d'água e se movem completamente, assumindo novas posições, entrando ou saindo do volume ensonificado, o que acarreta uma correlação menos perfeita. Esta mudança de fase causada pelo movimento das partículas, dividida pelo tempo entre os dois instantâneos, fornece a frequência do efeito Doppler. Daí decorrem a

obtenção de mais informações e as incertezas na estimativa das frequências produzidas pela componente de ruído dos sinais, que são associadas com cada medida de velocidade.

Uma pulsação mais longa reduz este erro do acaso, porque o volume das novas partículas em suspensão é uma porcentagem menor do que o volume total de pulso. Se a pulsação transmitida é longa o suficiente para detectar completamente o fundo (que normalmente é o caso), as mesmas partículas com as mesmas amplitudes e fases dominarão o eco recebido, combinando-se no receptor para produzir uma amplitude de eco aproximadamente constante e um gráfico *fase x tempo*. É essa reflexão com o espelho do fundo que gera um eco semelhante para o sinal de retorno das partículas dissolvidas; o registro do eco é senoidal. Isso significa que aquelas estimativas das velocidades de fundo são mais precisas que para a água. A redução em erro fortuito é proporcional à raiz quadrada do número destas medidas independentes (EFEI, 1999).

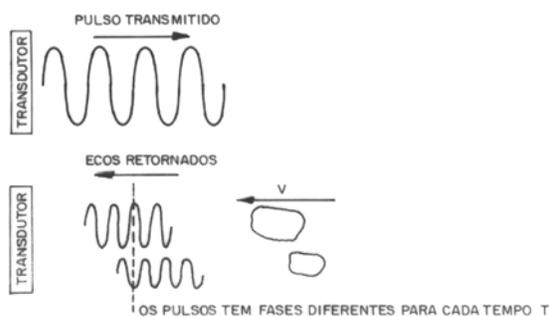


Fig. 2.6 – Eco retornado de duas partículas em suspensão. (EFEI, 1999).

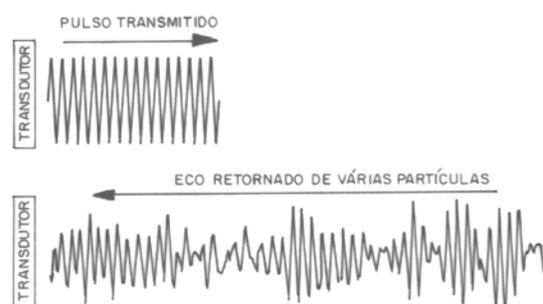


Fig. 2.7 – Modulação versus tempo de plotagem para muitas partículas. (EFEI, 1999).

Relacionar a intensidade do eco recebido com os espalhadores presentes na água requer um conhecimento de uma série de variáveis, tais como:

- potência de transmissão;
- características acústicas do transmissor;
- a resultante do feixe direcional acústico;
- o poder de atenuação causado pelas perdas na propagação (aqui incluídas as perdas relacionadas à absorção e ao espalhamento do sinal sonoro); e
- características próprias do receptor.

Como o mesmo transdutor que é usado na transmissão, também será usado na recepção, faz-se necessário que decorra um certo intervalo de tempo para que não haja a interferência mútua do sinal acústico. Esse intervalo de tempo, que na verdade constitui um "branco" após a transmissão, mas que implica numa distância percorrida pelo som, é denominado de "blanking distance", pois o espaço percorrido pelo som durante este percurso não é efetivamente medido pelo ADCP (RDI, 1989).

Na tabela abaixo, estão listados os valores de "*blanking distance*" para diferentes tipos de ADCP:

| ADCP | 1200 kHz | 600 kHz | 300 kHz |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Rio Grande | 25cm | 25cm | 75cm |
| BroadBand | 50cm | 50cm | 100cm |

Tabela 2.1 - *blanking distance* (RDI, 1989).

Ressalta-se que, de acordo informações do fabricante (RDI, 1989), além do "branco", o pulso de energia emitido pelo ADCP abrange, na verdade, 2 ou 3 pulsos distintos compactados, mas que possuem um espaçamento entre si. Esse espaçamento é

denominado “lag” ou retardo do sinal. No mínimo um lag é necessário depois do *blanking distance*. O lag é aproximadamente igual à espessura da célula de profundidade. Portanto, o espaçamento abaixo da superfície, antes que a primeira célula de profundidade seja medida pelo ADCP, é a soma da profundidade de imersão do transdutor, a *blanking distance* e o lag. No entanto, o software que acompanha o equipamento possibilita o cálculo automático dessa distância, bastando informar a profundidade de imersão do equipamento, que poderá ser diferente do calado da embarcação utilizada.

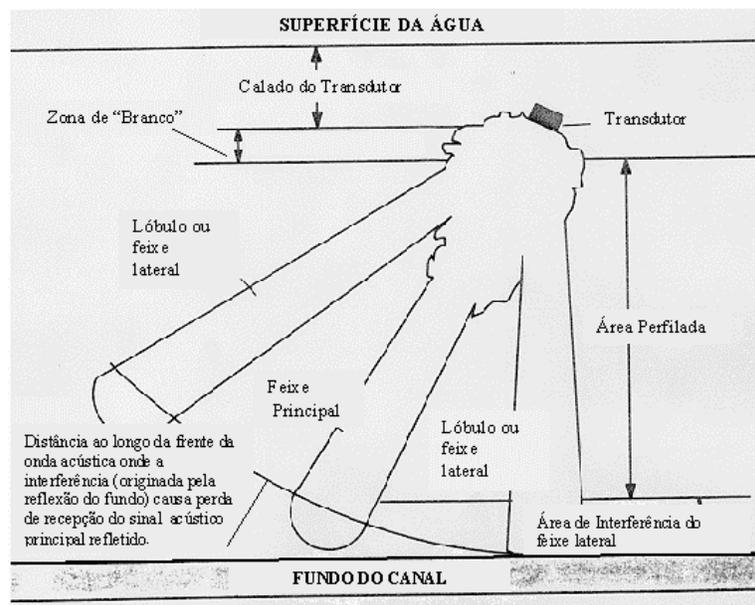


Figura 2.9 - Ilustração mostrando as fontes de interferência e a forma do sinal emitido por cada transdutor do ADCP (RDI, 1989).

O ADCP transmite os pulsos através de 4 "feixes acústicos" que podem ser considerados como cones de energia. A composição de vetores de velocidade nos 4 feixes transmitidos produz o vetor corrente, com indicação da direção e da velocidade (figura 2.10).

Por construção, o feixe lateral encontra-se desviado cerca de 30 graus em relação ao principal, o que implica em que, enquanto este ainda está sendo refletido pelas partículas

em suspensão, parte daquele estará sendo refletido no fundo e nas margens. Devido à possibilidade de interferência entre a energia refletida pelo feixe lateral no fundo com o eco do feixe principal, é possível obter-se velocidades imprecisas para a água próxima ao fundo. Sendo assim, o software desconta do cálculo os dados correspondentes à última célula de profundidade próxima ao fundo, o que significa que, para o cálculo da descarga, o programa de computador não utiliza os dados da região próxima ao fundo e das margens que possam estar afetadas. Para um ADCP com feixes entre 20-30 graus, a espessura da camada não medida em função do efeito do feixe lateral é de 6% a 15% da distância do transdutor ao fundo (RDI, 1989).

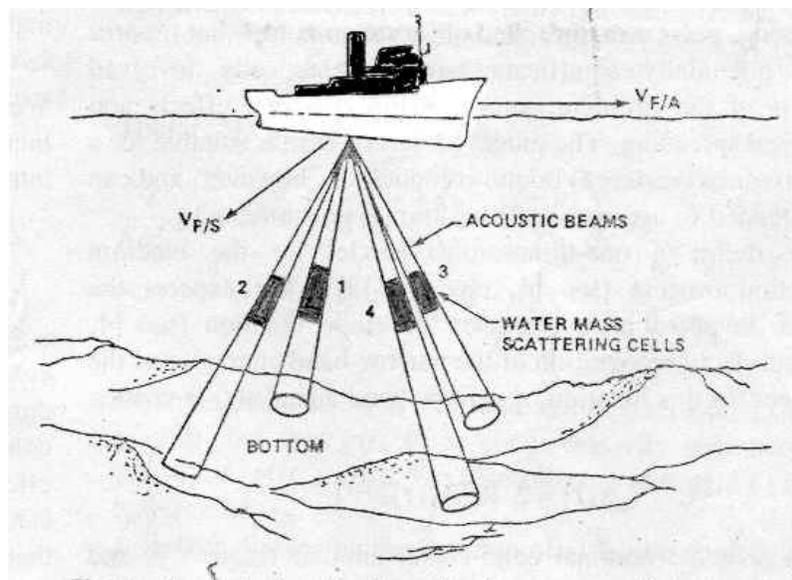


Figura 2.10 - Ilustração mostrando os feixes acústicos emitidos por cada transdutor do ADCP.

À medida que o ADCP processa o sinal refletido pelas partículas em suspensão na água, divide a coluna líquida em um número discreto de segmentos na vertical. Estes segmentos são denominados “células de profundidade” (*Depth Cell*). O equipamento determina a velocidade e a direção de cada célula, cujo tamanho varia de acordo com a frequência do equipamento usado e, também, de acordo com a profundidade da seção a ser

medida. Na tabela 2.2, mostra-se o tamanho mínimo de *Depth Cell* recomendado para diferentes modos de operação do equipamento:

| MODO | 2000 kHz | 1200 kHz | 600 kHz | 300 kHz |
|-------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | - | 25cm | 50cm | 100cm |
| 5/8 | - | 5cm | 10cm | 20cm |
| 11/12 | 2cm | 1cm | 2cm | - |

Tabela 2.2 - tamanho mínimo de *Depth Cell*

Escolhe-se o modo de operação de acordo com a necessidade encontrada na medição, e as características locais do trabalho a ser realizado; na verdade, os modos de operação proporcionam uma maior versatilidade ao aparelho de medição. Na tabela 2.3, mostra-se as vantagens e desvantagens, bem como quando devemos usar os diferentes modos de operação do equipamento:

| MODO | Recomendado | Não recomendado | Vantagens | Desvantagens |
|-------------|---|---|--|---------------------------|
| 1 | Mede na maioria dos cursos d'água; Águas rápidas; | | | |
| 11 | Profundidades < 4 m (1200 KHz) Velocidades < 1 m/s | Cursos d'água mais profundos; Velocidades > 1 m/s; Muita turbulência e condições dinâmicas. | Alta resolução; BIN pequeno (1cm) Baixo desvio padrão (1cm/s com bin de 7cm); Maior resolução; Mede mais próximo do leito | Mede fluxos muito lentos; |

| | | | | |
|----|--|---|--|--|
| | | | Pode ser usado em áreas de turbulência | |
| 12 | Para águas rasas; Velocidades >1 m/s; | - | Mais pings no mesmo tempo; Usa menores <i>bins</i> ; Consome menos energia; Coleta <i>heading, pitch</i> e <i>roll</i> só uma vez durante cada perfilagem Menor ruído (4,5x menos desvio padrão) | Exige maior estabilidade durante os <i>sub-pings</i> |

Tabela 2.3 - modos de operação do equipamento

O ADCP sofre influências significativas na área perfilada, tanto de fatores internos:

- Frequência de operação;
- Tamanho da Depth-Cell;
- Quantidade de pings por ensemble;
- Tamanho da bandwidth; e
- Ângulo do beam.

quanto externos:

- Temperatura da água;
- *Backscattering*;
- Salinidade; e
- Presença de bolhas na água.

Dessa forma, podemos resumir a influência de cada um deles, como mostrado na tabela 2.4:

| FATOR | ÁREA PERFILADA |
|--|--|
| Frequência de operação | Diminuição da frequência aumenta a área |
| Tamanho da Depth-Cell | Aumento da Depth-Cell aumenta a área |
| Quantidade de <i>pings</i> por <i>ensemble</i> | Aumento da quantidade de pings aumenta a resolução |
| Tamanho da <i>bandwidth</i> | Aumento da <i>bandwidth</i> diminui a área |
| Ângulo do <i>beam</i> | ângulo de 20°, maior faixa perfilada |
| Temperatura da água | Diminuição da temperatura aumenta a área |
| <i>Backscattering</i> | Diminuição do material em suspensão diminui a área |
| Salinidade | Diminuição da salinidade diminui a área |
| Presença de bolhas na água | Aumento do número de bolhas diminui a área |

Tabela 2.4: influências de fatores internos externos na área perfilada

As figuras 2.11 e 2.12 são exemplos ilustrativos dos dois tipos de ADCP comumente empregados no Projeto HiBAm.



Figura 2.11 - ADCP RDI BroadBand



Figura 2.12 ADCP RDI WorkHorse Rio Grande

(Fotos CPRM / ANA)

2.4 – O Uso do ADCP no Brasil

Este equipamento vem sendo usado desde a década de 80 com sucesso no mar, especialmente na zona estuarina. Já seu uso em rios, principalmente grandes rios, como o Amazonas, por exemplo, as experiências ainda são poucas.

O marco inicial do uso do ADCP, no Brasil, se deu na Bacia Amazônica, em 1994, através da equipe Franco-Brasileira do projeto HiBAm, na época composta por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE (hoje ANEEL) e do Instituto Francês para a Pesquisa e o Desenvolvimento em Cooperação – ORSTOM (hoje IRD). Os trabalhos do “Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica – HiBAm” e de outras instituições (CPRM, ITAIPU, COPEL, SUDERHSA, etc.) que se seguiram àqueles precursores mostraram a vantagem fundamental deste equipamento para melhorar os conhecimentos sobre a hidrologia e também sobre os fluxos de sedimentos nos grandes rios, tanto da região Amazônica, quanto de outras regiões brasileiras.

Destacam-se os trabalhos realizados por instituições nacionais, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), a Marinha do Brasil e a COPPE/UFRJ, entre outras.

2.5 – Principais Definições Usadas no Emprego do ADCP

| | |
|-----------------------|--|
| <i>Bottom Track</i> | - Velocidade e direção do barco em relação ao fundo; |
| <i>Error Velocity</i> | - Mede a variabilidade dos dados de velocidade; |
| <i>Correlation</i> | - Comparação entre as informações do sinal transmitido e do eco; |

| | |
|--------------------------|--|
| <i>EchoIntensity</i> | - Intensidade do Sinal de retorno; |
| <i>blanking distance</i> | - distância imediatamente abaixo do ADCP onde não é possível medir os pulsos retornados; |
| <i>lag distance</i> | - a estrutura dos pulsos emitidos também não permite a medição a uma distância abaixo do sensor; |
| <i>side lobes</i> | - faixa não medida diretamente no fundo pelo ADCP; |
| <i>depth cells</i> | - divisão do perfil transversal em segmentos igualmente espaçados, sendo necessárias pelo menos 3 <i>depth cells</i> para o início da coleta de dados; |
| <i>transect</i> | - um dos softwares (antigo) usados para fazer as medições com ADCP; |
| <i>Doppler shift</i> | - variação ocorrida na frequência entre o pulso transmitido e o eco; |
| <i>Pings</i> | - pulsos de energia transmitidos pelos transdutores à água; |
| <i>pitch & roll</i> | - movimentos a que são submetidos as plataformas onde se encontram instalados os ADCPs; |
| <i>Ensemble</i> | - Conjunto de <i>pings</i> que nos permite obter perfis de velocidade da água e velocidade do barco; |
| <i>Scatterrs</i> | - ou espalhadores, são as partículas presentes na água responsáveis pelo espalhamento do sinal sonoro que retorna em forma de eco ao transceptor; |
| <i>BackScatterrs</i> | - ou sinal de retorno, é o eco do sinal originalmente transmitido que retorna ao transceptor; |
| <i>ADCP Depth</i> | - profundidade de imersão do perfilador; |

2.6 – Principais Cuidados para se Usar Dados Provenientes De Um ADCP

Para se usar os dados provenientes de um eco, a informação acústica tem que ser processada. Este processamento é realizado em três etapas:

- conversão das unidades internas de cálculos em lineares ou logarítmicas;
- normalização das distâncias, isto é, fazer com que os dados independam da profundidade em que eles foram coletados; e
- normalização instrumental, pois isso possibilita uma análise do dado independente do instrumento usado na sua obtenção.

A normalização do instrumento sempre se refere à calibração absoluta, e é a fase mais complicada de todo o processamento (Nortek technical notes, 2001).

Designar fatores absolutos para a intensidade do eco requer um nível de referência confiável, vai desde o conhecimento das características do sinal de retorno, das características do próprio espalhador, até às informações prestadas pelo fabricante do equipamento.

Além do ruído termal gerado pelo instrumento de pesquisa em seus próprios componentes eletrônicos, existem outros fatores que podem agravar a qualidade do sinal recebido, tais como barulhos provenientes do barco em que o equipamento está instalado (maquinário, propulsores, hidrodinâmicos) ou, ainda, reverberações, que podem até mascarar o ruído próprio do equipamento. Além desses, outros podem influenciar as medições, como os ambientais ou ruídos feitos pelo homem, mas, por ocorrerem com menor frequência, são considerados menos importantes (DEINES, 1999).

Capítulo 3

AS CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS

3.1– O Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica (HiBAm)

O projeto HiBAm, envolve o Brasil, a Bolívia, o Equador e a França, além de inúmeras instituições de pesquisa no Brasil e no exterior. Entre elas, podemos citar:

- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq;
- Agência Nacional de Águas – ANA;
- Universidade de Brasília – UNB;
- Universidade de São Paulo – USP;
- Universidade Federal do Amazonas;
- Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ;
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; e
- *Institut de Recherche Pour le Développement* – IRD (França).

Destina-se ao estudo da hidrologia e da geoquímica da Bacia Amazônica, que abrange uma área aproximada de 6 milhões de Km², ocupando parte do território de nove países (figura 3.1), com uma descarga líquida média anual de cerca de 200.000m³s⁻¹ e com uma média anual de descarga sólida superior a 600 milhões de toneladas, com três importantes áreas-fontes de matéria erodida:

- Andes;

- Escudo das Guianas e Brasileiro; e
- Grande Vale Central ou a Planície Amazônica.

Abaixo, observa-se a área abrangida pelo projeto HiBAm e as três áreas fontes:

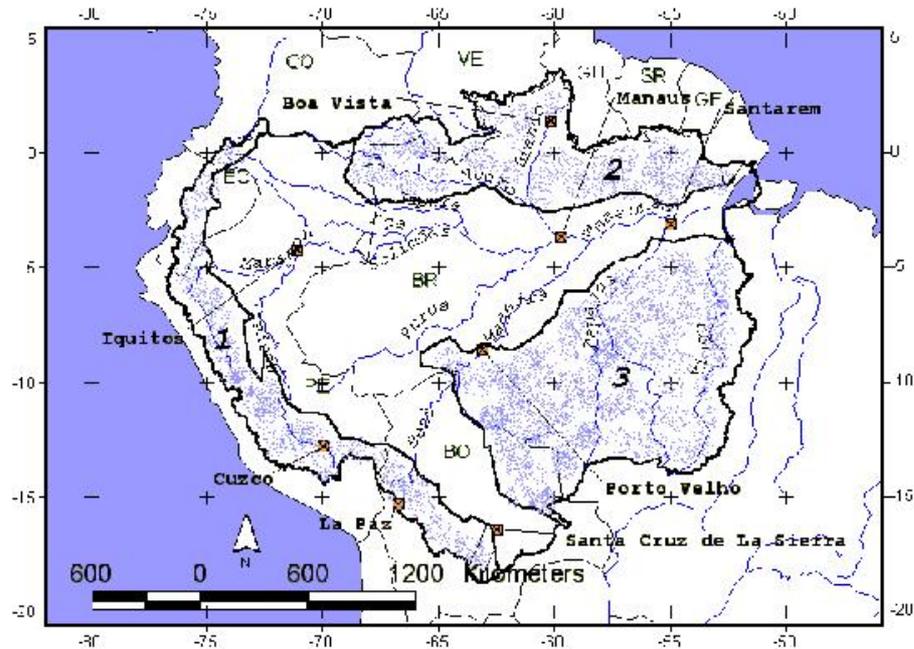


Figura 3.1 - área abrangida pelo projeto HiBAm
(FILIZOLA, 2003)

Dessa forma, os dados aqui trabalhados, foram coletados a partir de campanhas realizadas pelo projeto HiBAm nos últimos dez anos, 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 os dados, *a priori*, não foram coletados com o intuito específico dessa tese. O que houve foi um aproveitamento de uma massa de leituras de perfis acústicos de 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 de granulometria e concentração de sedimentos em suspensão para as respectivas estações aqui focadas.

3.2– A coleta de Dados

Durante a campanha de março/abril de 2003, foram visitadas as estações compreendidas entre as cidades de Tabatinga (Rio Solimões) à Santarém (Rio Amazonas), além da cidade de Manaus (Rio Negro), e foram utilizados os seguintes ADCPs, de propriedade do Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM) para coleta de informações:

- *WorkHorse* ADCP Monitor de 1200 kHz, para medir na várzea do Curuaí-AM (para profundidades máximas de 20 metros);
- *WorkHorse* ADCP Monitor de 600 kHz, para medir na maioria das estações (para profundidades máximas de 60 metros);
- *WorkHorse* ADCP Monitor de 300 kHz, para medir nos locais mais profundos como Iracema e Óbidos (para profundidades máximas de 130 metros).

Além dos equipamentos *supra* citados, na volta para Manaus, a fim de verificar a operacionalidade do *BroadBand* ADCP de 300 kHz, de propriedade da ANA, foram realizadas medições com este aparelho e depois comparadas com as realizadas com o *WorkHorse* ADCP Monitor de 300 kHz do SIVAM, onde foram obtidos resultados praticamente iguais, o que nos levou a concluir que o primeiro estava funcionando normalmente.

Essa campanha de medição foi realizada no período de cheia, época de subida das águas e que corresponde aos máximos anuais de aportes em sedimentos pelo Rio Solimões. Foram feitas medições de vazão nas estações de referência (anexo 3a) e nas bocas dos principais tributários.

Realizou-se, ainda, amostragem de sedimentos em suspensão nas estações fluviométricas dos principais rios para possibilitar uma posterior avaliação dos fluxos

líquidos e sólidos e, a partir daí, elaborar uma modelagem hidrossedimentar dos rios Amazonas, Madeira e Solimões.

As amostragens foram feitas da seguinte maneira: para a estimar a descarga sólida, nas estações de referência, fez-se uma coleta de 15 amostras (3 verticais de 5 pontos), juntamente com uma medição de vazão; amostras de ½ ou de 1 litro que serviram para análise granulométrica, sendo que foram coletadas 3 ou 5 amostras, dependendo da seção. Ainda houve determinadas seções, onde se fazia necessário melhorar a precisão na estimativa de descarga sólida, que foram coletadas 10 amostras em 5 ou até 7 verticais. Ressalta-se que foram realizados testes de avaliação da concentração e da granulometria dos sedimentos medindo-se a intensidade do sinal de retorno do ADCP em algumas verticais de amostragem. Estas medições foram realizadas tentando-se imobilizar o barco em uma vertical, fazendo-se uso de dois ADCPs de frequências diferentes.

Nas paginas seguintes, são mostradas fotografias, onde se pode ver as diferentes fases da montagem de um ADCP, que tanto pode ser usado pela borda da embarcação principal, ou de uma embarcação auxiliar, além da bancada onde são feitas as filtragens a bordo da embarcação de apoio (Fotografia 3.1).



Fotografia 3.1 – Bancada de filtros

Fotografia Pedro M. Rocha (CPRM)

Na seqüência de fotos a seguir (Fotografias 3.2 a 3.7), podemos ver a montagem do ADCP no suporte que irá fixá-lo à borda do bote de apoio, usado quando se precisa trabalhar com dois equipamentos ao mesmo tempo ou quando o local é muito raso e não proporciona água suficiente para se trabalhar com a embarcação principal. Em seguida, são mostrados alguns equipamentos usados durante a comissão de 11 de março a 04 de abril de 2003, pelo projeto HiBAm; o processo de medição e armazenagem do volume de água coletado para posterior filtragem ou obtenção de granulometria; além de uma fotografia onde fica bem nítida a diferença de sedimentos finos presentes nas águas dos rios Negro e Solimões (encontro das águas) e uma outra fotografia capaz de ilustrar o quanto há de sedimentos presentes na água do Rio Amazonas.



Fotografias 3.2; 3.3 e 3.4 - montagem do ADCP na embarcação de apoio



Fotografias 3.5; 3.6 e 3.7 - Instalação do ADCP na embarcação de apoio

Fotografias 3.2 a 3.7 de Pedro M. Rocha (CPRM)



Fotografia 3.8 - Encontro das águas e água do Rio Amazonas

Foto de Pedro M. Rocha (CPRM)



Fotografia 3.9 - Acondicionamento da água coletada para posterior filtragem

Foto de Pedro M. Rocha (CPRM)



Fotografias 3.10 e 3.11- Água do Rio Amazonas

Foto de Pedro M. Rocha (CPRM)



Fotografias 3.12; e 3.13 - Equipamentos usados na coleta d'água

Foto de Pedro M. Rocha (CPRM)

Atualmente, a entidade gerente da rede hidrometeorológica nacional é a ANEEL, que possui um banco de dados hidrometeorológicos de referência da região amazônica, homogeneizado pelo projeto HiBAm. São 339 estações pluviométricas, 246 estações fluviométricas e 60 estações sedimentométricas e de qualidade da água. O Projeto HiBAm foi recentemente incluído como Projeto associado ao Programa de Pesquisa "Grande Escala da Bacia Amazônica – LBA", estando inserido nas componentes biogeoquímica e hidrometeorologia deste programa (<http://www.ird.org.br/hibam.htm>).

A partir dos resultados obtidos nas estações de referência do programa HiBAm, pode-se se observar que o fluxo sedimentar é bastante variável ao curso de um ciclo hidrológico, isso desde os Andes peruanos até a estação de Óbidos, onde a área de

drenagem alcança cerca de 5 milhões de km². Os balanços de massa de montante para jusante, atestam a existência de áreas de retenção de sedimentos, principalmente nas zonas de inundação do piemonte andino e ao longo das várzeas, provavelmente sob controle estrutural dos "arcos" amazônicos (DUNNE et al., 1998; in FILIZOLA, 1999). A obtenção de uma nova tecnologia em medição de quantidade de sedimentos em suspensão, a partir do sinal de retorno acústico de um ADCP comercial, muito contribuirá no avanço dessas pesquisas.

A seqüência de fotos abaixo (Fotografias 3.14 a 3.16) serve para ilustrar como são feitas as coletas de água que servirão para obtenção dos dados de concentração, granulometria e pH, entre outros:



Fotografias 3.14; 3.15 e 3.16 - Coleta d'água

Fotos de Pedro M. Rocha (CPRM)

Capítulo 4

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 – Considerações iniciais

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. Os sedimentos carregam nutrientes e materiais potencialmente tóxicos; o transporte de sedimentos é um mecanismo de redistribuição destes materiais dentro do próprio sistema. Uma alta concentração de material em suspensão pode limitar a transmissão da luz e isto inabilitar (ou impossibilitar) o processo de fotossíntese. Some-se a isso a deposição de sedimentos em canais navegáveis, que necessitariam de constantes dragagens para manter sua navegabilidade. Desta forma, o conhecimento de Concentrações de Sólidos em Suspensão (SSC) é extremamente necessário para começar a entender esse processo e, para isso, medições quantitativas, mesmo apresentando propriedades fortemente variáveis e difíceis de serem mensuradas, devem ser realizadas.

O uso de instrumentos óticos *in situ*, de maneira que sensores e transmissores óticos sejam capazes de estimar de forma indireta o SSC, apresentam o inconveniente de serem sensíveis às variações de concentração de natureza biológica na água.

Coletar e analisar amostras de água é uma maneira de se ter diretamente a SSC, sem interferências de natureza biológica; entretanto, isso requer um trabalho árduo e tende, na maioria das vezes, não mostrar todas as variáveis naturais presentes em materiais em suspensão.

Metodologias capazes de caracterizar sedimentos presentes na água, onde existe uma rotina de coleta e posterior análise das amostras de água colhidas, estão bem estabelecidas (GARTNER & GRAY, 2003; WILDE & RADTKE, 1998; EDWARDS & GLYSSON, 1999; YUQUIN, 1989). Entretanto, estes métodos tradicionais estão sendo, de uma maneira geral, abandonados em favor de uma melhor acurácia, do menor custo e de maneiras seguras de gravações contínuas de dados, tanto *in situ* quanto em laboratório, para obter dados que quantifiquem a SSC e outras características sedimentares que estejam presentes numa amostra d'água. Monitorar as propriedades óticas de uma massa d'água, como a turbidez ou o retroespalhamento ótico, são os métodos mais comuns para se obter dados de pureza e para se estimar a SSC. Outras técnicas substitutas para medição de sedimentos, incluindo as que se baseiam no sinal de retorno acústico, na difração a LASER, na digital foto-ótica e diferença de pressão, estão sendo usadas (GRAY et al., 2003). Algumas dessas técnicas ainda permitem medir características de tamanho dos sedimentos em suspensão (GARTNER & GRAY, 2003).

A busca por um método aceitável para coleta de dados de sedimentos que consiga aliar baixo custo, facilidade de operação e disponibilidade no mercado e, ao mesmo tempo, produza dados confiáveis e com uma resolução espacial e temporal necessária, representa um vasto campo de estudo. São vários os métodos empregados, conforme listados a seguir, onde, quando possível, serão descritas: as características de operação; as dimensões das partículas que podem ser medidas; o limite de concentração

para que a técnica em questão possa ser empregada; importantes limitações e vantagens; e a acurácia potencial, quando conhecida. Ressalta-se que ênfase maior será dada ao método acústico, onde será focado este trabalho; os demais, apenas serão mencionados, seguidos de uma referência, caso haja o interesse de se aprofundar no assunto.

4.1.1 – Retroespalhamento Ótico (OBS)

Um feixe infravermelho ou de luz visível é direcionado a um certo volume de amostra d'água onde uma porção de luz será retroespalhada, caso haja a presença de partículas em suspensão. Uma série de fotodiodos posicionados ao redor da fonte emissora detecta a luz retroespalhada. Uma calibração empírica é usada para converter o retroespalhamento luminoso em concentração. A medida do volume varia de acordo com a turbidez, porém, é empregado na ordem de centímetros cúbicos. Aparelhos OBS estão prontos e disponíveis no mercado e são relativamente baratos. A variação do tamanho de partícula para melhor operação deve estar entre 200-400 μ m e pode ser empregado para concentração superior a 100g/l (BLOCK & ROSEMBERG, 1994).

4.1.2 – Transmissão Ótica

A luz deve ser direcionada a um volume amostral onde os sedimentos presentes irão absorver e/ou espalhar uma porção dessa luz incidente. Um sensor em posição oposta à fonte de luz medirá a atenuação sofrida pelo feixe luminoso. Através de técnicas de calibração, é possível se determinar a concentração de sedimentos presentes na amostra em questão. O tamanho do volume medido varia de acordo com a geometria do dispositivo. Transmissores óticos são relativamente baratos. (CLIFFORD et al., 1995).

4.1.3 – Reflectância do feixe focado

Um feixe laser é focado em um ponto de dimensões reduzidas ($< 2\mu\text{m}$) do volume amostral submetido à uma intensa rotação, fazendo com que o feixe luminoso encontre partículas que reflitam uma porção dessa luz incidente. O tempo de duração desse evento é usado para determinar o tamanho da partícula responsável pelo espalhamento do feixe laser. Aqui é possível se determinar partículas entre $1\text{-}1000\mu\text{m}$ para concentrações entre $0,010\text{-}50\text{g/l}$. Maiores informações podem ser obtidas em PHILLIPS & WALLING (1995).

4.1.4 – Difração LASER

Um feixe laser é direcionado a um volume amostral, onde as partículas presentes na suspensão irão espalhá-lo, absorvê-lo ou o refletir. A luz do laser espalhada é recebida por um detector ou uma sequência de detectores, que permitirão medir o ângulo de espalhamento do feixe. O tamanho da partícula pode ser calculado a partir do conhecimento deste ângulo. Baseando-se nas concentrações medidas de tamanho das partículas, pode-se eliminar sua correlação com a granulometria. Aplica-se a partículas entre $1,25\text{-}250\mu\text{m}$ (para caminho ótico de $2,5\text{cm}$) ou $2,5\text{-}500\mu\text{m}$ (para caminho ótico de $5,0\text{cm}$) e concentrações superiores a 5g/l . Apesar de disponíveis no mercado, são dispositivos de custo elevado. Para maiores informações, pode-se consultar AGRAWAL & POTTSMITH, (1994).

4.1.5 – Nuclear

Esta técnica baseia-se na atenuação ou retroespalhamento da radiação, costumeiramente raios X ou gama, no sedimento. Através de calibrações práticas, pode-se converter esse retroespalhamento em concentração, variável entre 0,5-12g/l. O volume medido depende da geometria do instrumento. Esses dispositivos não são comumente encontrados no mercado e há pouca evidência que possam ser empregados em regimes fluviais (MCHENRY et al., 1967).

4.1.6 – Reflectância espectral

Esta técnica está baseada na relação entre a quantidade de radiação, geralmente na faixa do visível ou infravermelho, refletida por uma porção d'água. A radiação é medida por um dispositivo que trabalha com espectômetros, que pode ser portátil ou instalado em uma aeronave ou satélite. O tamanho da área medida é muito maior que os outros métodos já citados, variando de m^2 a Km^2 . Esta técnica é mais adequada a ambientes marinhos ou em outras situações onde variações de concentração ocorram em grandes áreas de interesse que, por isso, devam ser observadas (NOVO et al., 1989).

4.1.7 – Digital Ótico

Um dispositivo de mudança acoplado (CCD, na sigla em inglês) grava uma mistura sedimento/água “*in situ*”. Esta gravação pode analisar a forma, o tamanho e a concentração das partículas de sedimentos em suspensão. Pode-se, ainda, confirmar visualmente a natureza dos sedimentos. Recentes progressos computacionais, principalmente na área de tecnologia de imagens, devem expandir o uso deste método.

Uma de suas restrições diz respeito ao tamanho do volume de sua medição, pois está condicionado à penetração da luz na água (GOODING, 2001).

4.1.8 – Pressão diferencial

Um transdutor por pressão diferencial é usado para determinar diferenças no peso específico de um tipo de sedimento em relação a água, quando comparado com a água em relação à superfície, onde tem baixa concentração de sedimentos. Esta diferença de pressão pode ser usada para determinar a quantidade de concentração de sedimento em suspensão entre dois braços de mar. O tamanho do volume medido dependerá da diferença de pressão existente entre o transdutor diferencial, enquanto o alcance de concentração depende da sensibilidade deste transdutor. O hardware usado é fácil de ser operado e relativamente barato. Mudanças no gradiente de temperatura, turbulências e concentração de sólidos dissolvidos podem afetar as medições (LEWIS & RASMUSSEN, 1996).

4.1.9 –Tubo vibrante

A água é agitada através de um tubo vibrante num suporte estacionário. A frequência da vibração é afetada pela densidade da água no tubo e pode ser usada para determinar a concentração de sedimentos. Entretanto, outros fatores, como temperatura, fragmentos das paredes do próprio tubo e, ainda, a concentração de sólidos dissolvidos, também afetam de forma severa a frequência de vibração. Todos esses fatores podem ser considerados quando se deseja melhorar a acurácia das medições realizadas. Este método apresenta melhores rendimentos para concentrações acima de 1g/l. (SKINNER, 1989).

4.1.10 –Acústico

Sensores acústicos, rotineiramente usados na medição de séries de velocidade da água, superam algumas das dificuldades apresentadas nos métodos anteriormente descritos e trazem a promessa de ser um medidor de quantitativo estimado de SSC a partir da intensidade do ABS, como um produto das medições de velocidade. Uma vantagem adicional da técnica acústica é que o sinal de retorno é tal que não nos traz a medição em um simples ponto, mas sim uma série de perfis de dados.

Estudos iniciais usando a técnica acústica obtiveram resultados qualitativos, como, por exemplo, SCHOTT & JOHNS (1987), FLAGG & SMITH (1989) & HEYWOOD et al. (1991). Experimentos de laboratório destinados a estimar ABS para concentração de areias foram conduzidos por THORNE et al. (1991) e LOHRMANN & HUHTA (1994). HANES et al., (1988) usaram um dispositivo acústico de 3MHz para estimar concentração de areia em suspensão nas proximidades da ilha Prince Eduard, e THEVENOT et al (1992) desenvolveram parâmetros de calibração como parte de um estudo que visava monitorar material dragado nas proximidades de Tylers Beach, na Virgínia (E.U.A), usando ADCP. HAMILTON et al. (1988) fizeram um estudo onde comparava os métodos óticos e acústicos, descrevendo medições de sedimentos coesivos, monitorando acusticamente sedimentos em suspensão e THEVENOT & KRAUS (1993) fizeram a mesma comparação usando um ADCP de 2.400 kHz, no estuário de Chesapeake. Esta é apenas uma listagem parcial de pesquisas em campo; entretanto, em geral, estudos qualitativos prévios têm sido realizados, usando grãos *in natura*, ou partículas de areia com tamanhos pré-determinados. Alguns estudos fizeram uso de sensores acústicos não comerciais, especialmente desenhados com essa

finalidade. Alguns necessitaram de calibrações em laboratório ou foram usados por curto intervalo de tempo. Outros não contabilizavam perdas acústicas ocorridas nas proximidades do transdutor. Recentemente, GLENN et al (1999), BYRNE & PATINO (2001), GARTNER & CHENG (2001) e GARTNER (2004) descreveram técnicas para estimar séries temporais de SSC utilizando ADCPs comerciais padrão. Ressalta-se que o objetivo fundamental aqui apresentado é a obtenção de perfis de concentração e, embora possível, o potencial uso de sensores acústicos para estimar distribuição de tamanho de sólidos em suspensão excede o escopo do presente trabalho.

A fundamentação teórica dessa técnica baseia-se no fato de que pulsos curtos (aproximadamente 10 μ s) de som de alta frequência (1-5MHz) são emitidos a partir de um transdutor e direcionado a um volume a ser medido. O sedimento em suspensão irá fazer com que parte desse feixe sonoro retorne à origem. A força com que esse sinal retorna, *a priori*, nos permitirá calcular a concentração de sedimentos existentes no volume ensonificado, uma vez que a amplitude do sinal de retorno dependerá da concentração, do tamanho das partículas e da frequência acústica empregada. Através do uso de múltiplas frequências, pode-se determinar a concentração e o tamanho de partículas existentes nessa amostra. Pelo uso de frequências ultra-sônicas, o tamanho das partículas a serem medidas pode variar entre 62-2000 μ m (WREN, 2002), e a experiência prática diz que a região onde há o sinal de retorno apresentado de uma forma linear, dentro de uma acurácia de 1-2dB, corresponde à uma concentração de sedimentos variando entre 1-10.000mg/l (LOHRMANN, 2001). Como a tecnologia acústica se encontra em desenvolvimento, ainda não existe sistema software/hardware plenamente confiável capaz de determinar acusticamente perfis de concentração de sedimentos à venda no mercado (WREN, 2002).

A possibilidade de se usarem instrumentos acústicos para medição ou obtenção de perfis de concentração de sedimentos em suspensão, baseia-se nos estudos realizados por THORNE et al. (1991); HAY & SHENG (1992), entre outros, que apresentaram a base matemática capaz de, usando técnicas de inversão, a partir de uma intensidade sonora medida no receptor, como resultado de um espalhamento do feixe acústico, ocorrido no interior de um volume ensonificado, poder inferir concentração de massa dos espalhadores responsáveis pelo eco captado na fonte emissora.

Essas medições apresentam como vantagem o fato de serem não-intrusivas e muito menos susceptíveis às interferências biológicas que as medições feitas por instrumentos óticos, além de possibilitar a obtenção de perfis de séries de intensidade acústica do sinal retroespalhado (ABS) aperfeiçoadas pela resolução temporal estimada de concentrações de sólidos em suspensão (SSC).

O sucesso de estimar a SSC a partir da ABS traz uma grande promessa que esta técnica possa ser aperfeiçoada, de maneira a permitir seu uso para que, a partir de instrumentos comerciais que usam o doppler acústico (ADCPs, por exemplo), seja possível determinar a concentração de sólidos em suspensão. Este trabalho busca contribuir para que essa possibilidade se torne realidade.

4.2 - Metodologia acústica

Aqui, será apresentada a fundamentação teórica, como conduzida por THORNE & STUART (1991) que usaram transceptores com frequências entre 0,35 e 3,5MHz e demonstraram, baseados nos resultados práticos de seus experimentos, que ao se fazerem medições do sinal de retorno emitido, a partir de espalhadores esféricos, em

diferentes tamanhos e concentrações, aquelas guardavam grande semelhança com o resultado obtido fazendo-se uso da formulação matemática por eles proposta.

Num segundo momento, serão mostradas as perspectivas de uso de ADCPs comerciais para obtenção de perfis de concentração de sedimentos em suspensão, como uma evolução natural da teoria já existente, conforme trabalhos publicados por HAY & SHENG (1992); HAMILTON & ZHANG (1998); GARTNER & CHENG (2001); GARTNER (2004); entre outros.

4.2.1 - O uso do sinal retroespalhado para obtenção de concentração de massa

Na década passada, o interesse no movimento dos sedimentos foi focado em detalhar correntes, a ação de ondas e a combinação dos seus efeitos no transporte de sedimentos. Para examinar a influência destes processos, requer-se técnicas de medições que tenham resoluções suficientes para resolver os mecanismos de interesse. Normalmente, medidores de correntes eletromagnéticas (ECM) são empregados para medidas de escoamento, embora dispositivos acústicos de deriva no tempo (ATT - *Acoustic Travel Time*) e Anemômetros Doppler a Laser (LDA), tenham ganhado atenção. Para medir sedimentos em suspensão, os sensores MOB (*Miniature Optical Backscatter*) e o ABS (*Acoustic BackScatter*) estão sendo aplicados. O ABS é potencialmente a melhor técnica que, através do uso de um único instrumento de medida não intrusivo, é capaz de obter a concentração de sedimentos em suspensão com uma resolução espacial de ± 1 cm e temporal de $\pm 0,1$ segundo, resolução esta suficiente para examinar turbulências e como se comporta o sedimento no interior da massa d'água. O princípio dos dispositivos acústicos é que um transceptor emite um pulso de

alta frequência (normalmente megaHertz com duração de $10\mu\text{s}$), que se propaga para baixo através da coluna d'água. Se algum material está em suspensão, quando o som passa através da água, uma proporção da onda incidente pode retornar. O retorno deste eco pode ser usado para estimar a concentração de sedimentos em suspensão.

Hoje, uma interpretação aproximada dos dados do ABS pode ser conduzida a partir de uma série de exercícios de calibração em laboratório, com várias concentrações de sedimentos e dimensões de partículas, de forma a se desenvolver um algoritmo para transformar observações acústicas em parâmetros de sedimentos (JANSEN, 1978). Desta maneira, detalhados experimentos e tempo têm sido consumidos em laboratório, e apenas dão informações limitadas sobre os espalhadores, sendo difícil extrapolar para outras frequências ou configurações experimentais. Além disso, um pouco de prudência é requerida ao estipular a acurácia de medidas de concentração obtidas no meio ambiente marinho, quando comparados com calibrações de laboratório. Entretanto, estas pesquisas podem não ser necessárias e maior confiança pode ser encontrada com dados de sedimentos obtidos se o *backscatter* de suspensões puder ter uma precisão descrita teoricamente. Para examinar a interação do som com as suspensões, foram realizadas uma série de medidas usando aparelhos de diferentes frequências, tanto em laboratório quanto *in situ*. As observações em laboratório são usadas para calibrar as descrições teóricas no processo de espalhamento acústico e prover um estimador que possibilite aumentar a certeza da aproximação acústica. Tais resultados são aplicados aos dados na tentativa de obter uma confiável estimativa da quantidade de material em suspensão. Para avaliar a exatidão das técnicas acústicas no meio ambiente, observações independentes da carga em suspensão foram obtidas usando amostras que, na maioria das vezes, foram bombeadas para o interior de um tanque, em um ambiente controlado, e medidas simultaneamente com dados acústicos.

4.3 – Formulação matemática

Neste Capítulo serão apresentadas apenas as principais fórmulas que possibilitam o cálculo da concentração de sedimentos em suspensão a partir do sinal de retorno acústico. A formulação aqui apresentada, permite uma potencial aproximação, com altas resoluções espaço-temporais, na medição de sedimentos em suspensão e como se dá o transporte desse sedimento em processos turbulentos. Entretanto, podem-se fazer inferências erradas se variações ou flutuações do sinal de retorno não forem computadas ou se não retratarem com exatidão as oscilações do meio ensonificado. Isto é particularmente importante quando se desejam mostrar flutuações na concentração de sedimentos para se especificar o fenômeno da floculação, onde várias partículas, de tamanhos distintos, se unem e passam a espalhar o feixe sonoro como se uma única partícula fosse, podendo, na maioria dos casos, deslocar a resposta do sinal acústico de um lado para outro da curva de Rayleigh.

Atente-se que os estudos têm sido conduzidos para prognosticar a pressão do sinal de retorno, embora, para cálculo de SSC, 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. Esta concentração é obtida a partir da equação (4.1), conforme mostrada a seguir:

$$M(r) = K_1^2 e^{4r\alpha} \quad (4.1)$$

sendo:

$$K_l = \frac{\langle P_{rms} \rangle}{P_o r_o} \frac{r \psi}{(\langle |f_m^2| \rangle)^{1/2}} \left\{ \frac{16 \langle a_s \rangle \rho_s}{3 \pi c} \right\}^{1/2} \left[\int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{2J_1(ka_s \sin \theta)}{ka_s \sin \theta} \right\}^4 \sin \theta d\theta \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

onde:

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s$$

$$\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \xi(r) M(r) dr = \text{atenuação feita pelo sedimento}$$

α_w = atenuação feita pela água

$\langle P_{rms} \rangle$ = raiz quadrada de pressão por *ensemble*

M = concentração de massa por unidade de volume

α_s = densidade da partícula

$\rho(a_s)$ = função de densidade de probabilidade do tamanho da partícula.

P_o = pressão de transmissão num raio r_o (normalmente = 1m)

a_s = raio da partícula

r_o = distância da partícula

D = função de diretividade do transceptor

k = número de onda

w = frequência angular

f_m = função de forma. Descreve a propriedade de espalhamento da partícula

$$\left[\int_0^{\pi/2} \frac{\{2J_1(ka_t \sin \theta)\}^4 \sin \theta d\theta}{ka_t \sin \theta} \right]^{1/2} \approx \frac{1}{1.05ka_t}$$

J_1 = função de primeira ordem de Bessel, que descreve a diretividade usual do transceptor empregado;

a_t = raio de transceptor;

θ = ângulo do eixo acústico

c = velocidade do som na água;

τ = duração do pulso;

Ψ = termo usado para modificar a dependência do alcance de acordo com a distância ao transceptor;

$\varepsilon = 2$; e

$r_n = \pi a_t^2 / \lambda$, sendo λ o comprimento da onda acústica.

Observa-se que para obter $M(r)$, faz-se necessário saber o seu próprio valor, pois, a partir de um valor inicial, é possível calcular α_s . Isto requer um procedimento onde, seqüencialmente, $M(r)$ é calculado e uma integração numérica é conduzida para avaliar α_s , repetindo-se esse cálculo passo-a-passo através da coluna de água, possibilitando, assim, a obtenção dos perfis de concentração de material sólido em suspensão.

Após a apresentação dessa formulação matemática básica, com a finalidade de facilitar compreensão e a execução de trabalhos futuros, pode-se, então, dividir em três, as maneiras de 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”. A denominação dos dois primeiros já está consagrada na literatura e a bibliografia aqui apresentada é suficiente para se iniciar os estudos relacionados à esses métodos; já em relação ao “método prático”, essa

denominação está sendo usada, uma vez que a literatura pesquisada não apresenta nenhum outro nome para definir o trabalho apresentado por DEINES (1999).

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; já no segundo caso, 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.

Já o método prático, permite o cálculo dos perfis de concentração de sedimentos a partir de dados fornecidos pelo próprio fabricante do equipamento e de outros que são introduzidos na formulação apresentada pelo próprio usuário.

Os três métodos foram usados para cálculo de perfis de concentração de massa e os resultados constam do Capítulo 6 deste trabalho.

4.4 – O Método Explícito

Toda informação proveniente de um ADCP, pode ser vista como uma variação do padrão de voltagem do próprio equipamento. Assim, tem-se:

$$V_{rms} = \frac{k_s k_t}{\Psi r} M^{1/2} e^{-2r\alpha} \quad (4.3)$$

Onde:

$$k_s = \frac{\langle f \rangle}{\sqrt{\langle a_s \rangle} \rho_s} \quad (4.4)$$

$$k_t = RT_v \frac{0.96 P_0 r_0}{k a_t} \left\{ \frac{3\sigma c}{16} \right\}^{1/2} \quad (4.5)$$

- V_{rms} = voltagem gravada;
- r = distância da fonte emissora à partícula;
- k_t = constante de calibração do sistema;
- $\langle a_s \rangle$ = distribuição média de tamanho das partículas;
- ρ_s = densidade das partículas em suspensão;
- α = $\alpha_w + \alpha_s =$ atenuação total;
- α_w = coeficiente de atenuação da água;
- α_s = coeficiente de atenuação do sedimento;
- Ψ = fator de modificação devido à distância;
- f = função de forma; e
- R = Sensibilidade de recepção do transdutor

A constante de espalhamento (k_s), depende do tamanho, da forma e da densidade da partícula. Já a denominada constante de calibração do sistema (k_t), deve ser vista como um valor de ajuste, e não como uma constante na concepção da palavra, uma vez que,

nominalmente, poderá apresentar um valor único ou variar com a distância, como será mostrado em detalhes posteriormente.

A partir daí, se existe uma concentração de massa em suspensão, para uma distância r e as propriedades do espalhamento do meio são conhecidas, é possível computar a voltagem do sinal de retorno. Este é o problema direto, mas o que interessa de fato, nesse caso, é o problema inverso, ou seja, dado o sinal de retorno, gravado como uma variação do padrão original do equipamento, é possível determinar a concentração de massa do sedimento em suspensão responsável por provocar essa variação de padrão no sinal original. Assim, o problema inverso agora é dado por:

$$M_0 = \left\{ \frac{V_{rms} \Psi r}{k_s k_t} \right\}^2 e^{4r\alpha} \quad (4.6)$$

Com isso, chega-se a uma expressão que pode ser usada para computar a concentração de massa presente em uma suspensão. Note-se que isso não será um cálculo direto, pois a resolução dessa equação só se torna possível com características detalhadas acerca da água e do próprio espalhador. As informações adicionais necessárias à compreensão da equação acima (equação 4.6) podem ser encontradas no Anexo B.

Este método é usado apenas para uma única frequência e quando for válida a suposição que $\langle a_s \rangle$ é constante com a profundidade (isto é, a distribuição de tamanho de partículas é constante acima do leito) e que a análise de dados se dá nas proximidades do transdutor. Se essas premissas são válidas, pode-se, calcular Diretamente os perfis de concentração de massa. Se por outro lado não for possível assumir $\langle a_s \rangle$ como constante, mas essa granulometria for conhecida de acordo com a profundidade (variação das

distâncias), então, a partir de algumas medições de referências, é possível computar os perfis de concentração de massa.

No método descrito acima, o resultado obtido é o perfil de concentração de massa sobre todo o conjunto de distâncias de uma mesma vertical. Pode-se ver que essa formulação calcula a massa para cada *bin* de maneira individualizada, seguindo-se de um processo iterativo onde simplesmente para calcular o próximo *bin*, é necessário o cálculo do anterior.

4.5 – O Método Implícito

A aproximação implícita também usa a equação (4.6), mas só que de uma forma direta. O problema principal para o uso dessa formulação é que existe uma redundância onde se faz necessário conhecer a concentração de massa para calcular a atenuação feita pela suspensão para, a partir daí, calcular a concentração de massa presente na suspensão. Para resolver isso, faz-se a seguinte aproximação: assume-se que para uma distância zero a atenuação feita pelo sedimento pode ser desprezada, possibilitando, assim que a fórmula possa ser resolvida. Feito isso, ou seja, calculando-se a primeira massa, então parte-se para a distância (r_l) do *bin* seguinte e assim, sucessivamente, como demonstrado abaixo:

Assumindo-se $\alpha_s \approx 0$, então $M\xi < 1$.

$$M_0 = \left\{ \frac{V_{rms} \Psi r}{k_s k_t} \right\}^2 e^{4r\alpha_w} \quad (4.7)$$

Se não é possível fazer a aproximação que $\alpha_s \approx 0$ para toda a coluna d'água, então um método iterativo deve ser usado, da seguinte maneira: admite-se $\alpha_s \approx 0$ para a primeira distância que se deseja calcular e aplica-se a equação (4.7) para encontrar a massa inicial

em suspensão. Feito isso, calcula-se α_s e com o resultado obtido, é possível calcular um novo α , uma vez que é válida a seguinte equação: $\alpha = \alpha_w + \alpha_s$; agora, de posse desse novo valor, calcula-se novamente a massa em suspensão para o próximo *bin*, aplicando a equação abaixo (4.8):

$$M_1 = M_0 e^{4r\alpha_s} \quad (4.8)$$

Encontrada M_1 , repete-se o procedimento para o cálculo de α_2 e assim, sucessivamente, até percorrer toda a coluna d'água.

Conforme o caso, quando se faz uso de uma única frequência, se a atenuação feita pelo sedimento pode ser assumida como zero então a fórmula pode ser usada diretamente. Se não é possível assumir α_i e α_j sejam = a zero, então deve-se aplicar a aproximação implícita.

4.6 – O Método Prático

O ADCP tipo BroadBand, quando comparado ao NarrowBand, possui a vantagem de ter muito menos flutuações randômicas de corrente ou do próprio sinal de retorno. Essa flutuação se deve ao posicionamento randômico dos espalhadores dentro da coluna d'água ensonificada. Dependendo de como os ecos individuais são arranjados, eles podem ser somados ou subtraídos, formando, assim, um eco combinado, que é o sinal de retorno. Para um sistema NarrowBand, a resultante da pressão do sinal de retorno segue a distribuição de Rayleigh e sua potência, a distribuição chi-quadrada com dois graus de liberdade

(exponencial). A flutuação randômica para um sistema NarrowBand está em cerca de 4,6 dB, enquanto que essa flutuação, na prática, para o sistema BroadBand, não chega a 1 dB.

Os sistemas da RDI, tanto Narrow, quanto BroadBand, possuem seus sinais de saída proporcionais ao logaritmo da potência do eco recebido. Os dados de saída do sistema NarrowBand são fortemente dependentes da temperatura; dessa forma, para se ter com exatidão informações da intensidade do sinal de retorno, se faz necessário conhecer a temperatura do receptor. Já os sistemas BroadBand, não possuem esse inconveniente, porém há uma grande correlação entre a variação do sinal de retorno e o fator de escala usado pelo fabricante. O ADCP BroadBand também grava a corrente e a voltagem, permitindo estimar a potência de transmissão, os quais são requeridos para se estimar a intensidade do sinal de retorno.

Um sinal emitido por um ADCP é espalhado pela matéria em suspensão, como plâncton, sedimentos, bolhas de ar, a superfície ou o próprio fundo. Correlacionar a intensidade de um eco com os espalhadores presentes na água, requer o conhecimento de uma série de variáveis, tais como a potência de transmissão; as características acústicas do transdutor; a resultante do beam acústico; a atenuação causada pelas perdas na propagação (incluindo as perdas por absorção e por espalhamento), além das propriedades do próprio receptor.

Para se usar os dados provenientes de um eco, requer-se o conhecimento das características do receptor. Fazendo-se um gráfico do sinal de entrada *versus* a potência do sinal estimado (Figura 4.2), ver-se que a curva apresentada possui duas características distintas, uma é sua inclinação (K_c) e a outra é uma pequena oscilação ou “*ripple*”. Devido às diferentes inclinações possíveis, para se obter uma boa e confiável medição, este (K_c) deve ser usado. Se esse cuidado não for tomado, a intensidade do sinal de retorno poderá

estar alterada em até 20dB, e o erro acrescentado pelas oscilações do sinal ficará em torno de $\pm 1,5$ dB, que poderá ser reduzido se os dados forem obtidos a partir da distribuição de Rayleigh. Ressalta-se que a inclinação da curva (K_c) independe da temperatura e que as variações inerentes às oscilações podem ser desprezadas. Ambos os métodos requerem que a variação do grau de inclinação da curva seja removida.

A capacidade de recepção e o ruído próprio do equipamento (N), são facilmente calculados a partir de suas características e é dado por:

$$N = FKTB \quad (4.9)$$

Onde:

F = constante de ruído do equipamento;

K = Constante de Boltzmann's;

T = temperatura absoluta; e

B = banda de ruído do sistema.

Estimated Signal Strength, dBm

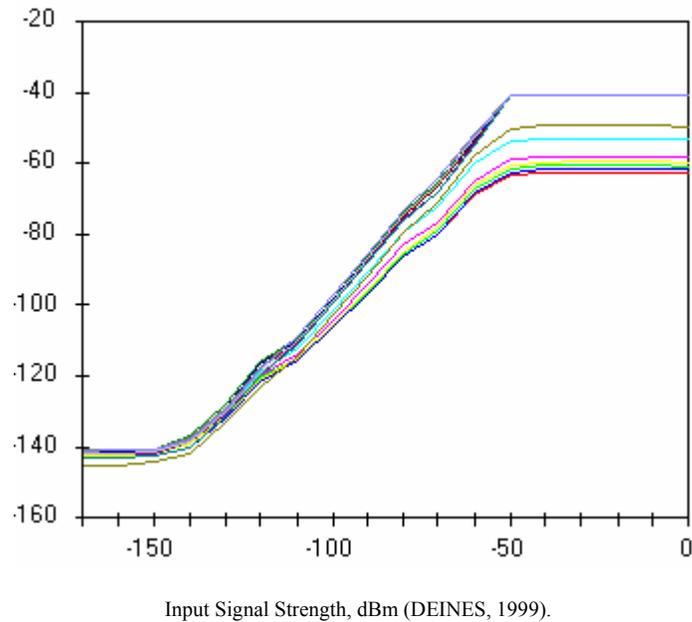


Figura 4.2 – Intensidade do Sinal de Entrada x Intensidade do Sinal Estimado.

Designar fatores absolutos para a intensidade do eco requer um nível de referência confiável, que vai desde o conhecimento das características do sinal de retorno, das características do próprio espalhador, até às informações prestadas pelo fabricante do equipamento. As técnicas de calibração a serem empregadas, irão variar de acordo com o equipamento que está sendo usado.

Além do ruído termal gerado pelo instrumento de pesquisa em seus próprios componentes eletrônicos, existem outros fatores que podem agravar a qualidade do sinal recebido, tais como barulhos provenientes do barco em que o equipamento está instalado (maquinário, propulsores, hidrodinâmicos) ou ainda reverberações que podem até mascarar o ruído próprio do equipamento. Para se avaliar os efeitos da relação destas variáveis com a intensidade do eco, pode-se usar a equação sonar numa apresentação conceitual, onde as variáveis que afetam a potência do eco são introduzidas na seqüência cronológica da

passagem de ida-e-volta do *ping* de um ADCP. Assim, tem-se a equação sonar mostrada, não com base na pressão sonora, como é comumente conhecida, mas sim, pela potência ou energia.

Alguns fenômenos relevantes para o entendimento da intensidade do eco não podem ser medidos independentemente, entretanto a equação (4.10), uma versão trabalhada da equação sonar, foi desenvolvida de maneira que algumas combinações de termos são substituídos por quantidades que podem ser mensuradas, pela fábrica, ou pelo o usuário.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_E E_X}{4\pi} * \frac{G}{R^2} * 10^{-\frac{\alpha R}{10}} * \pi \frac{[R\Phi]^2}{4} * \frac{10^{\frac{S_V}{10}}}{R^2} * 10^{-\frac{\alpha R}{10}} * \frac{G\lambda^2}{4\pi} * E_X * \frac{1}{KT B n F} \quad (4.10)$$

Onde:

$\frac{S}{N}$ = é a razão sinal ruído;

P_E = potência elétrica do transdutor (em W);

E_X = eficiência do transdutor;

G = ganho ou diretividade do transdutor;

R = distância ao espalhador ao longo do *beam* (em m);

α = absorção da água ($\frac{dB}{m}$, ida);

Φ = é o ângulo efetivo (ida-e-volta), da largura de feixe, em radianos;

c = velocidade do som ($m.s^{-1}$);

T = largura do pulso transmitido (s);

S_V = coeficiente do sinal de retorno ($[m.4\pi]^{-1}$);

λ = comprimento da onda transmitida (m);

$K =$ constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$);

$T =$ temperatura do transdutor ($^{\circ}K$);

$B_N =$ largura de banda do ruído;

$F =$ fator de ruído do receptor;

$D =$ diâmetro do transdutor (m);

$S =$ potência do sinal (w);

$N =$ potência do ruído (w);

$K_c =$ fator de escala (dB por *counts*);

$E =$ intensidade do eco (*counts*); e

$E_r =$ ruído recebido (*counts*).

A equação (4.10), é simplificada pelo cancelamento de termos e substituições adequadas, conforme demonstrado abaixo:

$$G = \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4.11)$$

$$\phi^2 = \left(\frac{4\lambda}{\sqrt{2\pi d}} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$t = \frac{2L}{\text{Cos}(\theta)c} \quad (4.13)$$

$$\frac{(S + N)}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{K_c (E - E_r)}{10} \right) \quad (4.14)$$

$$N = KTB_N \quad (4.15)$$

Convertendo tudo para dB, tem-se:

$$S_v = C + 10 \log_{10} ((T_x + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c (E - E_r) \quad (4.16)$$

Onde:

$S_v =$ a potência do sinal de retorno em dB relativos a $(1/4\pi m)$;

$L_{DBM} = 10 \log$ (comprimento do pulso transmitido) em metros(m);

$P_{DBW} =$ 10log (potência transmitida) em Watts(W);

$T_x =$ a temperatura do transdutor em °C;

$R =$ a distância real entre o transmissor e o espalhador em metros(m);

$\alpha =$ o coeficiente de absorção da água em db/m; e

$\theta =$ o ângulo do feixe em relação a vertical, usualmente 20° ou 30°.

$$C = 10 \log_{10} \left(\frac{8KFB_N \cos(\theta)}{\pi E_x^2 d^2} \right) \quad (4.17)$$

Muitos desses parâmetros estão concentrados na variável (C). Exemplos destas variáveis mensuradas pela fábrica ou introduzidas pelo o usuário incluem a potência de transmissão na água e o fator de ruído do sistema, a largura de banda e o diâmetro do transdutor. K_c pode ser medido pela fábrica ou pelo o usuário. A intensidade do eco (E) é

derivada do Indicador de Potência do Sinal Recebido (em inglês, RSSI); em tempo real, o nível de referência (E_s) é mostrado. Pode-se dizer que todo sistema de medição acústica usa algum componente familiar para medição de amplitude do sinal do eco. Este componente tem como saída um sinal que se refere ao RSSI e que é proporcional ao logaritmo da potência do eco e expresso em unidades de dB pelo fator (K_c). A tabela a seguir (Tabela 4.1), mostra a descrição dos termos da equação (4.10). Os termos descritos estão separados por asterisco (*).

Tabela 4.1 – descrição dos termos apresentados na equação (4.10), DEINES (1999).

| TERMO | DESCRIÇÃO |
|-------|--|
| 1 | Densidade de potência de um pulso espalhado esféricamente numa superfície esférica de 1m de raio |
| 2 | Correção para diretividade do transdutor, ajuste para distância (ida) |
| 3 | Correção de absorção para os pulsos transmitidos |
| 4 | Superfície de água instantaneamente ensonificada |
| 5 | Espessura instantânea de água ensonificada |
| 4 x 5 | Volume de água instantaneamente ensonificada |
| 6 | Correção para a intensidade do sinal de retorno (ida) |
| 7 | Correção do sinal de retorno pela absorção |
| 8 | Área de captura do transdutor |
| 9 | Correção para a eficiência do transdutor |
| 1 a 9 | Potência do sinal recebido |
| 10 | Potência do ruído |

Assim, pode-se fazer as seguintes considerações:

Termo (1) – transmissão;

Termos (2, 3) – sinal irradiado;

Termos (4,5,6) – sinal retroespalhado;

Termos (6,7) – eco retornando; e

Termo (8,9) – recepção.

4.6.1 – Passos Necessárias para Calcular o Coeficiente Absoluto do Sinal de Retorno

- 1) Obter as características medidas pela RDI para ADCP *BroadBand*, para cada *beam*;
- 2) Calibrar o nível de referência para intensidade do eco, para cada um dos *beam* E_r (medido em *counts*);
- 3) Obter os parâmetros gravados para cada *ensemble* B, o *blank* após a transmissão (m), a voltagem, a corrente, a temperatura em tempo real do transdutor (graus Celcius), o ângulo do *beam* e a intensidade do eco (E);
- 4) Buscar as variáveis externas relevantes, como o coeficiente de absorção da água (α), e a velocidade do som na água, para cada célula de profundidade por *ensemble* (ms^{-1});
- 5) Determinar a potência de transmissão;
- 6) Calcular as variáveis N (número de células de profundidade que estão sendo medidas na camada de espalhamento) e R (distância verdadeira) na equação (4.16), para cada célula de profundidade;
- 7) Cálculo dos perfis de coeficientes do sinal de retorno (S_v) usando a equação (4.16), em dB, referenciado a $[m \times 4\pi]^{-1}$.

A tabela abaixo (Tabela 4.2), mostra valores típicos de parâmetros relevantes para perfis da RDI. Espera-se um erro de cerca de 3 dB. K_c possui valores entre 0,35 e 0,55 dB.LSB^{-1} , sendo 0,45 dB.LSB^{-1} um valor típico dessa variável.

Tabela 4.2 – Características típicas do sistema usado para se obter estimativas do valor do sinal de retorno a partir de ADCP da RD *Instruments* (DEINES, 1999).

| System Frequency, kHz | Name | C, dB | PdBW | Rayleigh Distance, meters |
|-----------------------|-----------------|--------|------|---------------------------|
| 76.8 | BB DR w HiPwr | -163.3 | 23.8 | 3.15 |
| | BB DR w HiPwr | -163.3 | 23.8 | 3.15 |
| | BB DR w/o HiPwr | -163.3 | 15.4 | 3.15 |
| | BB SC w/o HiPwr | -163.3 | 15.4 | 3.15 |
| | BB VM | -163.3 | 23.8 | 3.15 |
| 153.6 | BB DR w HiPwr | -153.3 | 23.8 | 1.88 |
| | BB DR w HiPwr | -153.3 | 24.0 | 1.88 |
| | BB DR w/o HiPwr | -153.3 | 15.4 | 1.88 |
| | BB SC w/o HiPwr | -153.3 | 15.4 | 1.88 |
| | BB VM | -153.3 | 23.8 | 1.88 |
| 307.2 | BB DR w HiPwr | -148.2 | 15.4 | 2.64 |
| | BB DR w HiPwr | -148.2 | 15.4 | 2.64 |
| | BB DR w/o HiPwr | -148.2 | 15.4 | 2.64 |
| | BB SC w/o HiPwr | -148.2 | 15.4 | 2.64 |
| | BB VM | -148.2 | 15.4 | 2.64 |
| 614.4 | BB DR w HiPwr | -141.4 | 15.4 | 2.90 |
| | BB DR w HiPwr | -141.4 | 15.4 | 2.90 |
| | BB DR w/o HiPwr | -141.4 | 15.4 | 2.90 |
| | BB SC w/o HiPwr | -141.4 | 15.4 | 2.90 |

| | | | | |
|------------|-----------------|--------|------|------|
| | BB VM | -141.4 | 15.4 | 2.90 |
| 1228.8 | BB DR w HiPwr | -129.5 | 12.6 | 1.67 |
| | BB DR w HiPwr | -129.5 | 12.6 | 1.67 |
| | BB DR w/o HiPwr | -129.5 | 12.6 | 1.67 |
| | BB SC w/o HiPwr | -129.5 | 12.6 | 1.67 |
| | BB VM | -129.5 | 12.6 | 1.67 |
| Workhorse: | | | | |
| 76.8 | WH Long Ranger | -159.1 | 24.0 | 1.30 |
| 307.2 | WH Sentinel | -143.5 | 14.0 | 0.98 |
| | WH Monitor | -143.0 | 14.0 | 0.98 |
| 614.4 | RioGrande | -139.3 | 9.0 | 1.96 |
| 1228.8 | WH Sentinel | -129.1 | 4.8 | 1.67 |
| | WH Monitor | -129.1 | 4.8 | 1.67 |

E_r é simplesmente o valor RSSI, quando não há sinal presente. Ele pode ser obtido a partir do RSSI para o final de um perfil ou apenas colocando o transdutor em um recipiente com água suficiente para cobri-lo e enviando um comando PT3 (usando valores altos de ganho). Para sistemas de 600 e 1200 kHz, tomando-se cuidado de não haver interferências de estações de rádio, sistemas de baixa frequência ou ruído do navio, um típico valor de E_r é 40 counts.

A seguir, faz-se necessário decodificar B , L e D , T_x , voltagem, corrente e E da estrutura de dados. A intensidade do eco (E), é comumente chamada de Indicador de Potência do Sinal Recebido (RSSI, na sigla em inglês), pela literatura do fabricante dos ADCPs *BroadBand* (RDI). (E) é uma informação de saída para cada célula de profundidade, por cada *beam*. Note-se que se houver múltiplos *pings* por *ensemble* (como é

o caso), a saída do ADCP é a média aritmética do log da intensidade do eco ($\log E$). A setagem para gravação dos dados de RSSI, voltagem e corrente transmitidos, estão disponíveis no cabeçalho do texto, quando da saída dos resultados.

Deve-se inserir na equação (4.16) as variáveis que são dependentes do meio, como a absorção feita pela água. Pode-se usar valores típicos para ADCP BroadBand, ou se fazer uso de dados de um CTD, para se ter maior precisão no cálculo de α . A tabela abaixo (Tabela 4.3), mostra valores típicos para a absorção feita pela água a 4°C, para diferentes frequências de ADCP.

Tabela 4.3 - Valores de α para a água a 4°C, para diferentes frequências de ADCP.

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Freq (kHz) | 75 | 150 | 300 | 600 | 1200 |
| α , dB/m | 0.027 | 0.044 | 0.069 | 0.153 | 0.480 |

Com relação à velocidade do som (c), a princípio, ela é a mesma para toda a coluna d'água, e depende da temperatura e da salinidade. Se não for possível fazer essa aproximação, faz-se necessário determinar correções para a variável (c) ao longo de todo o perfil, uma vez que o cálculo das distâncias será fortemente influenciado pelo valor que for usado como representativo da velocidade do som na água.

Para serem obtidos dados absolutos do sinal de retorno, a potência de transmissão precisa ser estimada. A tabela (4.2) mostra a potência de transmissão esperada para ADCP *BroadBand* de fabricação da RDI (valores em W). Em geral, essa potência é proporcional à voltagem de entrada (dBV). Alguns sistemas *BroadBand* de baixa frequência possuem um módulo de alta potência que remove a dependência da voltagem.

A determinação da distância real, onde está havendo o espalhamento na camada d'água é dado por:

$$R = \left[\frac{B + \left(\frac{L+D}{2} \right) + ((N-1)xD) + \frac{D}{4}}{\cos(\theta)} \right] \times \frac{c'}{c_1} \quad (4.18)$$

Onde:

$\frac{D}{4}$ é usado, pois para o *BroadBand* ADCP, as amostras da intensidade do eco são colhidas no último quarto de cada célula e não no centro;

Para ser usado no termo de perdas por espalhamento ($20 \log(R)$); sendo que R não é menor que $\frac{\pi R_0}{4}$, onde R_0 é a distância de Rayleigh, como mostrado na Tabela (4.2);

Já c' é a média da velocidade do som do transdutor à célula de profundidade;

O termo c_1 representa a velocidade do som usada pelo instrumento em suas medições;

Calcula-se a absorção para cada célula de profundidade, α_n , como $\frac{2\alpha D}{\cos(\theta)}$, onde α é o coeficiente de absorção para a respectiva profundidade;

Computa-se o valor de $2\alpha R$ por:

$$2\alpha R = \frac{2\alpha_p B}{\cos(\theta)} + \sum_{n=1}^b \alpha_n \quad (4.19)$$

onde:

α_p é o coeficiente de absorção para o perfil, B é o comprimento do *blank* é o número de células de distâncias.

Para cada *ensemble*, calcula-se S_v para cada célula de profundidade ao longo de cada *beam*. A tabela a seguir (Tabela 4.4), mostra valores típicos de S_v , medidos na costa de San Diego, Estados Unidos:

Tabela 4.3 - Valores típicos de S_v .

| | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| Freq (kHz) | 75 | 150 | 300 | 600 | 1200 |
| S_v (dB) | -92 | -86 | -80 | -74 | -70 |

Se o que se deseja é usar os dados de perfis de intensidade do sinal de retorno, para se estimar ou interpolar, dados de concentração (como é o caso), há uma mudança na estratégia de uso dessas equações, pois não mais se quer determinar S_v , mas sim $C_v = 10 \log_{10}(\text{concentração})$. Assim, não é mais necessário usar o sistema de ruído de fundo para calibração, pois o dado de concentração é usado em seu lugar. C não mais é usado como definido em (4.16), mas sim como:

$$C = C_v - 20 \log_{10}(R) - 2\alpha R + L_{DBM} + P_{DBW} \quad (4.20)$$

Onde:

A princípio, a simbologia é a mesma como anteriormente mostrada

R é a distância onde a amostra d'água foi coletada;

L_{DBM} e P_{DBW} são os valores que foram usados quando a amostra de água foi adquirida;

$$C_v = 10 \log(\text{concentração da amostra de água})$$

Para calcular C_V , usa-se:

$$C_V = C + 20 \log_{10}(R) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c (E - E_R) \quad (4.21)$$

Onde o cálculo é feito da mesma forma que mencionado anteriormente, apenas atentando para o fato que E_r é o valor de E quando e onde a amostra d'água foi colhida.

Capítulo 5

ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

No estudo de transporte de sedimentos em cursos d'água, comumente admite-se que as partículas finas em suspensão ($<60\mu\text{m}$) apresentam uma concentração uniforme da superfície ao fundo (GUY & NORMAN, 1976: in FILIZOLA, 2003). Na verdade, o gradiente de concentração para as partículas em suspensão nos rios, é diretamente proporcional a velocidade de queda das partículas e inversamente proporcional à velocidade de cisalhamento (NORDIN & MCQUIVERY, 1971: in FILIZOLA, 2003). Assim, as partículas muito finas, em escoamento turbulentos, apresentam um gradiente de concentração fraco; esta hipótese é utilizada para justificar a coleta de superfície em escoamentos turbulentos com grandes velocidades.

Além dessas considerações, outras foram levadas em conta, quando da escolha do trecho a ser considerado da leitura do perfil de intensidade do sinal de retorno para as diferentes estações. Foram descartadas as leituras próximas a superfície, devido ao “branco” do próprio equipamento e aquelas muito próximas ao fundo, pois a grande concentração de sedimentos inviabiliza que sejam feitas considerações sobre essa área, uma vez que a experiência adquirida em estudos anteriores indica que a região de caráter linear, onde o comportamento do sinal está relacionado com a concentração de sedimentos e não com o tamanho das partículas presentes, corresponde a uma região com concentração variando entre 1 e 10.000mg/l (LOHMANN, 2001), o que se torna uma possível explicação para os inúmeros casos onde não há indicação de leituras da intensidade do sinal de retorno nas proximidades do fundo, ou seja, não seria a ausência

de sinal, mas sim o excesso devido as seguidas reflexões no material em suspensão, em alta concentração, que impossibilita o equipamento de processar de forma precisa a informação colhida.

Outro fator a ser considerado foi o número de iterações realizadas em cada leitura, isto porque para se obter 5% de acurácia em P_{rms} (intensidade do sinal medido), se faz necessário um número mínimo de 100 observações independentes, o que apresentará, ao final, uma precisão de cerca de 10% em M (massa) (THORNE et al.,1992).

Após essas considerações, são apresentados os dados que foram considerados para obtenção dos perfis de concentração de massa, assim como foram obtidos por JULIEN NICOD para sua tese de doutorado. Ressalta-se, mais uma vez, que esses dados não foram colhidos com a finalidade específica deste trabalho, mas os dados de intensidade gravados pelo ADCP, indicam a possibilidade de relacioná-lo com o transporte de sedimentos, o que encoraja futuros estudos, em especial a correlação entre a intensidade do sinal de retorno (*backscatter*) e a concentração de matéria em suspensão, objetivo deste trabalho, mas que de forma alguma encerra os estudos nessa área.

5.1 – Cálculo do coeficiente de atenuação da água (α_ω)

A absorção é um tipo de perda que obedece a uma lei diferente de variação com o alcance, quando relacionada com as perdas devido ao espalhamento. Ela envolve um processo onde a energia acústica é convertida em calor e representa a perda real de energia acústica para o meio no qual ocorre a propagação, reduzindo, dessa forma a intensidade do eco, como um resultado de um processo de interação físico-químico entre o feixe acústico e água. Sabe-se que a absorção no oceano é maior que a presente em água doce, que por sua vez, é maior que a da água pura, principalmente por causa dos

sais e outros elementos dissolvidos na água *in natura*, seja ela do mar ou não. Essas perdas são proporcionais às distâncias e às frequências envolvidas.

A primeira medição do coeficiente de absorção da água foi feita durante os anos de 1931 e 1934 por STEPHENSON, a partir da transmissão de um pulso senoidal entre um navio de superfície e um submarino submerso. Com o início da Segunda Guerra mundial, várias medições foram realizadas em diferentes regiões do oceano, nas frequências de interesse sonar, aqui destacam-se as pesquisas relacionadas pela *University of California Division of War Research*, e após, aquelas realizadas por Wilson & Leonard, que usaram o decaimento do som em esferas de vidros excitadas com vibrações em um de seus modos naturais.

Pode-se entender a absorção a partir do momento em que uma onda acústica plana passa por um meio absorvente e uma certa fração dessa intensidade sonora é perdida em cada pequena unidade de distância percorrida.

Assim, se a intensidade para uma dessas distâncias é I , a perda de intensidade dI numa pequena distância adicional dx é dada por:

$$\frac{dI}{I} = -n dx \quad (5.1)$$

Onde n é a constante de proporcionalidade, e o sinal menos indica que dI é uma mudança negativa da intensidade. A partir de uma integração entre as distâncias r_1 e r_2 , nota-se que I_1 e I_2 se correlacionam pela seguinte equação:

$$I_2 = I_1 e^{-n(r_2 - r_1)} \quad (5.2)$$

Aplicando-se log na base 10 na equação anterior, obtém-se:

$$10 \log I_2 - 10 \log I_1 = -10n(r_2 - r_1) \log_{10} e \quad (5.3)$$

Escrevendo $\alpha = 10n \log_{10} e$, a mudança de nível entre as distâncias r_2 e r_1 torna-se:

$$10 \log I_2 - 10 \log I_1 = -\alpha(r_2 - r_1) \quad (5.4)$$

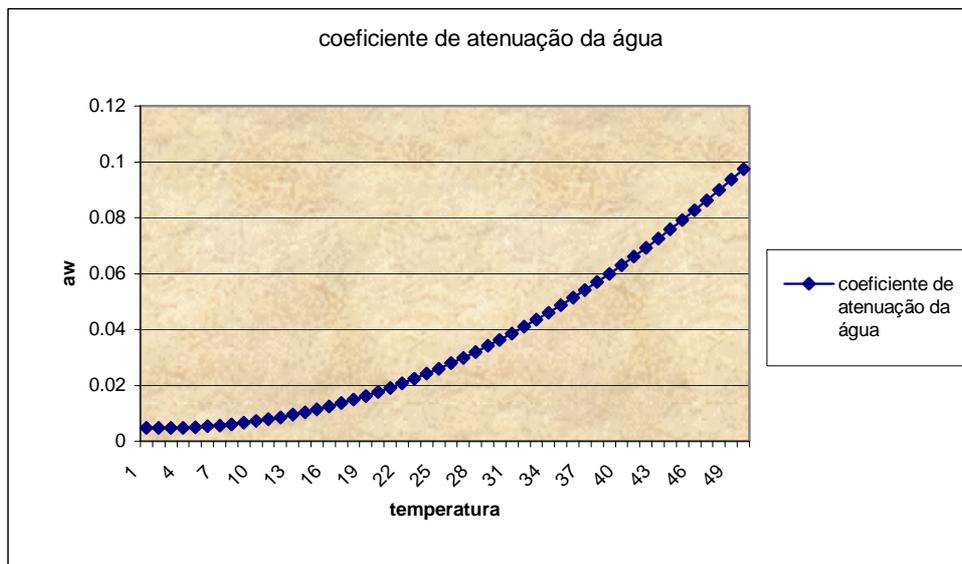
Ou ainda:

$$\alpha = \frac{10 \log I_1 - 10 \log I_2}{r_2 - r_1} \quad (5.5)$$

O valor α indica o coeficiente de absorção logarítmica (para a base 10), e é expresso em decibéis por kilojardas (dB/kyd) e significa que para cada kilojarda transmitida, a intensidade é diminuída por absorção em cerca de α dB.

Vários são os fatores que influenciam o valor desse coeficiente de absorção, entre eles podemos citar a temperatura, a presença de sais dissolvidos e a frequência empregada, entre outros. O gráfico abaixo (Gráfico 5.1) mostra os valores do coeficiente de absorção da água para um frequência de 300kHz, segundo a equação proposta por FISHER & SIMMON'S (1977), e modificada por THORNE et al. (1991), onde $\alpha_\omega = (55,9 - 2,37T + 47,7 \times 10^{-2}T^2 - 3,84 \times 10^{-4}T^3) \times 10^{-3}f^2$, sendo T a temperatura em graus Celsius, f a frequência em MHz e α_ω dado em nepers/m.

Gráfico 5.1 - Coeficiente de atenuação da água em função da temperatura.



Ressalta-se que o valor de α_ω usado para efeito de cálculos, neste trabalho, é aquele sugerido pelo fabricante, neste caso $\alpha_\omega = 0,139$.

5.2 – Arquivos de Intensidade, Concentração das Amostras e Granulometria das Amostras

Assim como o coeficiente de atenuação da água, outro importante fator a ser considerado é a granulometria das partículas presentes no meio, pois estas serão responsáveis pelo espalhamento do feixe acústico.

Para este trabalho foi considerado um total de 29 amostras com dados de granulometria em 16 estações distintas, coletadas entre os dias 18 de novembro de 2001 e 24 de junho de 2002. Os arquivos completos estão disponíveis em meio digital (Anexo C) e, para facilitar a sua compreensão em trabalhos futuros, eles obedecem a seguinte formatação:

Nome do arquivo do tipo: **nomeestação_freq_data (ddmmaa)_CI.txt**

Colunas

- 1: vertical i;
- 2: profundidade média na vertical i, ou profundidade (fundo) medida pelo ADCP no momento da coleta da amostra;
- 3: profundidade da amostra;
- 4: intensidade sem correção absorção;
- 5: intensidade com correção;
- 6: concentração material fino (< 63 μm);
- 7: concentração areia (> 63 μm);
- 8: concentração total.

A partir desses dados, foi calculado, para cada uma das estações, o coeficiente ka (produto do número de onda pelo raio da partícula em suspensão), considerando-se o diâmetro médio, o D50 e a frequência do ADCP empregado quando da obtenção dos perfis de intensidades para o cálculo de vazão.

As estações, com suas respectivas datas de coleta de água, estão listadas na tabela abaixo (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 – Estações e Datas onde houve coleta de dados.

| NÚMERO | ESTAÇÃO | DATA | RIO |
|---------------|----------------------|-------------|------------------|
| 01 | BORBA | 09/03/02 | MADEIRA |
| 02 | FOZ MADEIRA | 29/11/01 | MADEIRA/AMAZONAS |
| 03 | FOZ MADEIRA | 20/06/02 | MADEIRA/AMAZONAS |
| 04 | HUMAITÁ | 05/03/02 | MADEIRA |
| 05 | IRACEMA | 29/11/01 | MADEIRA |
| 06 | IRACEMA | 10/03/02 | MADEIRA |
| 07 | IRACEMA | 20/06/02 | MADEIRA |
| 08 | ITAPEUA | 16/06/02 | SOLIMÕES |
| 09 | MANACAPURU | 27/11/01 | SOLIMÕES |
| 10 | MANACAPURU | 27/02/02 | SOLIMÕES |
| 11 | MANACAPURU | 18/06/02 | SOLIMÕES |
| 12 | MANICORÉ | 08/03/02 | MADEIRA |
| 13 | NOVA OLINDA DO NORTE | 01/12/01 | MADEIRA |
| 14 | ÓBIDOS | 05/12/01 | AMAZONAS |
| 15 | ÓBIDOS | 13/03/02 | AMAZONAS |
| 16 | ÓBIDOS | 23/06/02 | AMAZONAS |
| 17 | ÓBIDOS | 24/06/02 | AMAZONAS |
| 18 | PARINTINS | 09/12/01 | AMAZONAS |
| 19 | PARINTINS | 12/03/02 | AMAZONAS |
| 20 | SÃO PAULO OLIVENÇA | 19/11/01 | SOLIMÕES |
| 21 | SÃO PAULO OLIVENÇA | 11/06/02 | SOLIMÕES |
| 22 | SANTO ANTÔNIO DO IÇÁ | 12/06/02 | SOLIMÕES |
| 23 | TABATINGA | 18/11/01 | SOLIMÕES |
| 24 | TABATINGA | 06/06/02 | SOLIMÕES |
| 25 | TEFÉ | 23/11/01 | SOLIMÕES |
| 25 | TEFÉ | 15/06/02 | SOLIMÕES |
| 27 | URUCURITUBA | 10/03/02 | MADEIRA |
| 28 | VISTA ALEGRE | 30/11/01 | MADEIRA |
| 29 | VISTA ALEGRE | 09/03/02 | MADEIRA |

Os gráficos que representam as curvas granulométricas em função da profundidade e da intensidade do sinal de retorno, bem como das concentrações de sedimentos obtidas, estão anexos a esta tese (Anexo D). Cabe ressaltar que, devido a coleta ter ocorrido em diferentes ciclos hidrológicos, há uma grande variação nas

profundidades máximas de cada estação, acarretando, assim, que a mesma estação, numa mesma vertical, mas em data diversa, apresente profundidade distinta para as coletas que foram realizadas. Com a finalidade de facilitar a representação no mesmo gráfico de diferentes campanhas, as profundidades estão normalizadas em porcentagem da máxima profundidade encontrada quando do momento em que foi colhida a amostra d'água para obtenção dos dados de granulometria. Apenas para ilustrar, são apresentados dois gráficos: no primeiro (Gráfico 5.2) é mostrado o comportamento do diâmetro médio (μm) e no segundo (Gráfico 5.3), o D50 (μm) para a estação Óbidos em quatro diferentes coletas de dados para três campanhas distintas, ocorridas entre 05 de dezembro de 2001 e 24 de junho de 2002; em ambos, a profundidade está normalizada, como uma razão entre a profundidade em que foi realizada a coleta da amostra d'água e a profundidade máxima no local, medida no mesmo instante pelo ADCP, variando, portanto, de zero a 1.

Gráfico 5.2 – Diâmetro médio em função da profundidade normalizada

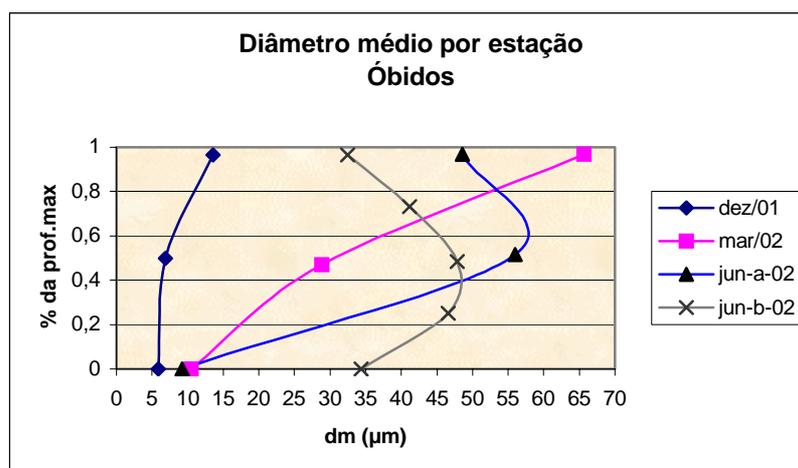
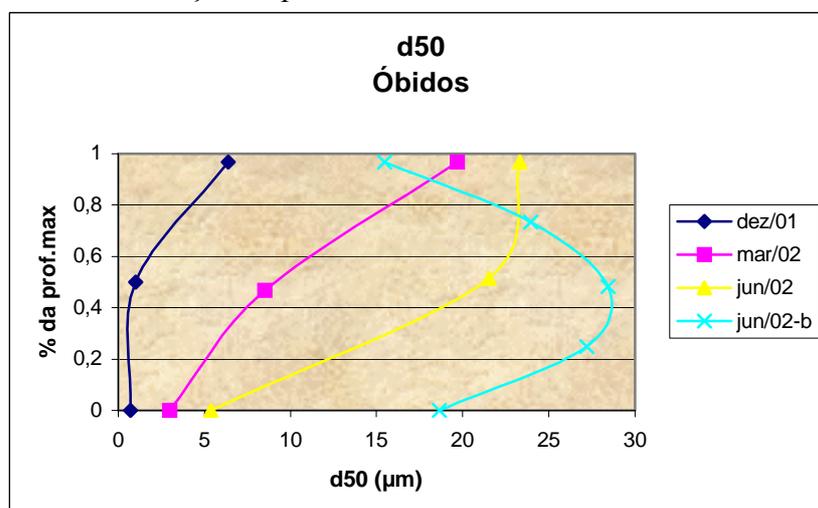


Gráfico 5.3 – D50 em função da profundidade normalizada



Os valores de diâmetro médio e D50 foram calculados para cada estação e constam da tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Valores do diâmetro médio e do D50 por estação.

| NÚMERO | ESTAÇÃO | ADCP | DATA | Dm (µm) | D50(µm) |
|--------|-------------|------|----------|---------|---------|
| 01 | BORBA | 300 | 09/03/02 | 41.832 | 7.5977 |
| | | | | 22.009 | 6.5135 |
| | | | | 10.113 | 4.9022 |
| 02 | FOZ MADEIRA | 300 | 29/11/01 | 7.2987 | 4.3342 |
| | | | | 11.13 | 5.1972 |
| | | | | 3.8074 | 0.5127 |
| 03 | FOZ MADEIRA | 300 | 20/06/02 | 22.024 | 1.0978 |
| | | | | 17.051 | 5.3691 |
| | | | | 9.393 | 4.0876 |
| 04 | HUMAITÁ | 300 | 05/03/02 | 22.024 | 1.0978 |
| | | | | 17.051 | 5.3691 |
| | | | | 9.393 | 4.0876 |
| 05 | IRACEMA | 300 | 29/11/01 | 13.468 | 2.9634 |
| | | | | 8.1424 | 1.932 |
| | | | | 2.5827 | 0.4904 |
| 06 | IRACEMA | 300 | 10/03/02 | 7.1969 | 2.1776 |
| 07 | IRACEMA | 300 | 20/06/02 | 36.844 | 22.971 |
| | | | | 34.868 | 21.433 |
| | | | | 21.164 | 15.193 |
| 08 | ITAPEUA | 300 | 16/06/02 | 95.195 | 82.797 |
| | | | | 40.344 | 24.579 |
| | | | | 14.059 | 13.222 |
| 09 | MANACAPURU | 300 | 27/11/01 | 13.408 | 5.7871 |
| | | | | 11.665 | 3.2954 |
| | | | | 5.6364 | 0.6104 |
| 10 | MANACAPURU | 300 | 27/02/02 | 21.426 | 10.162 |
| | | | | 8.8863 | 0.8514 |
| 11 | MANACAPURU | 300 | 18/06/02 | 31.922 | 21.658 |
| | | | | 43.535 | 26.673 |
| | | | | 25.758 | 16.946 |
| 12 | MANICORÉ | 300 | 08/03/02 | 20.923 | 4.4982 |
| | | | | 16.735 | 3.9511 |
| 13 | N. O. NORTE | 300 | 01/12/01 | 14.433 | 3.3848 |
| | | | | 13.384 | 1.0902 |
| | | | | 7.0885 | 0.5752 |

| | | | | | |
|----|----------------|-----|----------|--------|--------|
| 14 | ÓBIDOS | 300 | 05/12/01 | 13.603 | 6.3897 |
| | | | | 6.8765 | 1.0186 |
| | | | | 5.9194 | 0.7023 |
| 15 | ÓBIDOS | 300 | 13/03/02 | 65.647 | 19.679 |
| | | | | 28.861 | 8.5069 |
| | | | | 10.465 | 4.9803 |
| 16 | ÓBIDOS | 300 | 23/06/02 | 48.562 | 23.326 |
| | | | | 55.997 | 21.523 |
| | | | | 9.2528 | 5.3744 |
| 17 | ÓBIDOS | 300 | 24/06/02 | 32.448 | 15.474 |
| | | | | 41.162 | 23.937 |
| | | | | 47.797 | 28.415 |
| | | | | 46.568 | 27.205 |
| | | | | 34.35 | 18.647 |
| 18 | PARINTINS | 300 | 12/03/02 | 37.433 | 9.049 |
| | | | | 16.835 | 5.3811 |
| | | | | 10.534 | 4.1627 |
| 19 | PARINTINS | 300 | 09/12/01 | 11.36 | 4.9957 |
| | | | | 9.1503 | 4.2346 |
| | | | | 4.902 | 0.7606 |
| 20 | SP OLIVENÇA | 300 | 19/11/01 | 71.772 | 27.943 |
| | | | | 21.997 | 3.2961 |
| | | | | 13.87 | 0.6236 |
| 21 | SP OLIVENÇA | 300 | 11/06/02 | 61.003 | 31.091 |
| | | | | 47.726 | 25.457 |
| | | | | 17.641 | 9.2501 |
| 22 | S. ANT. DO IÇÁ | 300 | 12/06/02 | 79.935 | 43.742 |
| | | | | 80.944 | 39.441 |
| | | | | 9.6785 | 8.7939 |
| 23 | TABATINGA | 300 | 18/11/01 | 50.68 | 26.514 |
| | | | | 25.634 | 7.048 |
| | | | | 14.801 | 4.8932 |
| 24 | TABATINGA | 300 | 06/06/02 | 21.584 | 10.525 |
| | | | | 23.495 | 10.776 |
| | | | | 14.675 | 8.4051 |
| 25 | TEFÉ | 300 | 23/11/01 | 30.638 | 5.6726 |
| | | | | 11.113 | 2.2471 |
| | | | | 7.4206 | 0.6053 |
| 26 | TEFÉ | 300 | 15/06/02 | 74.594 | 44.685 |
| | | | | 73.235 | 44.279 |
| | | | | 23.003 | 15.497 |
| 27 | URUCURITUBA | 300 | 10/03/02 | 22.841 | 5.6086 |

5.3 – A Curva de Rayleigh

A partir desses valores de granulometria, foi calculado o valor para o produto entre o raio do grão ensonificado e o número de onda (ka), de acordo com a formulação apresentada por Rayleigh (equação 5.6), a fim de se saber em que posição na curva proposta por ele (Figura 5.1), se encontra cada combinação de granulometria e frequência usada.

$$ka = \frac{2\pi}{\lambda} a \quad (5.6)$$

onde: a = raio do grão ensonificado e k é o número de onda.

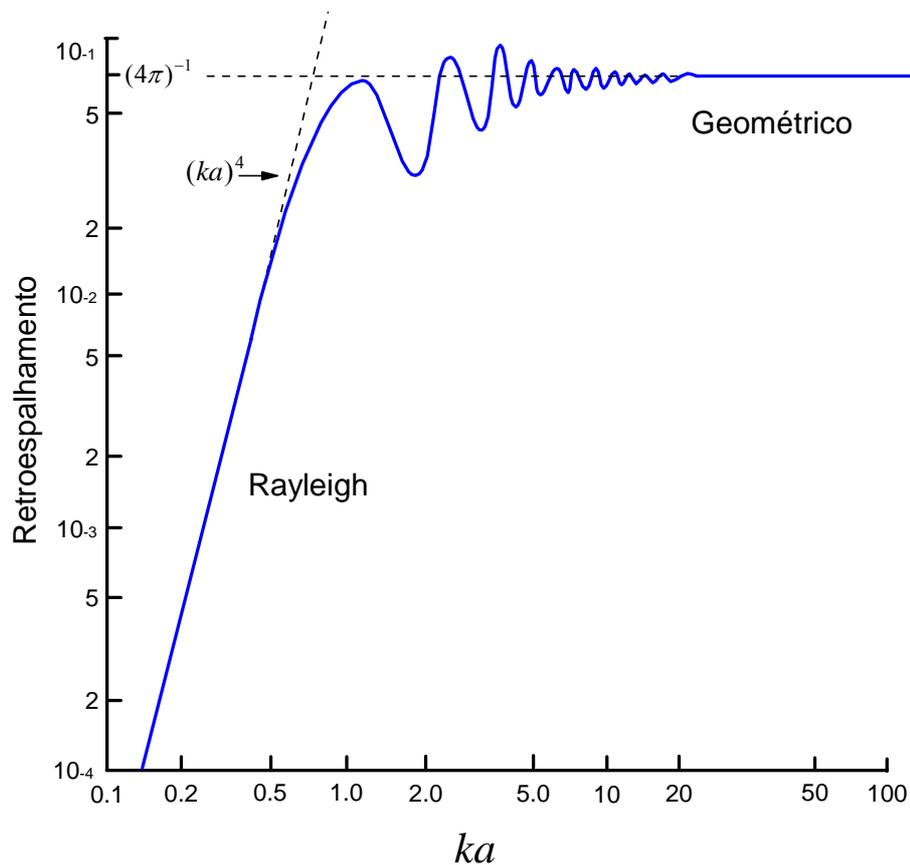


Figura 5.1 - Curva de Rayleigh

Os resultados obtidos são apresentados na tabela a 5.3. Ressalta-se que nenhuma das combinações de frequência e raio da partícula resultou em valores maiores que a unidade, o que significaria estar localizada no lado geométrico da referida curva.

Tabela 5.3 – Produto entre o raio do grão ensonificado e o número de onda.

| NÚMERO | ESTAÇÃO | ADCP | DATA | Ka (dm) | Ka (D50) |
|--------|-------------|------|----------|-------------|-------------|
| 01 | BORBA | 300 | 09/03/02 | 0.000438067 | 7.95631E-05 |
| | | | | 0.000230482 | 6.82089E-05 |
| | | | | 0.000105899 | 5.13356E-05 |
| 02 | FOZ MADEIRA | 300 | 29/11/01 | 9.91673E-05 | 4.64542E-05 |
| | | | | 9.49465E-05 | 3.44112E-05 |
| | | | | 7.73929E-05 | 1.39128E-05 |
| 03 | FOZ MADEIRA | 300 | 20/06/02 | 7.64324E-05 | 4.53876E-05 |
| | | | | 0.000116556 | 5.44255E-05 |
| | | | | 3.98709E-05 | 5.36926E-06 |
| 04 | HUMAITÁ | 300 | 05/03/02 | 0.000230633 | 1.14962E-05 |
| | | | | 0.000178553 | 5.62249E-05 |
| | | | | 9.83638E-05 | 4.28054E-05 |
| 05 | IRACEMA | 300 | 29/11/01 | 0.000141037 | 3.10327E-05 |
| | | | | 8.52673E-05 | 2.02322E-05 |
| | | | | 2.70457E-05 | 5.13558E-06 |
| 06 | IRACEMA | 300 | 10/03/02 | 7.53663E-05 | 2.28038E-05 |
| 07 | IRACEMA | 300 | 20/06/02 | 0.000385833 | 0.000240556 |
| | | | | 0.000365139 | 0.000224449 |
| | | | | 0.000221629 | 0.000159097 |
| 08 | ITAPEUA | 300 | 16/06/02 | 0.000996881 | 0.000867045 |
| | | | | 0.000422481 | 0.00025739 |
| | | | | 0.000147226 | 0.000138457 |
| 09 | MANACAPURU | 300 | 27/11/01 | 0.00014041 | 6.06029E-05 |
| | | | | 0.00012216 | 3.45097E-05 |
| | | | | 5.90239E-05 | 6.39229E-06 |
| 10 | MANACAPURU | 300 | 27/02/02 | 0.000224371 | 0.000106416 |
| | | | | 9.30573E-05 | 8.91574E-06 |
| 11 | MANACAPURU | 300 | 18/06/02 | 0.000334282 | 0.000226805 |
| | | | | 0.000455903 | 0.000279315 |
| | | | | 0.000269733 | 0.000177459 |
| 12 | MANICORÉ | 300 | 08/03/02 | 0.000219108 | 4.71055E-05 |
| | | | | 0.000175252 | 4.1376E-05 |
| 13 | N. O. NORTE | 300 | 01/12/01 | 0.000151145 | 3.54458E-05 |
| | | | | 0.000140162 | 1.14167E-05 |
| | | | | 7.42307E-05 | 6.02298E-06 |
| 14 | ÓBIDOS | 300 | 05/12/01 | 0.000142449 | 6.69134E-05 |
| | | | | 7.20106E-05 | 1.06669E-05 |
| | | | | 6.19884E-05 | 7.3546E-06 |
| 15 | ÓBIDOS | 300 | 13/03/02 | 0.000687451 | 0.000206083 |
| | | | | 0.000302229 | 8.90846E-05 |

| | | | | | |
|----|----------------|-----|----------|-------------|-------------|
| | | | | 0.000109585 | 5.21541E-05 |
| 16 | ÓBIDOS | 300 | 23/06/02 | 0.000508545 | 0.000244265 |
| | | | | 0.0005864 | 0.000225393 |
| | | | | 9.68956E-05 | 5.62808E-05 |
| 17 | ÓBIDOS | 300 | 24/06/02 | 8.49494E-05 | 4.0511E-05 |
| | | | | 0.000107762 | 6.26663E-05 |
| | | | | 0.000125133 | 7.43905E-05 |
| | | | | 0.000121915 | 7.12214E-05 |
| | | | | 8.99293E-05 | 4.88169E-05 |
| 18 | PARINTINS | 300 | 12/03/02 | 0.000392003 | 9.47612E-05 |
| | | | | 0.0001763 | 5.63504E-05 |
| | | | | 0.000110309 | 4.35914E-05 |
| 19 | PARINTINS | 300 | 09/12/01 | 0.000118957 | 5.23148E-05 |
| | | | | 9.58224E-05 | 4.43449E-05 |
| | | | | 5.13338E-05 | 7.96503E-06 |
| 20 | SP OLIVENÇA | 300 | 19/11/01 | 0.000751596 | 0.000292619 |
| | | | | 0.000230351 | 3.45173E-05 |
| | | | | 0.000145245 | 6.53048E-06 |
| 21 | SP OLIVENÇA | 300 | 11/06/02 | 0.000638825 | 0.000325588 |
| | | | | 0.000499786 | 0.000266586 |
| | | | | 0.000184737 | 9.68668E-05 |
| 22 | S. ANT. DO IÇÁ | 300 | 12/06/02 | 0.000837082 | 0.000458064 |
| | | | | 0.000847645 | 0.000413023 |
| | | | | 0.000101353 | 9.20897E-05 |
| 23 | TABATINGA | 300 | 18/11/01 | 0.000530719 | 0.000277655 |
| | | | | 0.000268441 | 7.38069E-05 |
| | | | | 0.000154999 | 5.1242E-05 |
| 24 | TABATINGA | 300 | 06/06/02 | 0.000226024 | 0.000110222 |
| | | | | 0.000246037 | 0.00011285 |
| | | | | 0.000153676 | 8.80183E-05 |
| 25 | TEFÉ | 300 | 23/11/01 | 0.000320843 | 5.94033E-05 |
| | | | | 0.000116376 | 2.35321E-05 |
| | | | | 7.77082E-05 | 6.3383E-06 |
| 26 | TEFÉ | 300 | 15/06/02 | 0.000781145 | 0.000467942 |
| | | | | 0.00076692 | 0.000463685 |
| | | | | 0.000240887 | 0.000162285 |
| 27 | URUCURITUBA | 300 | 10/03/02 | 0.000239192 | 5.87334E-05 |

A partir desses resultados, podemos concluir que todas as combinações de frequência e granulometria usadas, quando calculado o ka , reportam para o lado não geométrico da curva de Rayleigh. Infere-se, então, que mesmo não havendo individualmente uma combinação cujo resultado estivesse localizado na parte

geométrica da curva, a soma incoerente do sinal retroespalhado é significativa, fazendo, dessa forma, que a resposta do sinal, como um todo, esteja na região geométrica, possibilitando, assim, que sejam efetuados cálculos de concentração de massa.

5.4 – A Intensidade do Sinal de Retorno

Outro importante fator a ser considerado é a intensidade do sinal de retorno que servirá como parâmetro de entrada nas formulações matemáticas propostas. Para isso, foi usado o resultado obtido como intensidade quando da coleta de dados para obtenção dos perfis de vazão e velocidade da água, nas diversas estações ao longo das campanhas realizadas pelo projeto HiBAm. Estes arquivos estão em formato digital, anexados a esta tese (Anexo E). Para facilitar o uso futuro desses dados, eles seguem a seguinte formatação:

Arquivos de intensidades completas :

Nome do arquivo do tipo : **nomeestação_freq_data (ddmmaa).txt**;

frequência (kHz); Fator de Intensidade de Escala (Intensity scale factor); coeficiente de absorção da água;

número da vertical (numeração a partir da margem esquerda. se tiver 3 verticais : 1, 2, 3; se tiver 5 : 1, 15, 2, 25, 3);

média das profundidade dos 4 beams ; profundidade do beam 1 ; ; beam 4;

Colunas

1: profundidade (m);

2: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) do *beam* 1 com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);

3: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) do *beam* 2 com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);

4: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) do *beam* 3 com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);

- 5: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) do *beam* 4 com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);
- 6: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) dos 4 *beams* com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);
- 7: intensidade média (sobre todas as medições da vertical) dos 4 *beams* sem correção pela absorção da água (com coeficiente de 0);
- 8: número total de medições na vertical;
- 9: intensidade média (sobre todas as medições da vertical que dão uma profundidade próxima à profundidade média na vertical) e média dos 4 *beams* com correção pela absorção (com o valor proposto pelo fabricante);
- 10: intensidade média (sobre todas as medições da vertical que dão uma profundidade próxima à profundidade média na vertical) e média dos 4 *beams* sem absorção (coeficiente zero);
- 11: número total de medições, entrando neste último cálculo o número de medições próximas à profundidade média.

5.5 – Estimativas do sinal de retorno usando ADCP

O ADCP mede a reflexão do sinal sonoro oriundo de uma partícula de matéria presente na água. Este instrumento é, primordialmente, usado para medir a velocidade das partículas no meio, mas ele também pode prover informações sobre a quantidade e as características do espalhador que está dando origem a esse sinal. Essas informações são medidas na forma de intensidade de reflexões recebidas e são gravadas como variações do padrão presente no instrumento gerador de arquivo de dados. Um sinal emitido pelo ADCP é espalhado pelo material em suspensão, como plâncton, sedimentos, bolhas de ar, ou ainda o próprio fundo ou a superfície da área em estudo.

Relacionar a intensidade do eco com os espalhadores presentes na água requer um conhecimento de várias variáveis, tais como:

- potência de transmissão;
- características acústicas do transmissor;
- a resultante do feixe direcional acústico;
- o poder de atenuação causado pelas perdas na propagação (aqui incluídas as perdas relacionadas à absorção e ao espalhamento do sinal sonoro); e
- as características próprias do receptor.

Para se usar os dados provenientes de um eco, a informação acústica tem que ser processada. Este processamento é realizado em três etapas:

- conversão das unidades internas de cálculos em lineares ou logarítmicas;
- normalização das distâncias, isto é, fazer com que os dados independam da profundidade em que eles foram coletados; e
- Normalização instrumental, pois isso possibilita uma análise do dado independente do instrumento usado na sua obtenção.

A normalização de um instrumento sempre se refere a calibração absoluta e é a fase mais complicada de todo o processamento.

Basicamente, são duas as principais maneiras, para se usar os dados provenientes de um eco. Em ambos os casos, são requeridos o conhecimento das características do receptor.

Fazendo-se um gráfico do sinal de entrada em função da potência do sinal estimado (figura 5.2), nota-se que a curva apresentada possui duas características distintas, uma é sua inclinação (K_c) e a outra é uma pequena oscilação (*ripple*). Devido

às diferentes inclinações possíveis, para se obter uma boa e confiável medição, esse K_c deve ser usado. Se esse cuidado não for tomado, a intensidade do sinal de retorno poderá estar alterada em até 20dB, e o erro acrescentado pelas oscilações ou *ripple* do sinal ficará em torno de $\pm 1,5\text{dB}$, que poderá ser reduzido se os dados forem obtidos a partir da distribuição de Rayleigh. Ressalta-se que a inclinação da curva (K_c) independe da temperatura e que as variações inerentes às oscilações podem ser desprezadas. Ambos os métodos requerem que a variação do grau de inclinação da curva (K_c) seja removida. O valor que se mantém constante à esquerda da curva (neste caso, aproximadamente 140), é conhecido como o ruído próprio do equipamento (N).

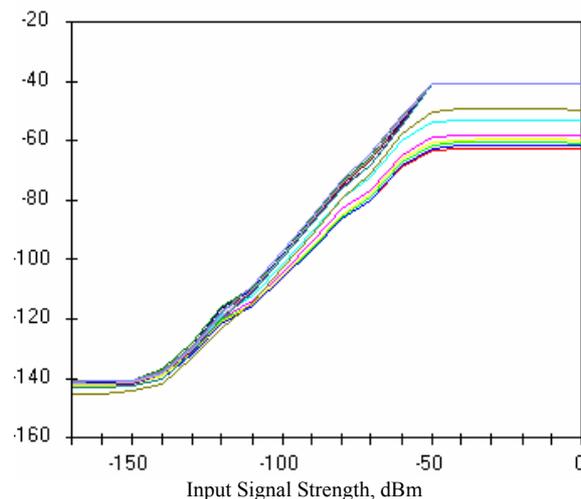


Figura 5.2 – Sinal de entrada em função do sinal estimado (DEINES, 1999)

A capacidade de recepção e o N , são facilmente calculados a partir de suas características e é dado por:

$$N = F.K.T.B \tag{5.7}$$

onde:

F = constante de ruído do equipamento;

K = Constante de Boltzmann's;

T = temperatura absoluta; e

B = banda de ruído do sistema.

Designar fatores absolutos para a intensidade do eco requer um nível de referência confiável, que vai desde o conhecimento das características do sinal de retorno e das características do próprio espalhador, até às informações prestadas pelo fabricante do equipamento.

Além do ruído termal gerado pelo instrumento de pesquisa em seus próprios componentes eletrônicos, existem outros fatores que podem agravar a qualidade do sinal recebido, tais como barulhos provenientes do barco em que o equipamento está instalado (maquinário, propulsores, hidrodinâmicos, etc) ou ainda reverberações que podem até mascarar o ruído do próprio equipamento. Ressalta-se que outros fatores podem influenciar as medições, como os ambientais ou ruídos feitos pelo homem, mas por ocorrerem com menor frequência, são considerados menos importantes. Para se avaliar os efeitos da relação destas variáveis com a intensidade do eco, podemos usar a equação sonar:

$$eco = 10 \log(\alpha) + 10 \log(\alpha') + 10 \log(\beta) + 10 \log\left(\frac{I_o}{I_{ref}}\right) \quad (5.8)$$

Onde:

- α e α' representam as perdas na transmissão sonora;
- I_o é a intensidade acústica do sinal transmitido;
- β é a capacidade que um alvo tem de refletir uma onda sonora incidente (considerando a geometria do alvo); e
- I_{ref} é uma intensidade sonora de referência para a medição do nível da fonte sonora.

Usando a notação comumente adotada pela comunidade científica, temos:

$$eco = SL - 2TL + TS \quad (5.9)$$

Onde:

$SL = \text{nível da fonte} = 10 \log (I_o/I_{ref}) = 20 \log p_o = \text{intensidade (pressão) sonora a 1 metro da fonte em db, tendo como referência } 1\mu Pa;$

$TL = 10\log(\alpha) + 10\log(\alpha')$ = perdas na propagação, geralmente consideradas iguais na ida e na volta e $TL = 20 \log \alpha$

$TS = 10\log(\beta) = 10 \log (I_r/I_{in})$ = razão entre intensidades refletida (medida a 1 metro do alvo) e incidente no alvo; chama-se também de poder de reflexão do alvo (*target strength*).

Alguns fenômenos relevantes para o entendimento da intensidade do eco não podem ser medidos independentemente, entretanto a equação (5.10), uma versão trabalhada da equação sonar, foi desenvolvida de maneira a possibilitar que algumas combinações de termos sejam substituídos por quantidades que podem ser medidas, uns pelo fabricante do instrumento de medição, outros pelo o usuário. Muitos desses parâmetros estão concentrados na variável (C). Exemplos dessas variáveis mensuradas pela fábrica ou introduzidas pelo o usuário incluem a potência de transmissão na água, o fator de ruído do sistema, a largura de banda e o diâmetro do transdutor. O valor de Kc pode ser medido tanto pela fábrica quanto pelo o usuário. A intensidade do eco (E) é derivada do Indicador de Potência do Sinal Recebido ou *Received Signal Strength Indicator* (RSSI); em tempo real, o nível de referência (Es) é mostrado. Pode-se dizer que todo sistema de medição acústica usa algum componente familiar para medição de

amplitude do sinal do eco. Este componente tem como saída um sinal que se refere ao RSSI e que é proporcional ao logaritmo da potência do eco e expresso em unidades de dB pelo fator (Kc). De acordo com instruções técnicas produzidas pela *Nortek*, o alcance dinâmico do sinal é de cerca de 90 dB e ele é linear com uma precisão que varia entre 1 e 2 dB acima de um alcance de 70 dB. Nessa faixa, o fator de escala é cerca de 0,45 counts/dB, mas com alguma variação (cerca de 0,40 a 0,47). Ressalta-se que o ADCP usado nas campanhas de coletas de dados foi fabricado pela *RD Instruments* (RDI) que usa um fator de escala de 0,43 counts/dB, valor esse empregado nos cálculos de normalização do sinal de retorno acústico para o presente trabalho.

Fora do alcance linear, o sinal, conseqüentemente, é não-linear, o que significa dizer que não pode ser usado para análise de sedimentos. Experiências indicam que a região linear corresponde a uma concentração que varia de 1 a 10.000mg/l (LOHRMANN, 2001).

Abaixo, na equação (5.10), uma versão trabalhada da equação sonar, que foi rearranjada para transformar o coeficiente do sinal de retorno (Sv) em decibéis, estão listadas outras importantes variáveis para normalização do sinal recebido:

$$Sv = C + 10 \log((T_x + 273,16)R^2 \cos(\theta)) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + Kc(E - E_r) \quad (5.10)$$

Onde:

Sv é a potência do sinal de retorno em dB relativos a $(1/4\pi m)$;

L_{DBM} é $10 \log$ (comprimento do pulso transmitido) em metros (m);

P_{DBW} $10 \log$ (potência transmitida) em Watts(W);

T_x é a temperatura do transdutor em °C;

R é a distância real entre o transmissor e o espalhador em metros(m);

α é o coeficiente de absorção da água em db/m; e

θ é o ângulo do feixe em relação a vertical, usualmente 20° ou 30°.

Para compensar todo o espalhamento do sinal sonoro ocorrido a uma determinada distância, se faz necessário acrescentar, ao sinal de retorno, as perdas acústicas ocorridas equação (5.11) e, após, converter o sinal em termos de amplitude.

Assim temos como principais perdas:

- o espalhamento acústico (a);
- a absorção pela água (b); e
- a atenuação que a própria partícula impõe ao sinal sonoro(c).

O primeiro termo tem caráter simplesmente geométrico e decorre da forma de cone dos *beams* acústicos. Já o segundo deve-se a transferência molecular de energia acústica em calor e o último ao espalhamento e a absorção da energia irradiada pelas partículas presentes na água.

Dessa forma, transformando estas perdas em termos de dB, é possível formular um “alcance normalizado” da intensidade do eco.

$$EL = Amp * 0,43 + 20 \log_{10}(R) + 2\alpha_w * R + 20R \int \alpha_p * dr \quad (5.11)$$

Onde:

Amp é um parâmetro constante e armazenado nos dados;

R é a distância percorrida pelo sinal acústico;

α_w é a absorção feita pela água em dB/m; e

α_p é a atenuação do sinal sonoro ocorrida na partícula em dB/m.

Sendo:

$$(a) = 20 \log_{10} R ;$$

$$(b) = 2\alpha_w * R ; e$$

$$(c) = 20R \int \alpha_p * dr$$

Relembra-se que a integração se faz necessária, uma vez que a atenuação ocorrida na partícula poderá não ser a mesma em todas as profundidades.

Os termos (a) e (b) contribuem para enfraquecer a potência do sinal com o aumento da distância do transdutor. Essas perdas ocorrem duas vezes, uma vez quando o som penetra no volume de água ensonificado e uma outra quando esse som faz o caminho de volta em forma de eco devido às partículas presentes no meio. Por este motivo, na equação acima temos os índices 2 e 20. O primeiro termo (a) independe da frequência acústica. Ressalta-se que o coeficiente (α_w) varia em função da frequência, salinidade e pressão. De uma maneira geral, a tabela (5.4) mostra a correlação entre a frequência usada e o α_w para a água doce:

Tabela 5.4 – Correlação entre a frequência e o coeficiente de absorção para a água doce.

| Frequência em MHz | α_w (Db/m) |
|-------------------|-------------------|
| 10 | 26.9 |
| 3.0 | 2.4 |
| 1.5 | 0.6 |
| 0.50 | 0.07 |

(LOHRMANN, 2001)

Já para água salgada, ou seja, com um índice de salinidade de 35g/l, a correlação entre a frequência usada e o α_w é o apresentado na tabela (5.5):

Tabela 5.5 – Correlação entre a frequência e o coeficiente de absorção para a água salgada:

| Frequência em MHz | α_w (dB/m) |
|-------------------|-------------------|
| 10 | 26.9 |
| 3.0 | 2.9 |
| 1.5 | 0.7 |
| 0.50 | 0.14 |

(LOHRMANN, 2001)

Para baixas concentrações, a atenuação do som devido às partículas é pequena e por esse motivo o último termo (c) pode ser ignorado.

Para altas concentrações, falhas decorrentes da compensação do termo (c) poderá trazer significativos impactos nos resultados, especialmente nas medições próximas ao fundo quando o instrumento de medição estiver montado em um barco.

Tipicamente são dois os caminhos para se medir a atenuação do sinal devido à interação existente entre a onda sonora e a partícula. Alguns autores simplesmente ignoram o problema, uma vez que para baixas concentrações o termo (c) pode ser desprezado. Esse método deve ser usado com cautela, pois em altas concentrações o erro cometido pode ser significativo. O segundo método baseia-se em assumir um tamanho para as partículas e implementar uma solução iterativa, baseada no próprio

espalhamento e no modelo de atenuação. Muitas pesquisas sérias têm usado este método, em especial onde o tamanho da partícula é conhecido (próximo às praias, por exemplo), uma vez que a granulometria é fator condicionante na reflexão do feixe sonoro.

Uma calibração absoluta requer uma completa caracterização dos circuitos de transmissão e recepção do equipamento. Isto inclui parâmetros como:

- nível do poder de transmissão acústica;
- duração da transmissão de pulso;
- eficiência do transdutor;
- sensibilidade de recepção acústica; e
- sensibilidade dos circuitos à temperatura.

Cada emissão do transdutor poderá apresentar valores diferentes para o nível de potência da transmissão e sua eficiência. Para determinados sistemas o poder de transmissão é tirado da potência bruta (para medições com o máximo valor *doppler* de saída), o nível de voltagem também pode ser fatorado e a partir daí se obter a taxa de transmissão.

O volume dos espalhadores irradiados (Sv), é o produto final desses cálculos. Instrumentos de medidas do retroespalhamento acústico são expressos na intensidade da reflexão relativa a onda incidente para frequências específicas (isto é, 80 a 1.5 MHz). Diferentes frequências acústicas são sensíveis a diferentes tamanhos de partículas. Então se a intensidade do sinal de retorno (*backscatterig*) para uma dada frequência é conhecida, a distribuição de tamanhos de partículas poderá ser conhecida e ainda possibilitar a previsão da intensidade do sinal de retorno para outras frequências.

Em muitas aplicações não são necessárias medições independentes do sinal de retorno. Ao olhar mudanças relativas na concentração, quando a distribuição de partículas possa ser assumida como constante, os dados apenas precisam ser normalizados antes de serem usados. Converter medições de instrumentos independentes é requerida apenas quando são comparados dados de diferentes instrumentos, mesmo que de mesma frequência e potência, pois pode-se esperar variações não maiores que 5dB para dados colhidos em ambientes idênticos. Para comparações com outros instrumentos acústicos, os dados podem ser convertidos para forma de instrumentos independentes como descrito acima. Como regra geral, comparações entre instrumentos diferentes, desde que para mesma frequência, deve se trabalhar com uma incerteza que varia entre 3-5 dB (LOHRMANN, 2001).

Também é possível resolver o problema da calibração simplesmente usando dispositivos calibradores e referir todos os dados a uma medição padrão. Para um dado tipo de partícula e distribuição de tamanho, a forma do volume espalhador é diretamente proporcional a concentração. Assim se a concentração aumenta por um fator de 2, a intensidade do sinal de retorno aumentará pelo mesmo fator, significando que a força do volume espalhador aumentará em 3dB ($10\log 2$). Já para um tipo e tamanho fixo de partícula, instrumentos acústicos como podem ser uma ferramenta poderosa para monitorar concentração de sedimentos. Técnicas de calibração, tanto as de laboratório como as *in situ*, têm sido empregadas com sucesso, permitindo o cálculo direto da concentração de sedimentos por meio de dados acústicos. Assim, pode-se dizer que diferentes frequências acústicas têm diferentes sensibilidade ao tamanho da partícula.

A sensibilidade pode ser definida como a força do espalhamento volumétrico para uma dada concentração. O pico da sensibilidade ocorre quando o produto entre o número de onda pelo raio da partícula é igual a unidade ($ka = 1$), pois nessa condição, a

circunferência da partícula é igual ao comprimento da onda acústica e aí se encontra o limite entre os dois lados distintos da curva de Rayleigh (Figura 5.1). Para partículas que apresentam o fator ka menor que a unidade, a sensibilidade é proporcional ao raio da partícula elevada a quarta potência. Para grandes partículas a sensibilidade é inversamente proporcional ao raio da partícula. Essa teoria possibilita criar um modelo idealizado de sensibilidade às variações de tamanho ou de concentração de partículas, mesmo sabendo que estão sendo negligenciados alguns outros fatores que afetam a potência do sinal de retorno. Mesmo assim, essa base matemática é útil em previsões para qualquer tipo de partículas que serão detectadas por modelos acústicos, ou ainda na análise de dados acústicos.

A partir dessa teoria, criou-se programas de computador (Anexo I) que deram origem aos gráficos de 5.4 a 5.6, para a estação Óbidos, onde foram usadas diferentes frequências num mesmo dia, e por isso mereciam um estudo mais detalhado, uma vez que a resposta do sinal de retorno apresentava uma forte variação em função da frequência do equipamento empregado. Nota-se que ao aplicar as correções para cálculo do Sv, como proposto por DEINES (1999), as curvas passam a ter um comportamento semelhante, demonstrando, dessa maneira, a aplicabilidade da teoria a um caso prático. Observa-se, neste caso, que a frequência de 1200 kHz passa a ter um sinal de retorno mais forte que a de 600kHz, que por sua vez é maior que a de 300 kHz, como era esperado e que não ocorria quando plotava-se apenas o sinal de retorno na unidade do equipamento (counts). Uma vez que há apenas uma experiência desse tipo e não foi possível obter os parâmetros originais de setagem dos equipamentos empregados, além de não dispor dos dados de granulometria e concentração de sedimentos da campanha de aquisição de dados realizada em junho de 2002, entende-se que esses resultados não possam ser considerados conclusivos.

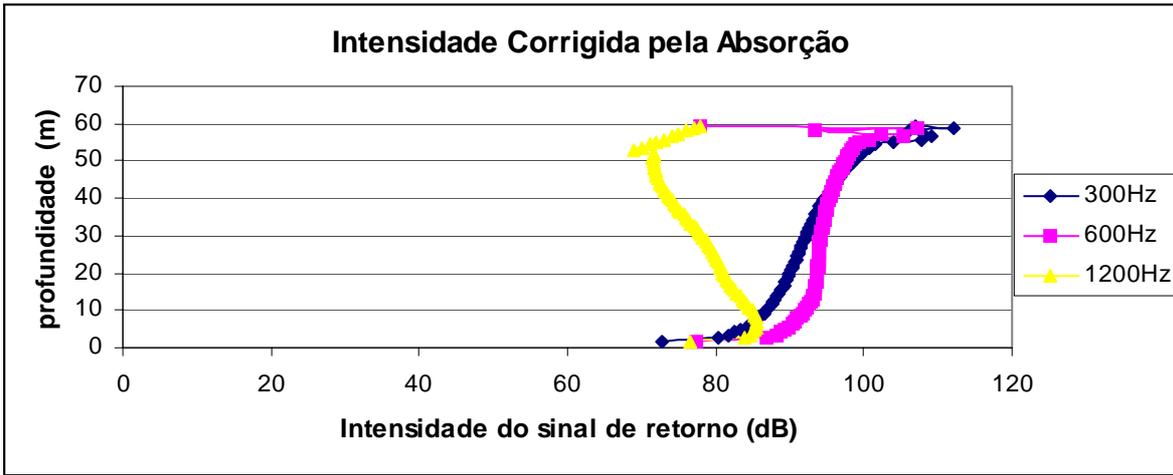


Gráfico 5.4 - frequências de 300, 600 e 1200 kHz com correção

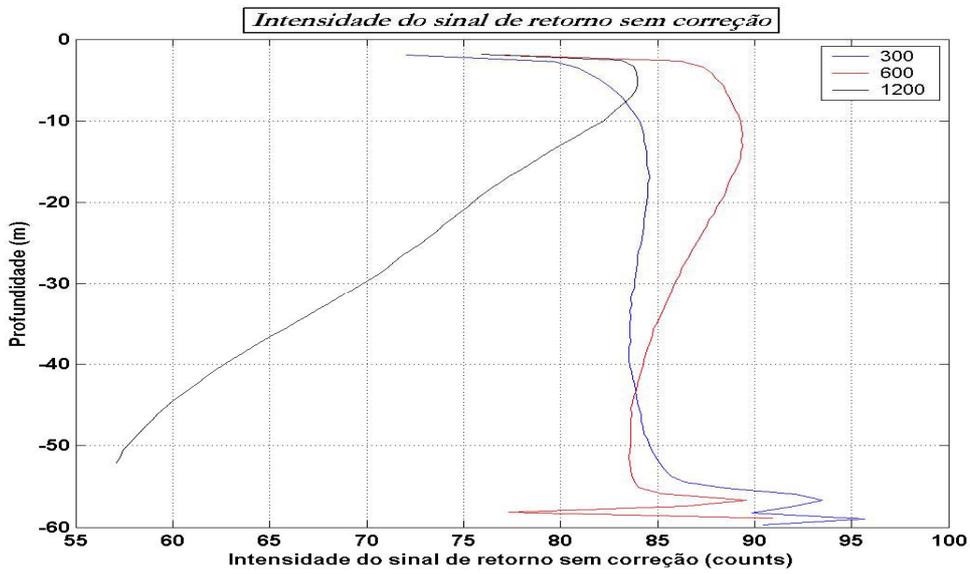


Gráfico 5.5 – frequências de 300, 600 e 1200 kHz sem correção

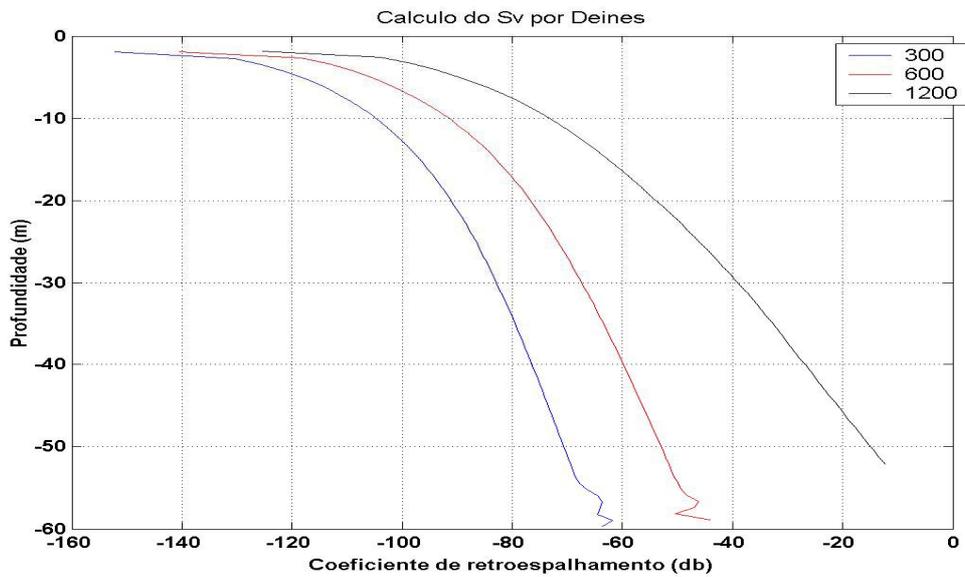


Gráfico 5.6 – Cálculo do Sv de DEINES.

Para essa mesma estação, como pode ser observado abaixo (Gráfico 5.7), num mesmo dia, em diferentes verticais, mas fazendo-se uso de um equipamento com a mesma frequência (nesse caso um ADCP de 300 kHz), pode-se observar que o comportamento das curvas de sinal de retorno são semelhantes. Assim, sugere-se que em futuras campanhas de medições, essa experiência seja repetida.

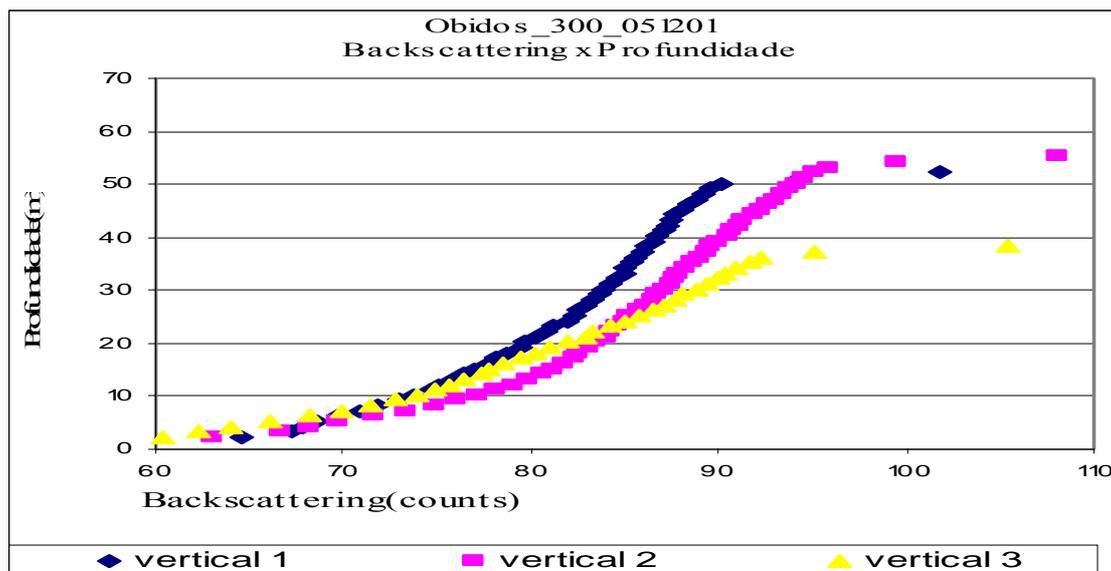


Gráfico 5.7 – Sinal de retorno para estação Óbidos em 05/12/01 – ADCP 300kHz

5.6 – Análise de dados para o Rio Amazonas

Cinco estações foram analisadas para esse estudo, de acordo com as campanhas realizadas em agosto e novembro de 2001 e março e junho de 2002. Abaixo estão listadas as estações onde foram coletados os dados (Tabela 5.6), com as profundidades medidas em metros (m) e a concentração de sedimentos em miligramas por litro (mg/l). Todos os gráficos, a partir do Gráfico 5.8, constam do anexo F desta tese. Cabe ressaltar que em junho de 2002, para a estação Óbidos, foram colhidos dados com as três frequências de ADCP disponíveis, por isso, entre parênteses, aparece os valores de 300, 600 e 1200 kHz.

Tabela – 5.6 – Estações no Rio Amazonas

| Estação | Data | Ago/01 | | Nov/01 | | Mar/02 | | Jun/02 | |
|-------------|------------------|-----------|---------|------------|---------|------------|---------|----------------|---------|
| | | Conc.Sed | Prof. | Conc.Sed. | Prof. | Conc.Sed. | Prof. | Conc.Sed. | Prof. |
| Caldeirão | | | | | | | | 42 a 850 | 25 a 55 |
| Itacoatiara | | 45 a 418 | 23 a 45 | | | | | | |
| Parintins | | 38 a 426 | 24 a 76 | 69 a 176 | 26 a 73 | 238 a 751 | 22 a 60 | | |
| Óbidos | | 43 a 836 | 43 a 62 | 0,93 a 104 | 40 a 58 | 226 a 1730 | 40 a 63 | (300) 61 a 500 | 58 |
| | (600) 73 a 393 | | | | | | | 58 | |
| | (1200) 39 a 1911 | | | | | | | 58 | |
| Oriximiná | | 4,2 a 6,2 | 18 | 4,2 a 5,6 | 14 | | | 2,54 a 6 | 20 |

Os gráficos de Concentração de Sedimentos (CS) x Profundidade (Prof), mostram que o Rio Amazonas sofre alterações significativas na sua profundidade ao longo das estações do ano, variando entre 10 e 76 m, de acordo com a estação em que se está trabalhando. A concentração de sedimentos na coluna d'água varia de 0,93 a 1.911 mg/l, no entanto, fica maior nos meses de março a junho. A estação Oriximiná é exceção, apresentando as mais baixas concentrações (2,5 a 6,2 mg/l).

Observa-se que a concentração de sedimentos aumenta com a profundidade, tendo, para isto, grande influência do aumento de sedimentos arenosos, como pode ser observado na estação Nova Olinda ago/01 - v1, v2 e v3 (Gráficos 5.8 a 5.10), situada nas proximidades da confluência do Rio Madeira com o Amazonas, Parintins Dez/01 - v1, v2 e v3 (Gráficos 5.11 a 5.13), Oriximiná Ago/01 - v3 (Gráficos 5.14) e Oriximiná Dez/01 - v2 (Gráficos 5.15) foi observada a predominância da fração fina.

Os gráficos de Concentração de Sedimentos (CS) x Sinal de Retorno (SR), mostram que há um comportamento do SR nas camadas da superfície e do fundo semelhante ao já constatado nos rios Solimões e Madeira.

Na camada superficial, foi observado um intervalo do SR variável em 0,5 dB a estação Parintins Dez/01 - v3 (Gráficos 5.16) a 28 dB em Oriximiná Ago/01 - v2 (Gráficos 5.17). Valores de SR da superfície, comparativamente ao imediatamente abaixo, foram encontrados nas estações compostas predominantemente por sedimentos

finos, como em Nova Olinda Ago/01 - v1, v2 e v3 (Gráficos 5.18 a 5.20); Oriximiná Ago/01- v2 (Gráficos 5.21) e Oriximiná Dez/01 - v2 (Gráficos 5.22); e ainda nas verticais mais rasas da estação, composta por sedimentos finos e arenosos - Itacoatiara Ago/01 - v3 (Gráficos 5.23); Parintins Ago/01 – v1 (Gráficos 5.24) e Óbidos Jun/02 - 600 Mhz – v3 (Gráficos 5.25).

Na camada de fundo, observa-se intervalos maiores do SR, que varia de 1(um) dB, na estação Óbidos Jun/02 - 600 Mhz (Gráficos 5.26); até 48 dB em Nova Olinda Ago/01 - v3 (Gráficos 5.27), numa camada d'água que varia entre 3 a 17m de espessura.

A análise dos gráficos da Estação Nova Olinda dez/01 mostra relações importantes entre a CS e o SR e a profundidade, pois altas concentrações de sedimentos (1200 mg/), em baixas profundidades (10 m) geram baixos valores de SR. (77 a 85 dB), como se pode ver na v1 (Gráfico 5.28) dessa estação, quando comparado aos gráficos com baixas CS (450 mg/l) em profundidades maiores (20 m) com valores de SR acima de 116 dB, como pode-se ver na v3 dessa mesma estação (Gráfico 5.29). Na estação Óbidos Ago/01 - v2 (Gráficos 5.30) pode ser observado que altas CS (401 mg/l) não implica em altos valores do SR (100 dB), pois este aumento do SR ocorre após a diminuição drástica da CS, na medida em que aumenta a profundidade.

A experiência de mudança na frequência do sinal acústico realizada na Estação Óbidos Jun/02 revelou aspectos inusitados. A estação Óbidos Jun/02 submetida à frequência de 300 Mhz (Gráficos 5.31) revelou comportamento semelhante aos gráficos descritos anteriormente. O aumento da frequência do sinal para 600 Mhz (Gráficos 5.32) promove o aparecimento de inversão do sinal junto ao fundo, contrariamente ao que ocorre na superfície, onde o SR do fundo é menor do que o SR do ponto imediatamente acima como é visto em Óbidos Jun/02 - v3. Situação extrema ocorre quando há o

aumento da frequência para 1200 Mhz (Gráficos 5.33). Neste caso, há a inversão total do gráfico, e as concentrações maiores de sedimentos passam a ter SR. mais baixos, enquanto que baixas CS apresentam valores de SR maiores. Junto ao fundo repete-se o fenômeno ocorrido no caso da frequência de 600 Mhz.

5.7 – Análise de dados para o Rio Madeira

Doze estações foram usadas para o estudo desse rio ao longo de dois anos, quando foram realizadas 4 (quatro) campanhas de levantamentos de dados, nos meses de agosto e novembro de 2001 e março e junho de 2002. Mostra-se, abaixo (tabela 5.7), um resumo das informações coletadas; as profundidades são representadas em metros (m) e a concentração de sedimentos em miligramas por litro (mg/l).

Tabela 5.7 – Estações do Rio Madeira

| Estação | Data | Ago/01 | | Nov/01 | | mar/02 | | Jun/02 | |
|--------------|------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|-------------|---------|
| | | Conc.Sed | Prof. | Conc.Sed. | Prof. | Conc.Sed. | Prof. | Conc.Sed. | Prof. |
| Paricatuba | | 6,6 a 24,1 | 36 | 1,6 a 5,4 | 30 | 1,1 a 14,7 | 40 | 0,59 a 2,37 | 38 |
| Humaitá | | | | | | 580 a 2700 | 13 a 22 | | |
| Porto Velho | | | | | | 902 a 2630 | 14 a 18 | | |
| Conceição | | | | | | 630 a 1450 | 16 a 18 | | |
| Pk-625-300 | | | | | | 500 a 2350 | 23 a 27 | | |
| Manicoré | | | | 160 a 1580 | 9 a 22 | 470 a 2350 | 14 a 30 | | |
| Vista Alegre | | | | | | 700 a 4600 | 17 a 18 | | |
| Borba | | | | 91 a 380 | 32 a 58 | 500 a 1500 | 17 a 18 | | |
| Iracema | | 50 a 778 | 22 a 38 | 83 a 350 | 8 a 35 | | | 28 a 1123 | 25 a 46 |
| Urucurituba | | | | 172 a 550 | 14 a 24 | 530 a 2636 | 16 a 24 | | |
| Foz Madeira | | | | | | | | 79 a 151 | 21 a 28 |
| Nova Olinda | | 55 a 150 | 10 a 20 | 95 a 1278 | 10 a 21 | | | | |

Analisando-se os gráficos de CS X PROF. Foi verificado que, entre os rios estudados, o madeira foi o que apresentou as maiores concentrações de sedimentos - valores de até 4.600 mg/l na estação Conceição em março de 2002 – v2 (gráfico 5.34). A estação Paricatuba constitui exceção quanto a quantidade de sedimentos em

suspensão, pois nela foram observadas as mais baixas concentrações, de 0,59 a 24 mg/l, numa coluna d'água de até 40 m de profundidade. Nesta estação predomina a presença de sedimentos finos, estando a fração arenosa presente apenas na estação Paricatuba em junho de 2002 – v2 (gráfico 5.35).

A profundidade do Rio Madeira, nas verticais analisadas, variou de 8 a 58 m, não tendo sido possível observar variações significativas da profundidade em função da estação do ano, devido, em parte, a pequena quantidade de estações analisadas continuamente.

De maneira geral, a quantidade de sedimentos cresce com o aumento da profundidade, tendo como contribuinte principal para isso, a fração arenosa. A única exceção foi a estação Paricatuba em fevereiro de 2002, quando sua vertical 2 apresentou como concentração máxima o valor de 14, 2mg/l à superfície, enquanto que a menor (1,12 mg/l) a 40m de profundidade (Gráfico 5.36).

Os sedimentos finos foram os constituintes totais na estação Porto Velho e Foz do Madeira em março de 2002 - v2 e v3 (Gráficos 5.37 e 5.38) e junho de 2002 (Gráfico 5.39 e 5.40) , respectivamente.

A análise dos gráficos de CS X SR mostrou, à semelhança do que ocorre no Rio Solimões, diferenças significativas dos valores de SR da primeira camada, composta pelos dois primeiros pontos de coleta, partindo da superfície, e na camada do fundo, envolvendo os dois últimos pontos de coleta.

Na camada superficial houve uma diferença no intervalo do SR que variou de menos de um dB - Vista Alegre mar/02 – v1 (Gráfico 5.41) até 17 dB – Iracema nov/01 – v1 (Gráfico 5.42), numa camada d'água que varia entre 4 e 10m de espessura.

Identificou-se, ainda, a inversão do sinal de retorno, onde o valor encontrado à superfície é maior do que aquele na camada imediatamente abaixo, as seguintes

estações: Humaitá – mar/02 – v1 (Gráfico 5.43); Porto Velho – mar/02 – v1, v2 e v3 (Gráficos 5.44 a 5.46); Pk 625 – mar/02 – v1 e v2 (Gráficos 5.47 e 5.48); Manicoré – mar/02 – v1 (Gráfico 5.49); Vista Alegre – mar/02 – v1 e v3 (Gráficos 5.50 e 5.51); Conceição – mar/02 – v1 e v25 (Gráficos 5.52 e 5.53); Borba dez/01 – v15 (Gráfico 5.54); Borba mar/02 – v1 e v2 (Gráficos 5.55 e 5.56); Iracema jun/02 – v3 (Gráfico 5.57); Urucurituba – nov/01 – v1 (Gráfico 5.58); Urucurituba – mar/02 – v1, v2 e v3 (Gráficos 5.59 a 5.61); e Foz Madeira jun/02 – v3 (Gráfico 5.62).

Observa-se, ainda, a inversão total do sinal de retorno, ou seja, a intensidade desse sinal apresentando valores maiores próximos a superfície que ao fundo nas estações Humaitá – mar/02 – v3 (Gráfico 5.63); Porto Velho mar/02 – v1 (Gráfico 5.64); Conceição mar/02 – v1 (Gráfico 5.65); e Iracema – nov/01 – v1 (Gráfico 5.66).

Nesses casos não foi possível observar uma correlação entre essa inversão e a concentração de sedimentos, mas observa-se que as ocorrências se dão sempre na vertical de menor profundidade da estação em questão.

Nas proximidades do fundo, o intervalo de variação na intensidade do sinal de retorno variou de 2 dB - Vista Alegre – mar/02 – v1 (Gráfico 5.67) a 34 dB - Foz Madeira – jun/02 – v1 (Gráfico 5.68).

O valor do SR parece estar mais relacionado com a profundidade do que com a CS, como pode-se observar na estação Iracema – ago/01 – v1 (Gráfico 5.36) e Manicoré mar/02 – v2 (Gráfico 5.69).

Observou-se que nas camadas superficiais, baixa concentração de sedimentos corresponde a baixos valores de sinal de retorno, como exemplo, pode-se observar a estação Paricatuba fev/02 – v2 (Gráfico 5.71) e que em maiores profundidades há o aumento do sinal de retorno em valores mais expressivos que aqueles encontrados em estações que apresentam maiores concentrações de sedimentos, porém com

profundidades menores, o que é facilmente observado na estação Manicoré mar/02 - v2 (Gráfico 5.72).

De uma maneira geral, observa-se que os valores de intensidade do sinal de retorno estão relacionados com a profundidade e com a concentração de sedimentos em suspensão, pois onde são encontrados valores elevados para esses parâmetros, normalmente tem-se como resposta um alto nível de intensidade do sinal de retorno.

5.8 – Análise de dados para o Rio Solimões

O Rio Solimões foi estudado através de 6 (seis) estações em 4 (quatro) épocas distintas. Os resultados são apresentados em forma resumida (Tabela 5.8), no mesmo padrão dos dados anteriores mostrados neste capítulo.

Tabela 5.8 – Estações do Rio Solimões

| Estação | Data | Nov/01 | | Jun/02 | |
|----------------|------|-----------|---------|-----------|---------|
| | | Conc.Sed. | Prof. | Conc.Sed. | Prof. |
| Tabatinga | | 135 a 766 | 10 a 30 | 82 a 1190 | 21 a 39 |
| S. P. Olivença | | 118 a 640 | 10 a 22 | 92 a 1280 | 17 a 35 |
| Sto. Ant. Içá | | 130 a 800 | 15 a 28 | 42 a 583 | 23 a 37 |
| Tefé | | 95 a 548 | 14 a 26 | 28 a 306 | 26 a 34 |
| Itapeuá | | 84 a 490 | 35 a 48 | 29 a 910 | 50 a 62 |
| Manacapuru | | 135 a 340 | 16 a 23 | 20 a 784 | 29 a 43 |

Analisando-se os gráficos de Concentração de Sedimentos (CS) x Profundidade (Prof.) foi observado que no mês de Ago/01 a CS variou de 42 a 276 mg/l (estação Manacapuru), enquanto que no mês de novembro desse mesmo ano, a variação ficou entre 84 e 800 mg/l. No ano de 2002 foram realizadas campanhas nos meses de

fevereiro e junho, tendo-se encontradas, respectivamente, as seguintes faixas de variação para a concentração de sedimentos: 172 a 540 e 20 a 1280 mg/l.

Com relação às profundidades medidas nas estações de coletas, pode-se verificar um aumento significativo no mês de junho de 2002; o que implica num aumento de concentração de sedimentos junto ao fundo do rio, em contrapartida, há a diminuição na concentração de sedimentos em suspensão próximos à superfície.

Composicionalmente, há a predominância dos sedimentos finos, embora, de uma maneira geral, próximo ao fundo, observa-se um aumento da fração arenosa, tornando-se, inclusive, em alguns casos, a fração predominante.

A análise dos gráficos de CS x Sinal de Retorno (SR), mostra que há variações nas diferenças dos valores do SR ao longo da coluna d'água analisada. Verificou-se que o SR na superfície tende a ser maior que na camada imediatamente abaixo (cerca de 6m) quando a CS é baixa ou então quando o perfil analisado é mais raso, como pode ser observado na estação Tabatinga nov/01 - v3 (Gráfico 5.73); São Paulo nov/01 – v2 e v3 (Gráficos 5.74 e 5.75); Manacapuru ago/01 – v1 e v3 (Gráfico 5.76 e 5.77); Manacapuru nov/01 – v1 (Gráfico 5.78).

Nas demais verticais, verificam-se que há grandes diferenças nos valores do SR entre as primeiras coletas de água (superfície e cerca de 6 m abaixo). Este valores variam de 1 (um) dB, como se pode observar em Manacapuru nov/01 – v1 (Gráfico 5.79) até 21 dB em Manacapuru jun/02 – v3 (Gráfico 5.80). À semelhança do que ocorre na superfície, porém com diferenças de valores no SR maiores, observa-se nas duas últimas coletas d'água das verticais analisadas (cerca de 8m de profundidade). Neste caso a variação é de 5 dB em Santo Antônio nov/01 – v1 (Gráfico 5.81) a 27 dB em Itapeua nov/01 – v1 (Gráfico 5.82).

5.9 – Cálculo da Correlação entre o Sinal de Retorno e a Concentração de Sedimentos

Uma das formas mais comuns de analisar duas funções de dados contínuos, consiste em calcular se há ou não um grau de relacionamento entre elas. Este grau de relacionamento é sintetizado por um coeficiente de correlação, ou “*r de Pearson*”, nome dado em homenagem ao matemático Karl Pearson, mentor dessa técnica. Para que possamos aplicar essa metodologia, duas são as hipóteses levantadas: a primeira diz: “*tanto x quanto y são variáveis aleatórias contínuas*”, o que significa dizer que essas funções podem variar livremente, ou em outras palavras, devem ser consideradas como são; a segunda hipótese é que “*a distribuição de frequência conjunta é normal*”, isto é, a distribuição de valores dos pares é normal.

Assim, o coeficiente de correlação ou “*r de Pearson*”, possui duas propriedades que sintetizam a natureza de uma correlação entre duas variáveis: uma é o sinal, que poderá ser positivo (+) ou negativo (-), e a outra é sua magnitude. O sinal pode ser visto como um coeficiente angular de uma reta imaginária que se ajustasse aos dados, se e quando fosse traçada num diagrama de dispersão, enquanto a magnitude indica o quão próximo (ou distante) estão os pontos individualmente calculados. Essa magnitude varia entre $-1,00 \leq r \leq 1,00$. O valor $-1,00$ (um negativo), indica que existe um relacionamento negativo perfeito, ou seja, o aumento de uma variável é seguido pelo decaimento da outra; o valor $+1,00$ (um positivo), indica que existe um relacionamento positivo perfeito, o que significa dizer que à medida que uma das variáveis aumenta, a outra a segue. Valores de r próximos a zero indicam que não há correlação entre essas variáveis, pois o aumento de uma delas não significa o aumento ou diminuição da outra e vice-versa. A tabela abaixo (Tabela 5.9) mostra um resumo do que aqui está descrito:

Tabela 5.9 – Descrição do Relacionamento Linear segundo o valor “*r de Pearson*” .

| Valor do “ <i>r de Pearson</i> ” | Descrição da correlação |
|----------------------------------|---|
| +1,00 | Relacionamento positivo perfeito |
| Cerca de 0,70 | Relacionamento positivo moderado |
| 0,00 | Ausência de Relacionamento |
| Cerca de – 0,70 | Relacionamento negativo moderado |
| – 1,00 | Relacionamento negativo perfeito |

(STEVENSON, 2001)

A partir daí, foi criado um programa no MatLab® para cálculo do valor r , para todas as estações onde se tinha dados de concentração e granulometria medidos. As estações calculadas são as constantes do Anexo G.

Efetuuou-se o cálculo do valor “*r de Pearson*” para as seguintes situações:

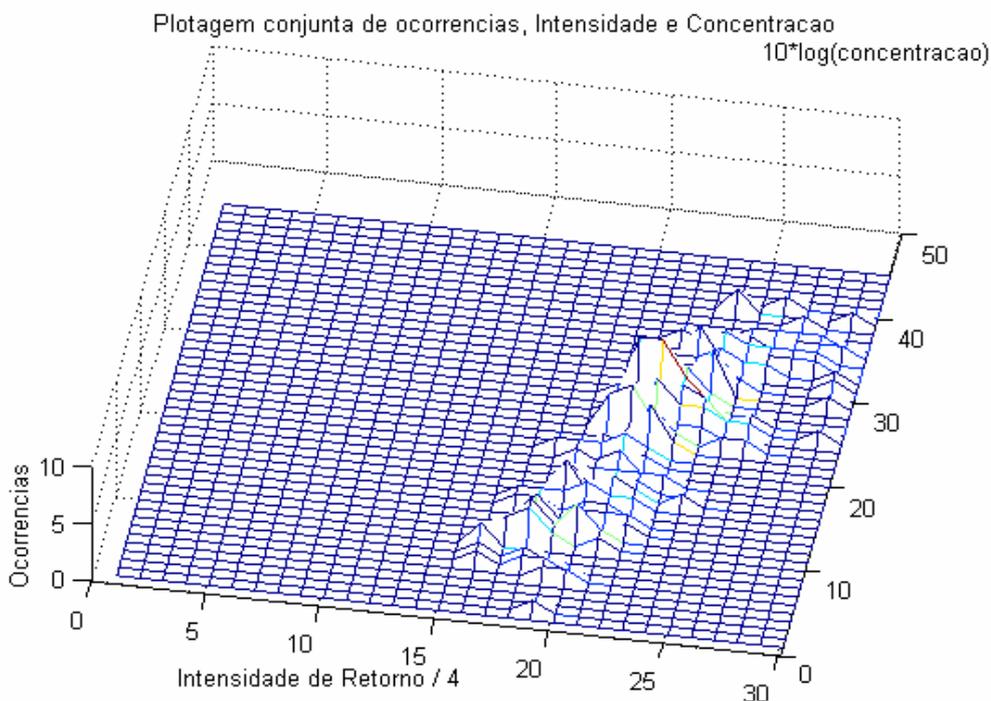
- Intensidade do sinal de retorno (sem correção) x concentração de sedimentos finos;
- Intensidade do sinal de retorno (sem correção) x concentração de sedimentos grossos (areias);
- Intensidade do sinal de retorno (sem correção) x concentração de sedimentos totais;

- Intensidade do sinal de retorno (com correção) x concentração de sedimentos finos;
- Intensidade do sinal de retorno (com correção) x concentração de sedimentos grossos (areias);
- Intensidade do sinal de retorno (com correção) x concentração de sedimentos totais.

Essa relação da intensidade do sinal de retorno em função da concentração medida, apresenta uma distribuição conjunta conforme é mostrada na figura abaixo (Figura 5.3). Essa figura representa uma plotagem conjunta de ocorrências, intensidade do sinal de retorno e concentração de sedimentos em suspensão.

Foi, ainda, calculada a distribuição marginal do sinal de retorno (Figura 5.4); para facilitar a demonstração gráfica, os valores do sinal de retorno foram divididos por 4.

Figura 5.3 - Plotagem conjunta de ocorrências, intensidade do sinal de retorno e concentração de sedimentos em suspensão



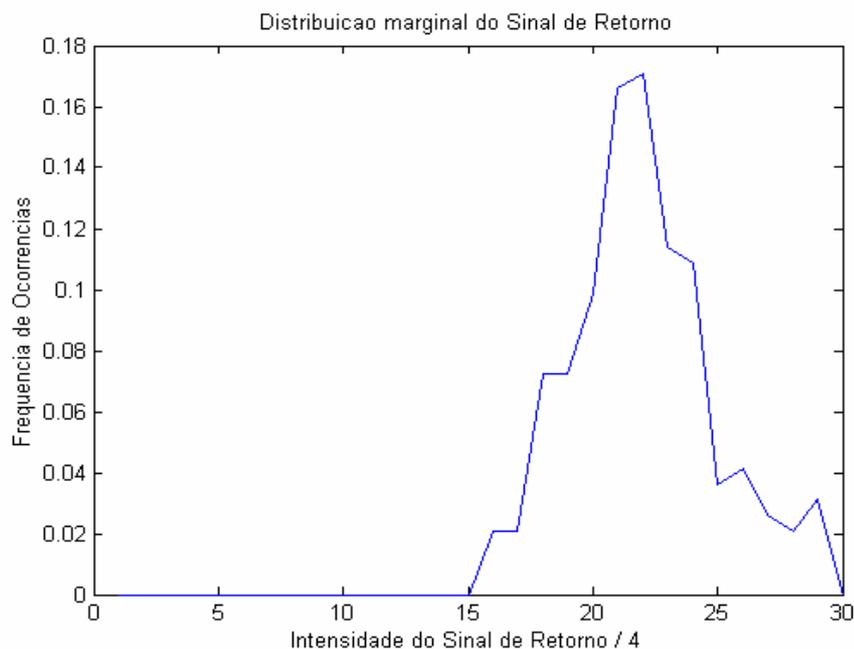


Figura 5.4 - distribuição marginal do sinal de retorno

Após essa verificação estatística das variáveis, fez-se uma avaliação percentual de como essa correlação estaria posicionada em relação a Descrição do Relacionamento Linear segundo o valor “*r de Pearson*” (tabela 5.9). O resultado foi o constante das figuras abaixo (Figuras 5.5 a 5.7).

Tomando-se como base um coeficiente r de 0,70, em módulo, uma vez que esse valor indica haver uma boa correlação entre as variáveis que estão sendo analisadas, o mesmo programa acima descrito, fez o cálculo e chegou-se aos seguintes valores:

| | |
|---------------------------|-------|
| perc_bom_finos_sem_cor = | 50.78 |
| perc_bom_areias_sem_cor = | 72.41 |
| perc_bom_totais_sem_cor = | 64.84 |
| perc_bom_finos_com_cor = | 60.93 |
| perc_bom_areias_com_cor = | 78.44 |
| perc_bom_totais_com_cor = | 72.65 |

Tabela 5.9 – Porcentagem boa de correlação.

Com base nesses valores, podemos concluir que existe correlação entre o sinal de retorno acústico de um ADCP e a concentração de sedimentos em suspensão no local. Ressalta-se que o sinal é fortemente influenciado pela concentração de sedimentos grosseiros presentes na coluna d'água.

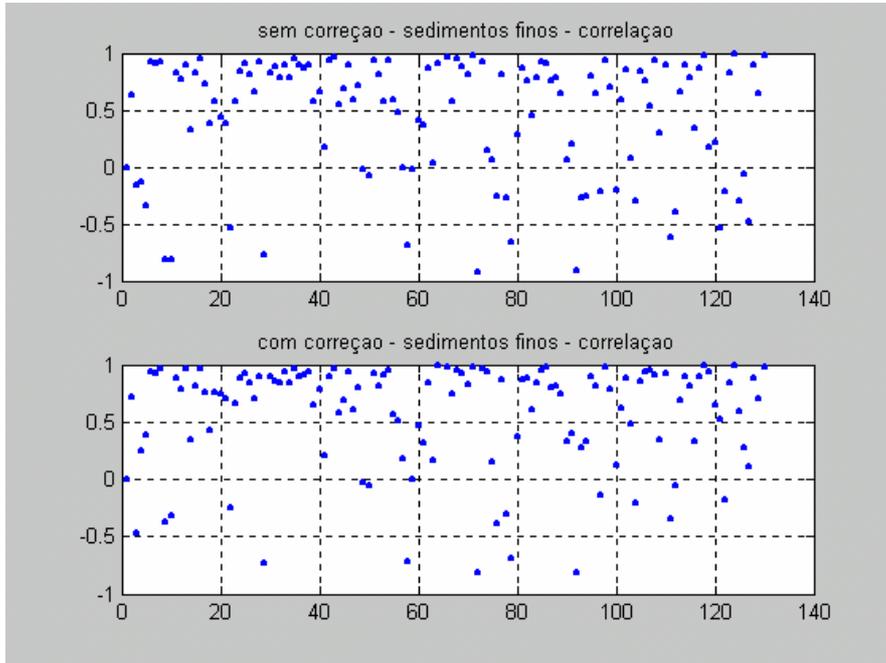


Figura 5.5 – cálculo de r para sedimentos finos.

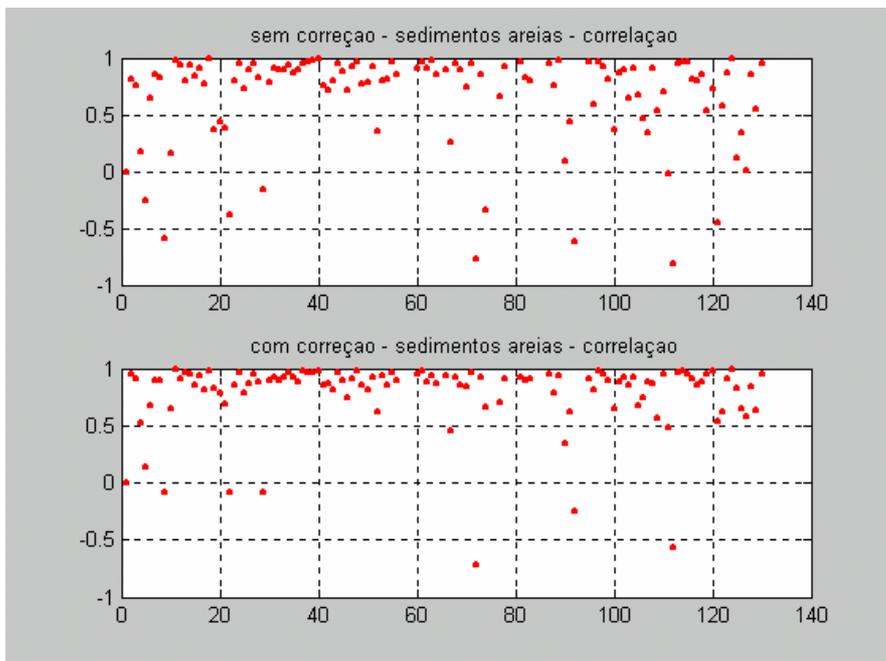


Figura 5.6 – cálculo de r para areias.

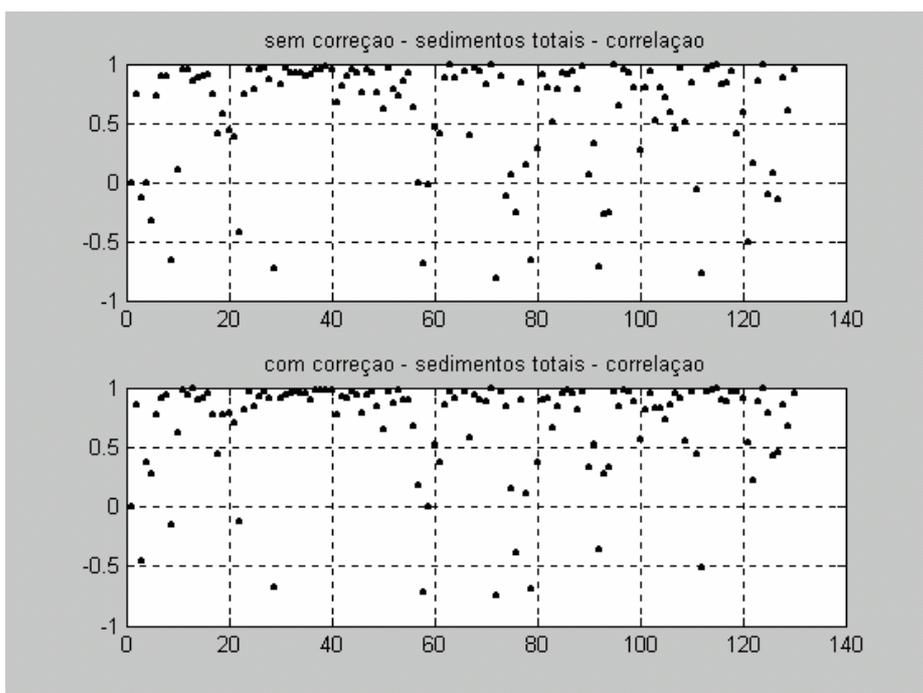


Figura 5.7 – cálculo de r para concentração total de sedimentos.

A partir dos dados existentes, foram calculados, ainda, os percentuais de correlação para diversas situações, tais como: dados do anos de 2001; dados do ano de 2002; dados dos rios Amazonas, Solimões e Madeira; dados de concentração inferiores a 700mg e dados com profundidades inferiores a 20m. Os resultados são os constantes da tabela abaixo (tabela 5.10) e todas as figuras, listas das estações usadas, bem como o programa usado para cálculo, constam do anexo H.

| LISTA | % FINOS SEM CORREÇÃO | % FINOS COM CORREÇÃO | % AREIAS SEM CORREÇÃO | % AREIAS COM CORREÇÃO | % TOTAL SEM CORREÇÃO | % TOTAL COM CORREÇÃO |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 2001 | 53.2 | 64.5 | 85.7 | 85.7 | 69.3 | 70.9 |
| 2002 | 48.4 | 57.5 | 60 | 71.6 | 60.6 | 74.2 |
| 700 mg/l | 58.5 | 67.7 | 89.4 | 90.7 | 80.6 | 82.4 |
| Amazonas | 64 | 76 | 84.0 | 86.3 | 74 | 80 |
| Madeira | 23.8 | 47.6 | 36.8 | 52.6 | 33.3 | 47.6 |
| Solimões | 53.1 | 61.7 | 82.9 | 89.3 | 80.8 | 89.3 |
| 20 metros | 42.3 | 50 | 62.3 | 69.5 | 53.8 | 64.1 |

Tabela 5.10 – resumo do cálculo de correlação para as estações.

Capítulo 6

OBTENÇÃO DE PERFIS DE CONCENTRAÇÃO

Tomando-se por base as teorias apresentadas, surgem as perguntas: Pode-se usar o ADCP para medição de concentração de sedimentos? Como proceder para interpolar valores de concentração calculada a partir de valores medidos em campo?

Baseando-se na correlação existente entre a concentração medida em campo com a intensidade do sinal de retorno, conforme visto no Capítulo anterior, é possível criar uma função de correlação, onde a partir de uma medição de um sinal de retorno, possa estimar a massa em suspensão (Figura 6.1). O Anexo H mostra todas as listas e todos os gráficos gerados para as diferentes situações encontradas nas campanhas de medição.

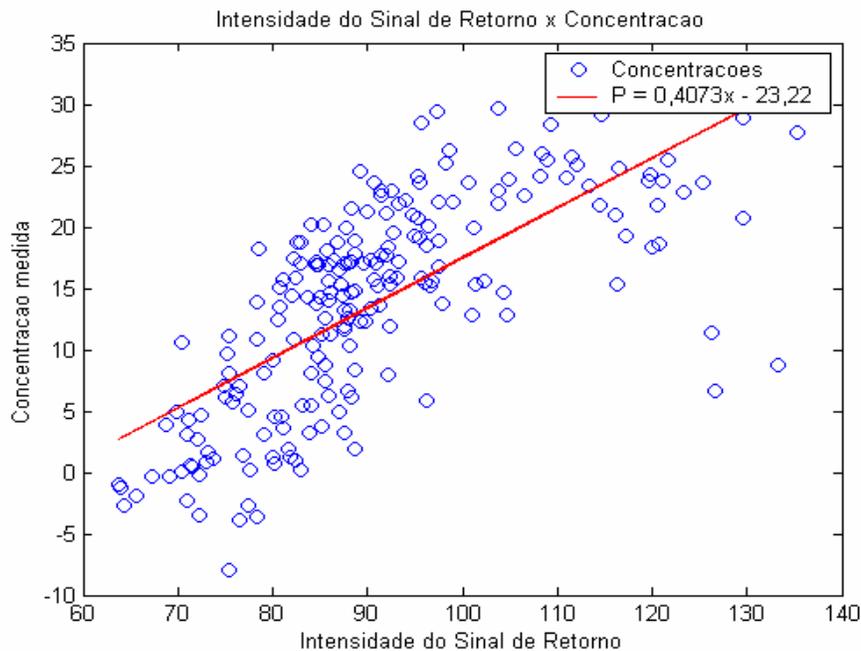


Figura 6.1 – Correlação entre sinal de retorno e Concentração medida.

Uma outra possibilidade para obtenção de valores de massa é usar a teoria de DEINES (1999), onde, tomando-se por base o cálculo da variável C (Eq. 4.20), obtêm-se o valor de C_v (Eq. 4.21). O método prático, proposto por DEINES (1999), serve para interpolar valores de concentração ao longo de uma coluna d'água, uma vez que para sua aplicação, faz-se necessária a medição de concentração de sedimentos em suspensão, que servirão como dados de entrada na aplicação da formulação por ele proposta.

Em relação a segunda pergunta, tentou-se usar a correlação existente entre as teorias de THORNE (1991) e DEINES (1999), conforme demonstrada abaixo:

$$10\log S_v = 10\log(3M/16\pi a_s \rho_s) \quad (6.1)$$

A partir dessa relação (Eq. 6.1), foram calculados os valores de S_v para diferentes estações, e a partir desses valores, foram obtidas concentrações de massa em suspensão. Posteriormente, essas massas foram comparadas com as massas resultantes do processo de peneiração seguida de filtragem e pesagem, que geraram os resultados de concentração de sedimentos em campo.

Como os valores medidos e calculados foram muito diferentes, sugere-se uma maior investigação desse processo.

Ressalta-se que a teoria proposta por THORNE (1991), os métodos implícito e explícito, foram desenvolvidos, não para serem aplicados com dados de sinal de retorno de ADCP comercial, mas para fazer estimativas a partir dos dados de Acoustical Backscattering Sensor (ABS), a partir de medições independentes de *backscattering*, onde se obtém massa e foi fundamentada a partir de resultados de laboratório, onde foram empregados equipamentos com frequências mínima de 5 MHz e profundidades aproximadas de 3m, ou seja, valores muito distantes daqueles utilizados na obtenção dos

dados desta tese, pois a maior frequência foi de 1200kHz, enquanto a profundidade variou entre 10m e 60m.

Ressalta-se a necessidade de uma campanha de levantamento de dados específica, que possa servir para calibração de modelos, uma vez que, como dito anteriormente, os dados aqui empregados, não foram obtidos com a finalidade precípua dessa tese.

Notou-se que, ao se aproximar do fundo, os valores medidos tendem a crescer de maneira significativa (Gráficos 5.5 e 5.6 e Figura 6.2). Isso é atribuído à imprecisão imposta pela alta concentração de sedimentos, uma vez que o *backscattering* é tão forte, devido aos sucessivos espalhamentos ocorridos, que o sinal de retorno já não traz de forma precisa, informações sobre os espalhadores. Outro fator a ser observado são os resultados dos métodos prático e implícito. Atente-se que o método prático, proposto por DEINES (1999), baseia-se na proporcionalidade da variação da intensidade do eco, enquanto que as equações apresentadas por THORNE (1991) consideram fatores diversos, tais como o tamanho médio e a densidade da partícula, a temperatura da água, as constantes de espalhamento, fatores de forma, entre outros.

Pode-se observar, ainda, na figura (Figura 6.2) que em determinado momento é como se o ADCP “perdesse” o fundo. Quando isso ocorrer, pode-se tentar sucessivas mudanças de calibração do aparelho até se obter uma curva uniforme. Relembra-se que nem sempre será possível efetuar essa correção.

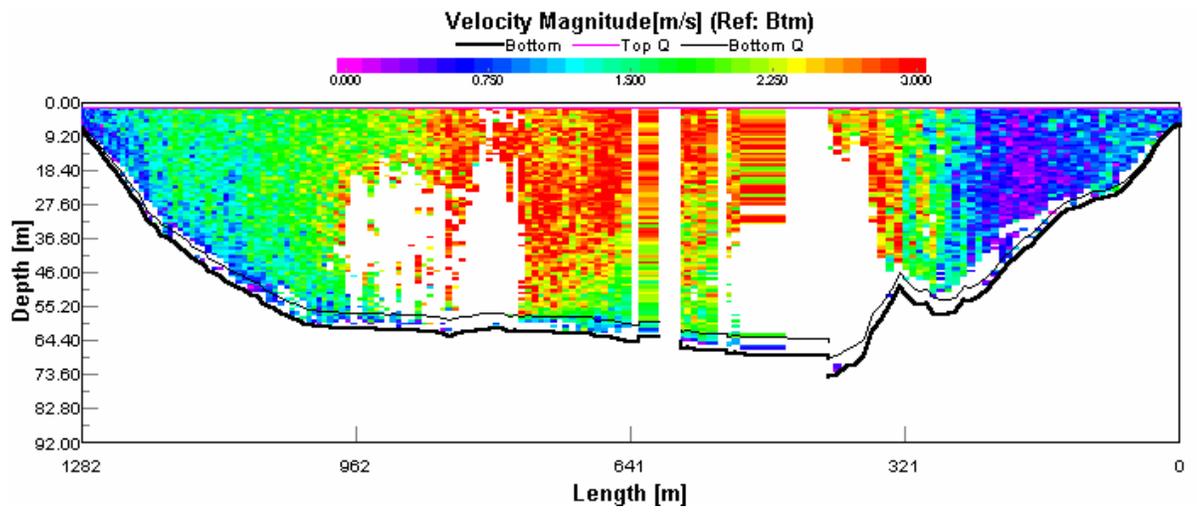


Figura 6.2 - Itapeua : 16/06/02.

Capítulo 7

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS E CONCLUSÃO

O sinal de retorno acústico possui propriedades que permitem prever parâmetros da suspensão, possibilitando, assim, seu uso como estimador para concentrações de sedimentos em suspensão. Serve como estímulo para esta investigação, as crescentes aplicações do sinal de retorno acústico para monitoramento de sedimentos em suspensão no meio ambiente marinho, pois há a possibilidade de se obter medições com alta resolução espacial e temporal de perfis de concentração, de maneira não intrusiva, algo que os sedimentologistas têm aspirado ao longo de vários anos. Isso representa um significativo avanço em relação às outras técnicas usadas na obtenção de concentração de sedimentos numa amostra d'água, além de permitir novas oportunidades de estudo no processo de transporte de material carreado.

Como toda nova técnica, essa ainda apresenta algumas desvantagens, quais sejam: em períodos onde há uma grande carga de material em suspensão, quando a atenuação feita pelo sedimento é alta, a técnica de inversão, usada na obtenção dos perfis de concentração, pode gerar resultados duvidosos, devido ao acúmulo de erros associados com a incerteza presente em alguns parâmetros, pois quando as concentrações de sedimentos são altas, o termo de atenuação α , além da atenuação imposta pela água, ainda inclui a atenuação que o

próprio sedimento impõe ao som, quando este encontra a partícula em suspensão. Sendo assim, a aproximação interativa necessária para resolução do problema introduz erros que podem ser exponencialmente propagados, impossibilitando, dessa forma, uma convergência para o cálculo de massa.

THORNE, HOLDAWAY et al.(1995), propuseram uma maneira de resolver este impasse, que consiste em examinar como o coeficiente de atenuação da água (α) pode ser estimado de maneira independente, e desta forma solucionar este problema. O princípio por trás deste método consiste em monitorar a intensidade do sinal de retorno durante períodos de calmarias, ou seja, de baixa concentração de sedimentos em suspensão. Isto pode ser usado para calcular a atenuação imposta pela água nestas condições, ao sinal de retorno acústico, ou simplesmente servir como referência de comparação para a intensidade do sinal de retorno quando em condições adversas. Pelo monitoramento da intensidade deste sinal durante os períodos que implicam numa alta carga de sedimentos em suspensão, a atenuação feita pelo sedimento pode ser derivada e usada como uma variável nas equações de cômputo de massa (DERROW II, KUHNLE & JONES, 1998). Ressalta-se que isto não é um problema exclusivo para aplicações acústicas, mas sim um problema de caráter geral quando se usa o sinal de retorno (seja ele acústico ou não) para se estabelecer níveis de concentração de espalhadores (THORNE et al., 1995).

Existe, ainda, uma limitação comum para qualquer instrumento que trabalha com uma única frequência (seja ele ótico ou acústico), pois equipamentos com essa característica não conseguem diferenciar entre mudanças na distribuição do tamanho das partículas e mudanças de concentração, ou seja, uma mudança na distribuição de tamanho de partículas pode ser interpretada como mudança de concentração, a menos que

calibrações adicionais independentes indiquem alterações na distribuição granulométrica. Some-se a isso que os métodos óticos e acústicos respondem diferentemente para variações no tamanho das partículas, pois os sensores acústicos são mais sensíveis às partículas grandes (proporcional ao volume), enquanto os óticos, às partículas pequenas (proporcional a área da seção transversal).

Uma outra limitação está associada com a relação existente entre a frequência do instrumento e a distribuição de tamanho das partículas. A base de análise é a teoria acústica do modelo de espalhamento de Rayleigh (comprimento de onda de longo alcance) que é restrito às partículas cujo raio da circunferência para o comprimento de onda seja menor que a unidade. 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 o SSC estimado pode conter erros. Para aparelhos acústicos de frequência de 1200KHz, partículas de diâmetro de 400, 40 e 4 μm , correspondem a uma razão entre circunferência/comprimento 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 da dezena ou centena de microns. 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 óticos são otimizados. No caso de sedimentos passíveis de ocorrer agregamento de partículas, como a argila, a atenuação imposta ao som é muito alta, o que implicaria no uso de equipamentos com frequências na casa de dezenas de MHz (10-20MHz), mas isso implicaria num alcance acústico inaceitavelmente baixo para instrumentos designados primariamente a medições de perfis de velocidade.

Das três técnicas de cálculo apresentadas para obtenção dos perfis de concentração de sedimentos, a de inversão implícita é a mais difícil de ser calculada, devido ao processo iterativo. Embora os cálculos sejam fáceis de serem implementados, se faz necessário manter a atenção nos valores obtidos, pois pode ocorrer de não haver convergência na massa calculada, o que impossibilita a obtenção de resultados. Outro fator a ser considerado é que, dependendo do tamanho das tabelas interativas, para que a performance do software seja aceitável, podem ser necessárias mais memória e velocidade de processamento. Deve-se ter atenção com a precisão de todos os cálculos, pois como se interagem continuamente, pequenos erros tornam-se grandes erros e os resultados podem ter uma convergência suave, como se deseja, ou simplesmente divergirem. Apesar disso não poder ser resolvido apenas com o uso de entrada de dados, um acompanhamento adequado é capaz de demonstrar a efetividade dos cálculos que foram realizados.

Mesmo estando sujeito a algumas limitações e, sendo incapaz de diferenciar entre mudanças de concentração ou de distribuição do tamanho de partículas, esse método possui algumas vantagens sobre outros, como, por exemplo, o fato do ADCP prover SSC estimado concorrente com medições de velocidade sem o uso de um sensor adicional. Este método supera o problema do filme biológico, a maior limitação dos instrumentos óticos. Outra característica significativa é que quando utilizando medições acústicas a partir de ADCP para estimar o SSC eles estão na forma de perfis melhores que medições de instrumentos de um único sensor.

Este método pode ser usado como instrumento de pesquisa, sugerindo-se, a despeito de pequenas alterações na distribuição do tamanho de partículas, estimar qual é a resolução espacial e temporal mínima de maneira que ainda se obtenha valores coerentes de concentração, além de efetuar cálculos ou alterações na formulação proposta para se obter

maior precisão nos resultados obtidos, uma vez que a base matemática está fundamentada em experiências realizadas com equipamentos que trabalham numa ordem de grandeza na frequência empregada, de 3 a 10 vezes maior que a do equipamento usado para obtenção de dados. Ressalta-se, ainda, que os poucos trabalhos publicados sobre o assunto, referem-se a região estuarina, onde fatores como a salinidade, são considerados e que essa metodologia não foi criada para emprego em rios nem com ADCP comercial.

Apesar dessas restrições, há um futuro promissor quanto ao emprego desse equipamento para obtenção de perfis de concentração, como pôde ser demonstrado com o cálculo do coeficiente de correlação, pois mesmo usando uma base de dados de apenas dois anos, com aquisição voltada para maximizar outras características do meio, foi possível obter uma correlação superior a 75% entre o sinal de retorno e a concentração de sedimentos em suspensão.

Sugere-se, ainda, uma maior investigação sobre o processo de correlação existente entre as tórias propostas por THORNE (1991) e DEINES (1999).

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, L. G., SIMPSON, “*Brazil: Management of Water Resources*”, L.; The World Bank, 1995.

ADMIRAAL, D. M., GARCIA, M.H., “*Laboratory Measurement of Suspended Sediment Concentration Using an Acoustic Concentration Profiler (ACP)*”, *Experiments in Fluids*, n.28, pp.116-127, 2000.

AN4, Rev 1.0, in Aquatec Subsea Limited, www.AquatecSubsea.com

ATHANASIADIS, CHRISTODOULOS., “*On the Acoustic Scattering amplitude for a Multi-Layered Scatterer*”, *Journal Austral. Math. Soc. Ser.*, v.B, n.39, pp. 431-448, 1998.

CARVALHO, MARIVAL S., 1999, Investigações sobre um Perfilador Acústico (ADCP) de faixa larga, Tese de M.Sc., COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rj, Brasil

CHAPMAN, STEPHEN J., Programação em MATLAB para Engenheiros, São Paulo, Brasil, Thomson, 2003.

CLAY, CLARENCE S., MEDWIN, H., “*Acoustical Oceanography : Principles and Applications*”. In : McCormick, M. E., Bhattacharya, R. (eds), 2 ed., New York, USA, John Wiley & Sons, 1977.

DEINES, KENT L., “*Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers*”, RD Instruments, San Diego, CA 92131, USA.

DERROW II, R.W., KUHNLE, R. A., JONES, I.P., “*Acoustically measuring suspended sediment Concentration and Size Distribution*”, Proceedings, federal Interagency Workshop, sediment Technology for the 21st century, St. Petersburg, FL, february 17-19, 1998.

DINEHART, RANDAL L., “*Spatial analysis of ADCP data in streams*”, in U.S. Geological Survey, Sacramento, CA, rldine@usgs.gov .

DOWNING, ANDREW, THORNE, PETER D., VINCENT, CHRISTOPHER E., “*Backscattering From a suspension in th Near Field of a piston transducer*”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.97, n.3, pp. 1614- 1620, Mar. 1995.

ELETROBRÁS. Plano Nacional de Energia Elétrica-2015. 20/10/1999.

FILIZOLA, NAZIANO., “*Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens*”. Tese de D.Sc., Universite de Toulouse, Toulouse, França, 2003.

GARTNER, JEFFREY W., “*Estimation of suspended Solids concentrations Based on Acoustic Backscatter Intensity: Theoretical Background*”, in Turbidity and other sediment Surrogates Workshop, April 30 - May 2, Reno, NV.

GARTNER, JEFFREY W., GRAY, JOHN R., “*Summary of Suspended-Sediment Technologies Considered at the Intetagency workshop on Turbidity and other sediment Surrogates*”, in U.S. geological Survey, national Reserach program, jgartner@usgs.gov and jrgray@usgs.gov.

GORDON, LEE, “*Doppler Principles of Operation*”, NortekUSA, in NortekUSA.com.

GORDON, LEE, “*Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation. A Practical Primer*”, RD Instruments, San Diego, California, USA, 1996.

GRAY, JOHN R., MELIS, THEODORE S., PATIÑO, EDUARDO., LARSEN, MATTHEW C., et all., “*U.S.Geological Survey Research on Surrogate Measurements for Suspended Sediment*”, in Geological Survey, Office of Surface Water, Reston, VA 20192. E-mail: jrgray@usgs.gov.

GRANDE, J.C.P. in O Maior Rio do Mundo. Boletim Geográfico, Rio de Janeiro, mar/abr, 1955.

GUIMARÃES, VALDEMAR., FILIZOLA, NAZIANO., “*Medição de Vazão em Grandes Rios com o uso do Perfilador Doppler-Acústico de Corrente*”, in “*Manaus’99 International Symposium–Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*”, <http://www.unb.br/ig/hibam/hibam.htm>.

HANSELMAN, D., LITTLEFIELD, BRUCE., “*Mastering Matlab – A Comprehensive Tutorial and Reference*”. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1996.

HOLDAWAY, GLENN P., THORNE, PETER D., FLATT, DAVID., JONES, SARAH E., PRANDLE, DAVID, “*Comparison between ADCP and Transmissometer Measurements of Suspended Sediment Concentration*”, *Continental Shelf Research*, n.19, pp.421-441, 1999.

HANSELMAN, D., LITTLEFIELD, BRUCE., “*Mastering Matlab – A Comprehensive Tutorial and Reference*”. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1996.

HAY, A.E., SHENG, JINYU, “*Vertical Profiles of Suspended Sand Concentration and Size from Multifrequency Acoustic Backscatter*”, *Journal of Geophysical Research*, v.97, C10, pp. 15661-15667, 1992.

HOLMES, ROBERT R., GARCIA MARCELO H., “*Velocity and Sediment Concentration Measurements Over Bedforms in Sand-Bed Rivers*”, *U.S. Geological Survey, Urbana, Illinois*.

LEE, TAE H., HANES, DANIEL M., “*Explicit solution to the Acoustic Backscatter Equation to Measurement the Concentration of Uniform, Suspended Particles*”, *Journal of Geophysical Research*, v.100, C2, pp. 2649-2657, 1995.

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*, v.85, n.4, pp.1501-1511, 1989.

LOHRMANN, ATLE., “*Monitoring Sediment Concentration With Acoustic Backscattering Instruments*”, in Nortek Technical Note No 3, Oct, 2001.

MARTIN, R.L., PARENTE, C.E., HASSE, R.W., 1977, “*Joint US/BRAZIL Acoustic Measurement Exercise.*” In:Tech. Publ. of Naval Underwater Systems Center, New London, USA.

MOL, JAN-WILLEM., “*Sedimentation Estimations from ADCP Measurements – monitoring sediment Transport in a Small harbour*”, in *hydro INTERNATIONAL*, July/August 2003, pp 3-5.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, “*DAQCard-700 User Manual*” .Part Number 320676C-01,Jan.1996.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, “*LabVIEW : User Manual*”. Part Number 320999B-01,Jan.1998.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, “*LabVIEW : Data Acquisition Basics Manual*”. Part Number 320999B-01,Jan.1998.

Política Nacional Integrada para a Amazônia Legal. Secretaria de Coordenação dos Assuntos da Amazônia Legal/MMA, 1995.

Política Ambiental para a Amazônia. SUDAM/PROVAM, OEA, 1990.

RD INSTRUMENTS, “Manual de Medição de Descarga em Rios Usando o ADCP”.

SANTANA, WARLEY G., Contribuições ao Desenvolvimento de um Arranjo de Hidrofones para Medições no Mar. Tese de M.Sc., PEnO/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

SMERDON, A. M., REES, J. M., VINCENT, C. E., “*An Acoustic Backscatter Instrument to Measure Near-bed sediment Processes*”, in Aquatec Eletronics Ltd. High street, Hartley Wintney, Hampshire, RG27 8 NY, UK.

SHANG,E., ZHOU,J., LO,E., “*Normal Mode Filtering in Shallow Water*”, *Journal of the Acoustical Society of America*,v.74,n.6,pp.1833-1836,Dec.1983.

SHENG, JINYU., HAY, ALEX E., “*An Examination of the Spherical Scatterer Aproximation in Aqueous Suspensions of Sand*”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.83, n.2, pp. 598-610, Feb. 1988.

STEVENSON, WILLIAM J., Estatística Aplicada a Administração, Editora Harbra, São Paulo, Brasil, 2001.

THORNE, PETER D., VINCENT, C.E., HARDCASTLE, PETER J., REHMAN, S., PEARSON, S., “*Measurign Suspended Sediment Concentrations using Acoustic Backscatter Device*”. *Marine Geology*, 98 7-16.

THORNE, PETER D., CAMPBELL, STUART C., “Backscattering by a Suspension of Spheres”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.92,n.2,pp.978-986, Aug.1992.

THORNE, PETER D., HARDCASTLE, PETER J., “Analysis of Acoustical Measurements of Suspended Sediments”, *Journal of Geophysical Research*, v.98, n.C1, pp. 899-910, Jan. 1993.

THORNE, PETER D., BRUDNER, TERRY J., WATERS, KENDALL R., “Time-domain and Frequency-domain Analysis of Acoustic Scattering by Spheres”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.95, n.5, pp. 2478- 2487, May. 1994

THORNE, PETER D., HOLDAWAY, GLENN P., HARDCASTLE, PETER J., “Constraining Acoustic Backscatter Estimates of Suspended Sediment Concentration Profiles Using the Bed Echo”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.98, n.4, pp. 2280-2288, Oct. 1995.

THORNE, PETER D., “Utilisation of Acoustics for Monitoring Local and Near-Field Mine Burial Processes: Proof-of-Concept”, *Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, award Number: N00014-01-1-0549, UK. 2003.*

UCHÔA, CARLOS A. B., Contribuições ao desenvolvimento de um Perfilador Acústico de Correntes Oceânicas. Tese de M.Sc., PEnO/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

URICK, ROBERT J., “*Principles of Underwater Sound*”, New York, USA, McGraw-Hill Book Company, 1975.

WREN, DANIEL G., “*Surrogates techniques for Suspended-Sediment Measurement*”,
Turbidity and Other sediment Surrogates Workshop, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV.

WREN, DANIEL., VADAKAPURAPU, SRIKANTH., KUHNLE, ROGER.,
CHAMBERS, JAMES and BARKDOLL, BRIAN., “*Suspended-Sediment
Measurements in laboratory Flumes Using Acoustic Techniques*”, National Center for
Physical Acoustics, University of Mississippi, dgwren@olemiss.edu .

YE, ZHEN., “*Recent Developments in Underwater Acoustics: Acoustic Scattering from
Single and Multiple Bodies*”, Proc. Natl. Sci. Council., v.25, n.3, pp. 137-150, 2001.

ANEXO A

(informações sobre a Região Amazônica e estações de referência)

HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS E IMPORTÂNCIA SÓCIO-ECONÔMICA DA REGIÃO DE ESTUDO

A.1 – Histórico e Características da Região Estudada

Existe uma grande discussão sobre a real extensão do Rio Amazonas. Boa parte da literatura admite que esse rio se origina no lago Lauri (Lauricocha), nos Andes peruanos, nascedouro do rio Marañon, tendo, assim, cerca de 5.500 km de extensão e tornando-se o terceiro mais extenso do mundo, atrás do Nilo e do Mississipi-Missouri. Já outros estudos mais detalhados (GRANDE, 1955), indicam que seu principal formador é o rio Ucaiali, o que implicaria numa real extensão de 6.577 km (MAGALHÃES FILHO, 1960), sendo, neste aspecto, superado apenas pelo rio Nilo (6.696 km). Mas segundo estudos mais recentes, este rio nasce a 5.300 metros de altitude, na montanha Nevado Mismi, nos Andes peruanos. Por este motivo, já é reconhecido pela *National Geographic Society* e pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) como o maior rio do mundo, tanto em extensão - com 6.885 km, onde supera por 214 km o Rio Nilo, que era considerado o mais extenso - como em volume d'água, pois despeja no mar cerca de 209.000m³ de água por segundo, o equivalente a um quinto de todos os rios do planeta. Até chegar à denominação de Amazonas, o rio é chamado de Apurimac, Ucayali e Solimões.

Esta bacia hidrográfica ocupa uma área total de aproximadamente 6.925.000 km², se levarmos em consideração sua nascente na Cordilheira dos Andes, até sua foz no oceano Atlântico, abrangendo territórios de sete países sul-americanos, conforme o quadro a seguir.

Tabela A.1 - Bacia Amazônica

| PAÍSES | Área (km ²) | Participação na Bacia (%) |
|-----------|-------------------------|---------------------------|
| Bolívia | 954.340 | 15,61 |
| Brasil | 4.718.067 | 63,88 |
| Colômbia | 986.600 | 16,14 |
| Equador | 141.000 | 2,31 |
| Guiana | 82.250 | 1,35 |
| Peru | 36.980 | 0,60 |
| Venezuela | 6.437 | 0,11 |
| Total | 6.925.674 | 100 |

Fonte: DNAEE (1994)

Abrangendo sete estados brasileiros, mais de 60% da área dessa bacia está em território nacional; por predominância do clima tropical úmido, a pluviosidade em toda a sua extensão é bastante elevada. A vazão média na foz é de cerca de 209.000 m³/s (DNAEE, 1996), sendo que 62% (129.000 m³/s) desta descarga é gerada em território nacional, representando, portanto, 72% da produção hídrica brasileira.

Figura A.1 – região de estudo.

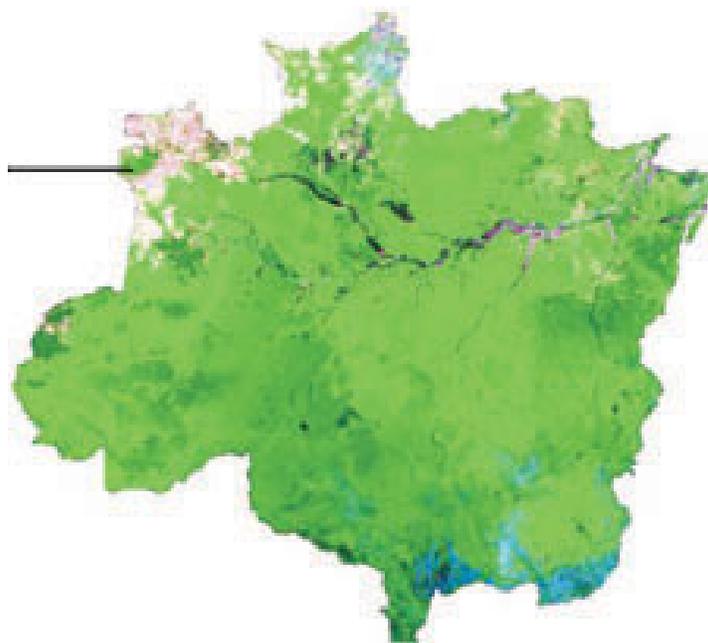


Figura A.1 - Região de estudo Fonte: DNAEE (1994)

Sua extensão é da ordem de 6.600 km, com velocidades escoamento variáveis de 0,7 a 1,9 m/s, e com descargas entre 21.500 e 286.000 m³/s, em Óbidos. Suas profundidades são bastante variáveis, ultrapassando em alguns pontos os 100 m.

É um rio de regime pluvio-niveal, tendo como principais formadores ocidentais os rios Marañon, Caquetá, Putumaio, Napo, Huallaga e Ucayali que, por terem suas nascentes na Cordilheira dos Andes, estão sobre a influência do degelo.

Predominam nessa bacia dois tipos de rios: os de planície, como o próprio Amazonas, o Madeira, o Içá-Putumaio, o Purús, o Juruá e o Negro, e os de planalto, como o Xingu, o Tapajós, o Trombetas e o Jari.

Destaca-se que, aproximadamente, 50% das hidrovias brasileiras encontram-se nesta Bacia e que o Rio Amazonas-Solimões é navegável para embarcações de pequeno e médio porte durante todo o ano, desde sua foz até a cidade de Iquitos, no Peru, num percurso total superior a 3.300 km.

De acordo com as estimativas da Organização dos Estados Americanos, OEA, a rede hidroviária total da Amazônia tem aproximadamente 25.000 km, sendo assim a mais extensa rede fluvial da terra.

Os índices pluviométricos médios anuais oscilam entre 1.000 mm a 3.600 mm. No geral, a época chuvosa ocorre a partir de dezembro ou janeiro e tem a duração aproximada de seis meses (meses de verão e outono), sendo que as maiores chuvas ocorrem em março ou abril. Quanto ao regime térmico, há a predominância de um clima quente, com a média da temperatura anual variando entre 24°C e 26°C, na maior parte da Bacia (Agência Nacional de Águas - ANA, 2003).

Essa Bacia Hidrográfica é capaz de permitir a internacionalização do transporte hidroviário a médio e longo prazo, através das seguintes hidrovias:

1. Atlântico-Pacífico, através do rio Amazonas, com alternativas de interação rodofluvial e ferroviário-fluvial, via Peru, em Paita e Boyavar, respectivamente.
2. Colômbia-Ecuador, através da ligação dos rios Amazonas e Putumayo.
3. Acre-Pacífico, que liga a Hidrovia do rio Madeira, BR-364, Porto Moldonado e Porto Ilo, no Peru.



(Fonte: DNAEE, 1994.)

A.2 – Importância Econômico-Social da Região a ser Estudada

Mesmo quando excluída a produção hídrica referente à Bacia do rio Tocantins, a Bacia do Amazonas se apresenta como a mais caudalosa do mundo, com cerca de 209.000 m³/s, superando, só para se ter uma idéia, em mais de três vezes àquela que corresponde ao rio Mississipi-Missouri (da ordem de 65.100 m³/s).

Devemos, ainda, considerar a presença da maior Floresta Tropical do globo e, mais relevante ainda, é a excepcional biodiversidade do ecossistema, com uma ictiofauna rica e

diversificada (mais de 3.000 espécies), que constitui a base alimentar das populações ribeirinhas.

Outro fator inegável é a navegação hidroviária, que se constitui na principal modalidade de transporte desde o início do processo de colonização da região; esta rede hidroviária tem uma extensão total superior a 20.000 km.

Partindo-se de um desenvolvimento sustentável, pode-se incrementar as atividades turísticas, dando-se ênfase ao ecoturismo e, com isso, melhor valor à sua riqueza ambiental.

A Agência Nacional de Águas (ANA) destaca ainda, entre outros fatores, os seguintes:

- o Rio Amazonas escoada cerca de 15% do deflúvio médio mundial, sendo a bacia hidrográfica de maior produção hídrica do globo terrestre (vazão média de 209.000 m³/s);

- a Floresta Amazônica representa aproximadamente 1/3 de todas as florestas tropicais úmidas;

- a Amazônia desponta no cenário mundial como o ecossistema de maior biodiversidade (cerca de 30.000 espécies vegetais de grande porte, mais de 300 de mamíferos e 2.000 de peixes); e este excepcional bioma se desenvolveu a partir da grande disponibilidade de recursos hídricos, guardando com estes uma relação indissociável.

Considera-se que a disponibilidade hídrica brasileira é de, aproximadamente, 258.000 m³/s, se for levada em conta toda a vazão escoada pela foz do rio Amazonas, incluindo a proveniente de países vizinhos, estimada em 209.000 m³/s. Conclui-se que esse potencial hídrico corresponde a 63% do total referente à América do Sul e a 14% do total mundial (1.488.000 m³/s; UNESCO, 1978).

Com um potencial hidrelétrico aproximado de 105.000 MW (o que corresponde a cerca de 41% do respectivo total nacional), apenas 0,4% corresponde a aproveitamentos

Anexo A

hidrelétricos em operação ou construção (UHE's Samuel, Balbina, Curuá-Una e Coaracy Nunes). Ressalta-se a previsão da ELETROBRÁS que em 2009 haja a entrada em operação da hidrelétrica de Belo Monte, com uma capacidade de 11.000 MW, no rio Xingu. Mais de 45% da área do território nacional está relacionada com a Bacia Amazônica, como pode-se ver no quadro a seguir:

Tabela – A.2 - Área dos Estados na Bacia do Rio Amazonas

| ESTADOS | Área (km ²) | Part. na Bacia (%) | % da Área do Estado |
|-------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| Acre | 153149.9 | 3.92 | 100,0 |
| Amapá | 44870.2 | 1.15 | 31,3 |
| Amazonas | 1577820.2 | 40.41 | 100,0 |
| Pará | 1049903.5 | 26.89 | 83,8 |
| Rondônia | 238512.8 | 6.11 | 100,0 |
| Roraima | 225116.1 | 5.77 | 100,0 |
| Mato Grosso | 615020.1 | 15.75 | 67,8 |
| Total | 3904392.8 | 100 | - |

(Área dos Estados na Bacia do Rio Amazonas Fonte: IBGE, 1994.)

A.3 – Estações usadas como referência

Borba

Caldeirão

Conceição

Fonte Boa

Foz do Rio Madeira

Humaitá

Iracema

Itacoatiara

Anexo A

Itapeua

Manacapuru

Manicoré

Nova Olinda do Norte

Óbidos

Oriximiná

Paricatuba

Parintins

PK625

Porto Velho

São Paulo de Olivença

Santo Antônio do Içá

Tabatinga

Tefé

Urucurituba

Vista Alegre

ANEXO B

(Formulação Matemática)

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O problema é aproximado, inicialmente, especificando a interação do som com uma única partícula. O espalhamento do som por uma esfera elástica é um problema clássico na acústica submarina. A pressão (P_s) de retorno de uma partícula num *beam* de um transceptor pode ser expressa como:

$$P_s = a_s P_o r_o \frac{D^2}{2r^2} f_m \exp\{i[2r(k + i\alpha_w) - wt]\} \quad (\text{B.1})$$

onde:

P_o = pressão de transmissão num raio r_o (normalmente = 1 m)

a_s = raio da partícula

r_o = distância da partícula

D = função de diretividade do transceptor

k = número de onda

w = frequência angular

α_w = atenuação feita pela água

f_m = função de forma. Descreve a propriedade de espalhamento da partícula

Para uma nuvem de espalhadores, a equação (B.1) precisa ser integrada em todo o volume ensonificado pelo pulso acústico que se propagou através da coluna d'água. Usando a função de forma para uma simples partícula que descreve de maneira aproximada, o sinal de retorno para um volume elementar, δV , de espalhadores é (SHENG & HAY, 1988; THORNE et al., 1990; HAY, 1991):

$$\langle \delta P_{ms} \rangle = \frac{P_o r_o (\langle |f_m|^2 \rangle > D^4)^{1/2}}{r^2} \left\{ \frac{3}{16\pi p_s \langle a_s \rangle} \right\}^{1/2} \cdot e^{-2\alpha_w r (M\delta V)^{1/2}} \quad (\text{B.2})$$

onde:

$$\langle a_s \rangle = \int_0^{\infty} a_s p(a_s) da_s \quad (\text{B.3})$$

$$\langle |f_m|^2 \rangle = \frac{\int_0^{\infty} a_s p(a_s) da_s \cdot \int_0^{\infty} a_s^2 |f_m|^2 p(a_s) da_s}{\int_0^{\infty} a_s^3 p(a_s) da_s} \quad (\text{B.4})$$

$\langle \delta P_{rms} \rangle$ = raiz quadrada de pressão elementar por *ensemble*

M = concentração de massa por unidade de volume

ρ_s = densidade da partícula

$\rho(a_s)$ = função de densidade de probabilidade do tamanho da partícula.

Reescrevendo a equação (B.2) e assumindo que a fase do sinal de espalhamento é uniformemente distribuída em 2π e que o sinal de retorno é incoerente, uma integral pode ser conduzida acima do volume ensonificado e a média quadrática da pressão de retorno por ensemble pode ser escrita como:

$$\langle P_{rms} \rangle = K_0 e^{-2\alpha r} \quad (\text{B.5})$$

$$k_o = \frac{P_o r_o}{\psi r} \left(\langle |f_m|^2 \rangle \right)^{1/2} \left\{ \frac{3\pi M}{16 \langle a_s \rangle \rho_s} \right\}^{1/2} \left[\int_0^{\pi/2} \frac{\{2J_1(ka_i \sin\theta)\}^4 \sin\theta d\theta}{ka_i \sin\theta} \right]^{-1/2} \quad (\text{B.6})$$

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s \quad (\text{B.7})$$

onde:

$$\psi = 1 \quad \text{para } r > \epsilon r_n \quad (\text{campo distante}) \quad (\text{B.8})$$

$$\psi = [2 + (\epsilon r_n / r)] / 3 \quad \text{para } r < \epsilon r_n \quad (\text{campo próximo}) \quad (\text{B.9})$$

$$\left[\int_0^{\pi/2} \frac{\{2J_1(ka_t \sin \theta)\}^4 \sin \theta d\theta}{ka_t \sin \theta} \right]^{1/2} \approx \frac{1}{1.05ka_t}$$

(B.10)

onde:

J_1 = função de primeira ordem de Bessel, que descreve a diretividade usual do transceptor empregado;

a_t = raio de transceptor;

θ = ângulo do eixo acústico

α_s = atenuação feita pela suspensão;

c = velocidade do som na água;

τ = duração do pulso;

ψ = termo usado para modificar a dependência do alcance de acordo com a distância ao transceptor;

$\varepsilon = 2$; e

$r_n = \pi a_t^2 / \lambda$, sendo λ o comprimento da onda acústica.

Ressalta-se que é válida a aproximação feita pela equação (B.10) quando metade dos feixes tiverem largura menor que 15° (caso comumente empregado em todo o mundo para transceptores de alta frequência usados para estudar sedimentos) e que esta aproximação feita difere no máximo em 3% ou 3 dB (THORNE et al., 1992).

Múltiplos espalhadores de primeira ordem são introduzidos pela atenuação feita pelo sedimento α_s , e pode ser descrito como:

$$\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \xi(r) M(r) dr \quad (\text{B.11})$$

onde ξ é conhecido como a constante de atenuação do sedimento. O coeficiente de atenuação é dado por:

$$\alpha_s = N \frac{\sigma_t}{2} \quad (\text{B.12})$$

sendo:

N = o número de partículas por unidade de volume; e

σ_t = é a seção normal total dos espalhadores.

É conveniente normalizar σ_t pelo dobro da seção normal geométrica da partícula (THORNE et al., 1992), ou seja, $\chi = \sigma_t / 2\pi a_s^2$, sendo conhecido como a seção normal total normalizada dos espalhadores.

Reexpressando essas equações em termos de concentração de massa (THORNE et al., 1992), temos:

$$\alpha_s = \frac{3M}{4 \langle a_s \rangle \rho_s} \langle \chi \rangle \quad (\text{B.13})$$

onde:

$$\langle \chi \rangle = \frac{\int_0^{\infty} a_s p(a_s) da_s \int_0^{\infty} a_s^2 \chi p(a_s) da_s}{\int_0^{\infty} a_s^3 p(a_s) da_s} \quad (\text{B.14})$$

A constante de atenuação do sedimento pode, agora, ser descrita como:

$$\xi = \frac{3}{4 \langle a_s \rangle \rho_s} \langle \chi \rangle \quad (\text{B.15})$$

Para avaliar as equações (B.5) e (B.15), é preciso saber como as partículas em suspensão enviam o sinal de retorno acústico e como é sua atenuação.

Em razão disso, temos que especificar a função de forma f_m e a seção normal total do espalhador χ . Para esferas, a expressão analítica para esses dois parâmetros pode ser dada por:

Anexo B

$$f_m = \frac{2}{ix} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)(-1)^n b_n \quad (\text{B.16})$$

$$x = \frac{2}{x^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) |b_n|^2 \quad (\text{B.17})$$

$x = ka_s$ e o coeficiente b_n foram apresentados por GAUNAURD & UBERELL (1983), e podem ser descritos pela seguinte relação:

$$b_n = \frac{\begin{vmatrix} \beta_1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \beta_2 & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ 0 & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ 0 & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}} \quad (\text{B.18})$$

$$\beta_1 = -x_t^2 \frac{\rho}{\rho_s} j_n(x) \quad (\text{B.19})$$

$$\beta_2 = x j_n'(x) \quad (\text{B.20})$$

$$\alpha_{11} = x_t^2 \frac{\rho}{\rho_s} h_n^{(1)}(x) \quad (\text{B.21})$$

$$\alpha_{21} = -x h_n^{(1)}(x) \quad (\text{B.22})$$

$$\alpha_{12} = [2n(n+1) - x_t^2] j_n(x_t) - 4x_t j_n'(x_t) \quad (\text{B.23})$$

$$\alpha_{22} = x_t j_n'(x_t) \quad (\text{B.24})$$

$$\alpha_{32} = 2[j_n(x_t) - x_t j_n'(x_t)] \quad (\text{B.25})$$

$$\alpha_{13} = 2n(n+1)[x_t j_n'(x_t) - j_n(x_t)] \quad (\text{B.26})$$

$$\alpha_{23} = n(n+1)j_n(x_t) \quad (\text{B.27})$$

$$\alpha_{33} = 2x_t j_n'(x_t) + [x_t^2 - 2n(n+1) + 2]j_n(x_t) \quad (\text{B.28})$$

onde:

$$x = ka_s; \quad x_t = x \frac{c}{c_t} \quad \text{e} \quad x_l = x \frac{c}{c_l}$$

j_n e h_n são as funções esféricas de Bessel de primeira e terceira ordem, e os (') denotam as diferenciações e seus respectivos argumentos;

c é a velocidade do som na água;

c_l e c_t são a compressão e a onda de cisalhamento, respectivamente na esfera;

k é o número de onda na água;

a_s é o raio da esfera;

ρ é a densidade da água; e

ρ_s é a densidade da esfera.

Os valores de fm e χ geralmente não são conhecidos, pois as partículas possuem formas irregulares. Para se obterem estimadores desses parâmetros, quando consideramos corpos não simétricos, uma aproximação semi-heurística tem sido adotada em vários trabalhos (JOHNSON, 1977; SHENG & HAY, 1988; STANTON, 1989). As três aproximações são essencialmente similares e provêm à solução uma simples comparação analítica com as equações (B.16) e (B.17). A legitimação destas expressões reside com base que para uma suspensão com espalhadores de características irregulares, os detalhes de variação em fm e χ para corpos simétricos não estão presentes. Sabe-se que as características do sinal de retorno para formas irregulares de grãos de areia é cerca de 60% maior que para uma esfera de tamanho equivalente

Anexo B

(THORNE, 2002). SHENG & HAY (1987) apresentaram modificações nestas expressões, conforme estão mostradas abaixo:

$$|f_m^{ir}| = C_0 \frac{K_f x^2}{1 + K_f x^2} \quad (\text{B.29})$$

$$C_0 = \{1 - v_1 \exp[-((x - x_1)/\eta_1)^2]\} \{1 + v_2 \exp[-((x - x_2)/\eta_2)^2]\} \quad (\text{B.30})$$

e

$$x^{ir} = \frac{(4/3)K_\alpha x^4}{[1 + x^2 + (4/3)K_\alpha x^4]} \quad (\text{B.31})$$

onde:

$$k_f = \frac{2}{3} |y_k - y_\rho| \quad (\text{B.32})$$

$$k_\alpha = \frac{(y_k^2 + y_\rho^2 / 3)}{6} \quad (\text{B.33})$$

$$\gamma_k = (k_s - k_0)/(k_0) \quad (\text{B.34})$$

$$\gamma_\rho = 3(\rho_s - \rho_0)/(2\rho_s - \rho_0) \quad (\text{B.35})$$

onde: $v_1 = 0,25$; $x_1 = 1,4$; $\eta_1 = 0,5$; $v_2 = 0,37$; $x_2 = 2,8$; e $\eta_2 = 2,2$. Estes valores foram escolhidos por serem consistentes com os resultados de HAY (1991) *in* (THORNE et al., 1992). Ressalta-se que k e ρ são a compressibilidade e a densidade, respectivamente, e os subscritos s e 0 referem-se à suspensão e à água. Ao usarmos valores típicos de compressibilidade e densidade para água e sedimentos não coesivos, temos $K_f = 1,1$ e $K_\alpha = 0,18$.

As variações de f_m , $\langle f_m \rangle$ e f_m^{ir} foram calculadas (HAY, 1991), enquanto os resultados para χ , $\langle \chi \rangle$ e χ^{ir} , foram demonstrados por SHENG & HAY (1988).

Temos valores decrescentes e convergentes, tanto para a função de forma, quanto para a seção transversal dos espalhadores quando $ka_s < 0,5$. Esta é a região de Rayleigh, ao contrário do que ocorre para valores acima $ka_s > 5$, conhecida como região geométrica, onde tanto a média quanto outros valores irregulares possuem curvas similares; entretanto, uma simples partícula pode responder por quase a totalidade da f_m .

Assim, temos que, na região de Rayleigh (Figura B.1), o fator determinante na intensidade do sinal de retorno, a partir de um volume d'água ensonificada, é a concentração de partículas presentes neste meio, uma vez que a frequência do sinal transmitido é a componente principal da equação. Já quando estamos fora desta região, ou seja, ao entrarmos na região dita geométrica, o fator preponderante deixa de ser a frequência do sinal transmitido e passa a ser a dimensão da partícula onde a onda sonora incide. Sendo assim, a intensidade do sinal refletido é mais influenciada pelo tamanho da partícula presente no meio que pela concentração dessas mesmas partículas.

A figura abaixo (Figura B.1) mostra estas duas regiões: do lado esquerdo, quase que uma reta, variando de 0 (zero) a 1 (um), enquanto que à direita, aparentando um sinal senoidal atenuado no tempo, está a região dita geométrica.

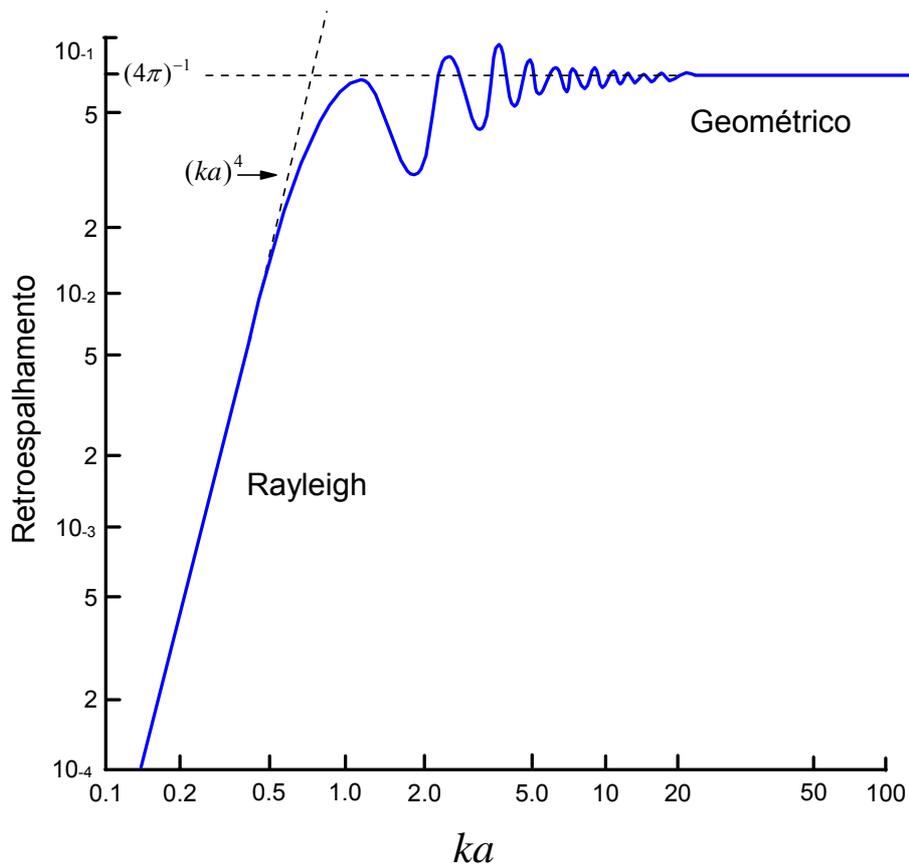


Figura B.1 – Curva de Rayleigh

A diferença está associada com a ressonância modal induzidas por uma ensonificação acústica. Trabalhos publicados por SHENG & HAY (1988); HAY (1991); THORNE et al. (1992), entre outros, mostram que uma simples expressão semi-heurística é capaz de proporcionar uma representação precisa destes parâmetros.

O foco destas equações é se chegar aos valores de $\langle \rho_{rms} \rangle$. A média quadrática do sinal de retorno é computada porque o sinal do espalhador vem de uma suspensão homogênea de uma concentração que não é constante, mas possui uma variação de fase randômica após retornar nos espalhadores. O resultado da suposição de uma fase randômica, estatisticamente distribuída em 2π foi dada por Rayleigh como uma probabilidade de distribuição para amplitudes, pela seguinte expressão:

$$\rho(A) = \frac{A}{\xi^2} e^{-(A^2/2\xi^2)} \quad (\text{B.36})$$

onde:

A = amplitude do sinal de pressão que retorna; e

ξ = variância da reverberação.

A expressão analítica pode ser obtida em vários momentos e usados da melhor maneira como:

$$\sigma_e(A) = \{(4 - \pi) / 4n\}^{1/2} A_{rms} \quad (\text{B.37})$$

onde:

$\sigma_e(A)$ = erro padrão de amplitude; e

n = número de observações independentes.

Para que seja possível obter 5% de acurácia em $\langle P_{rms} \rangle$, é necessário ter cerca de 100 observações independentes. Esta equação dará uma precisão de 10% em massa. A importância de natureza estatística do sinal de retorno é que se pode avaliar um compromisso entre as resoluções espaciais e temporais (THORNE et al., 1993).

Neste ponto, os estudos têm sido conduzidos para prognosticar a pressão do sinal de retorno, embora, para cálculo de SSC, 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. É aqui onde reside o problema, pois, neste caso, o que se deseja obter é o problema inverso, o que significa que a variável $\langle P_{rms} \rangle$ na equação (B.5) precisa ser empregada para avaliar concentração de sedimentos em suspensão. Esta concentração é obtida por rearranjo da equação (B.5), conforme mostrada a seguir:

$$M(r) = K_l^2 e^{4r\alpha} \quad (\text{B.38})$$

sendo:

$$K_l = \frac{\langle P_{rms} \rangle}{P_0 r_0} \frac{r\psi}{(\langle |f_m^2| \rangle)^{1/2}} \left\{ \frac{16 \langle a_s \rangle \rho_s}{3\tau} \right\}^{1/2} / \left[\int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{2J_1(ka_s \sin \theta)}{ka_s \sin \theta} \right\}^4 \sin \theta d\theta \right]^{1/2} \quad (\text{B.39})$$

Como pode se observar através da equação (B.38), para se obter $M(r)$, faz-se necessário saber o seu próprio valor, pois, a partir de um valor inicial, é possível calcular α_s na equação (B.11). Isto requer um procedimento onde, seqüencialmente, $M(r)$ é calculado e uma integração numérica é conduzida para avaliar α_s , repetindo-se esse cálculo passo-a-passo através da coluna de água, possibilitando, assim, a obtenção dos perfis de concentração de material sólido em suspensão.

ANEXO C

(Arquivos de Granulometria)

(EM MEIO DIGITAL)

ANEXO D

(Gráficos de Granulometria)

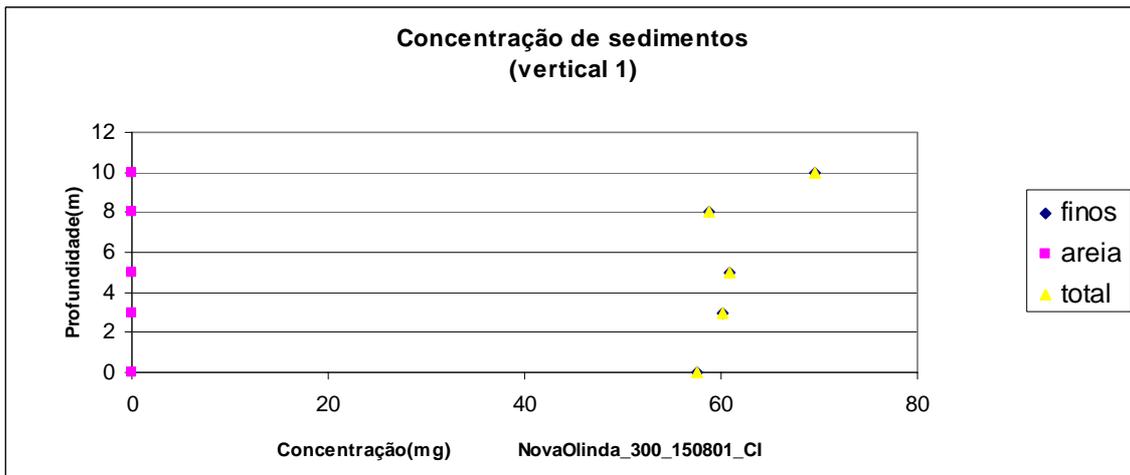
(EM MEIO DIGITAL)

ANEXO E

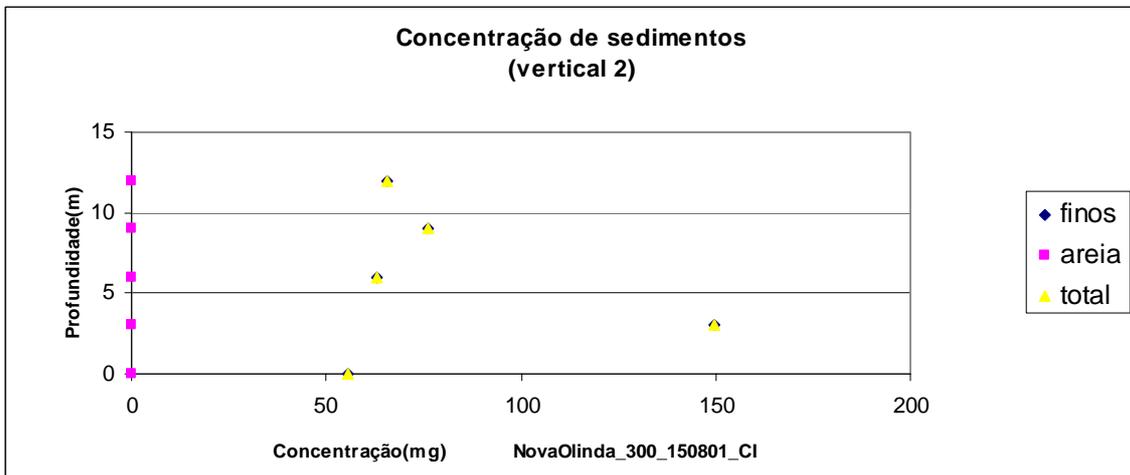
(Gráficos de Intensidade do Sinal de Retorno e de Concentração de Sedimentos)

(EM MEIO DIGITAL)

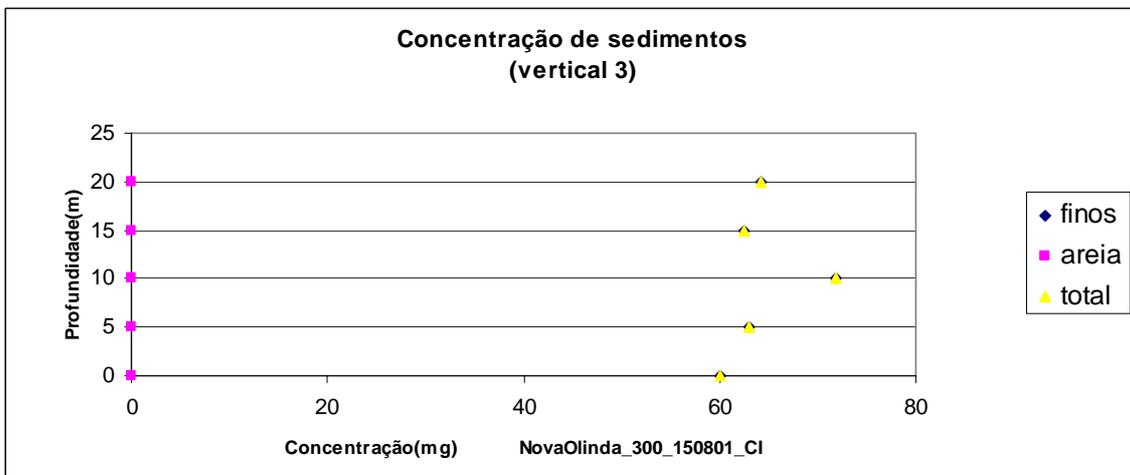
ANEXO F
(Gráficos do Capítulo 5)



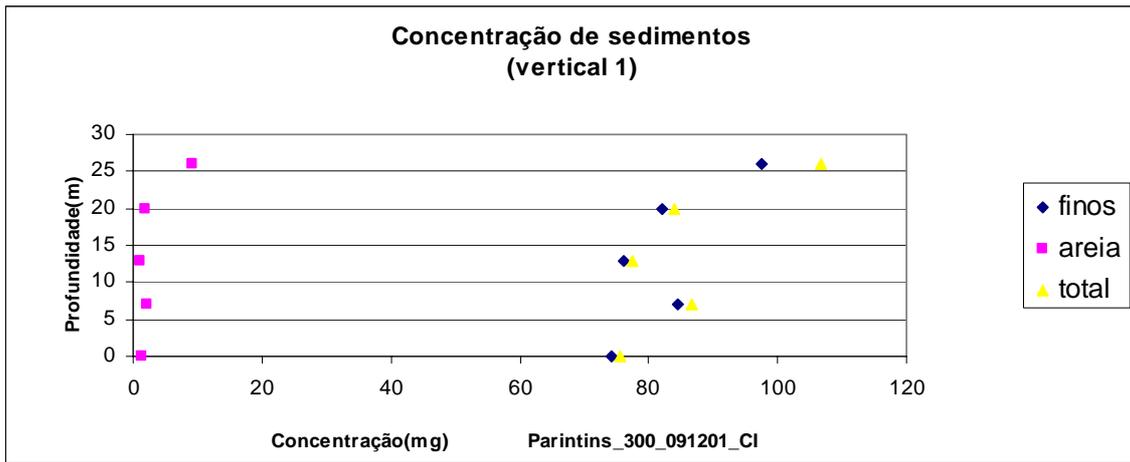
Gráficos 5.8



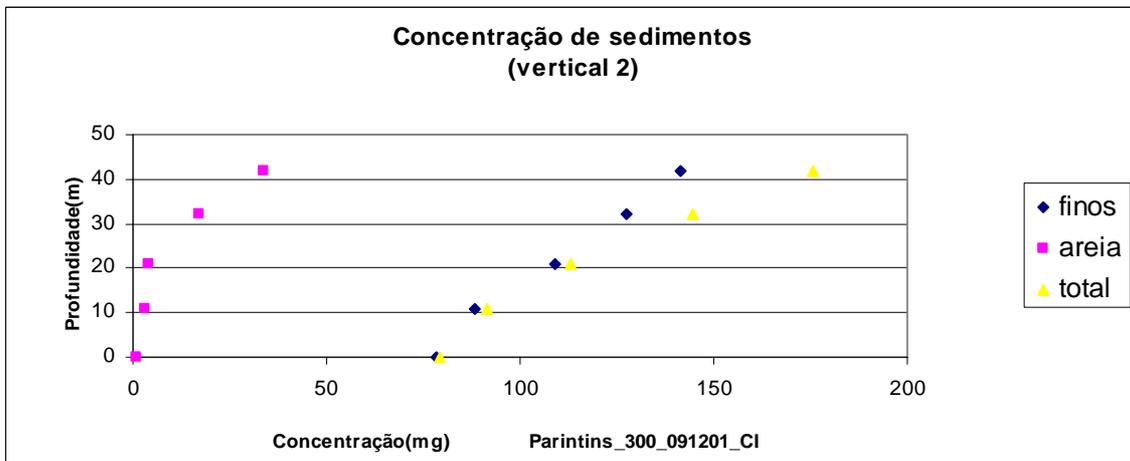
Gráficos 5.9



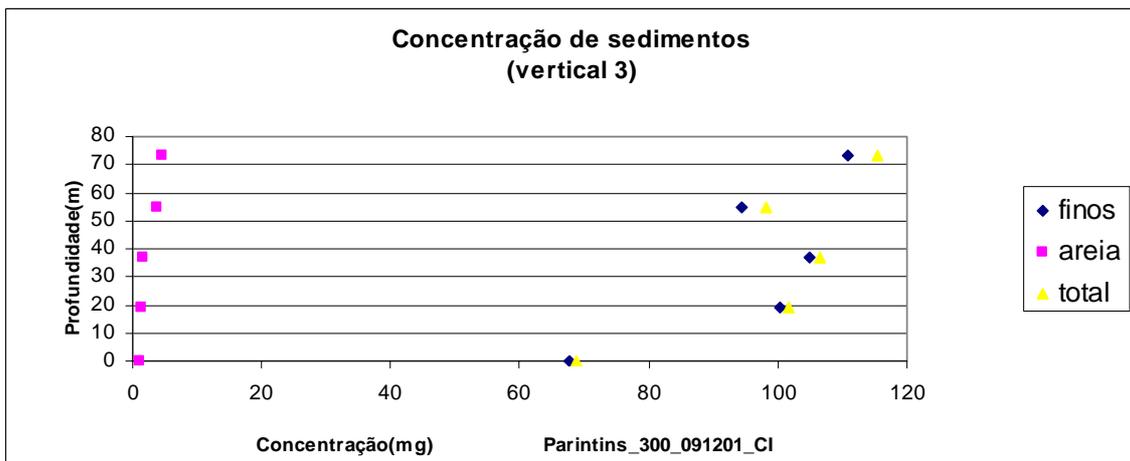
Gráficos 5.10



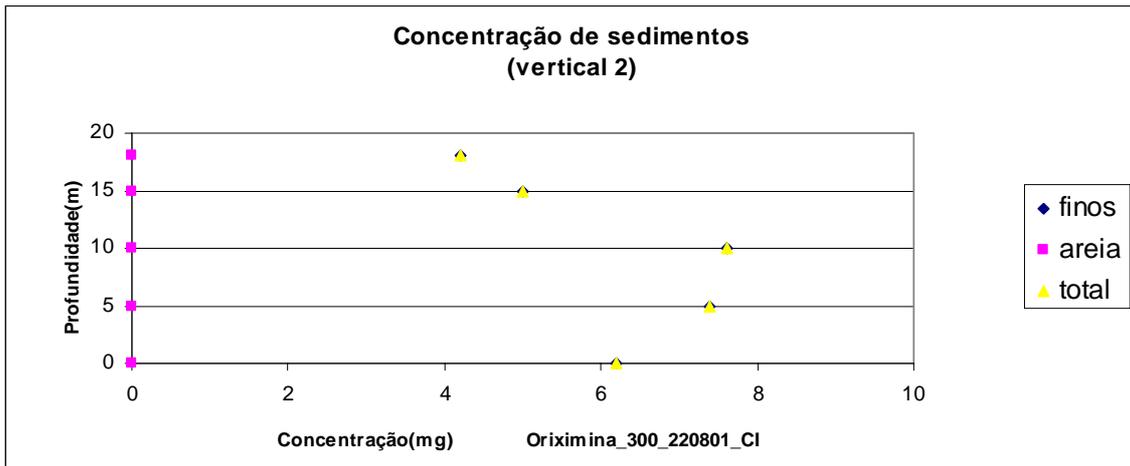
Gráficos 5.11



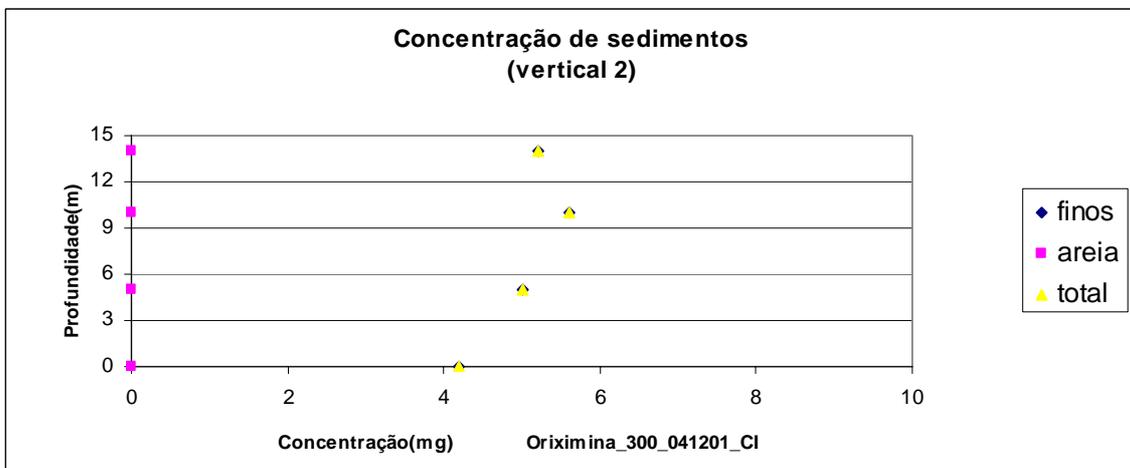
Gráficos 5.12



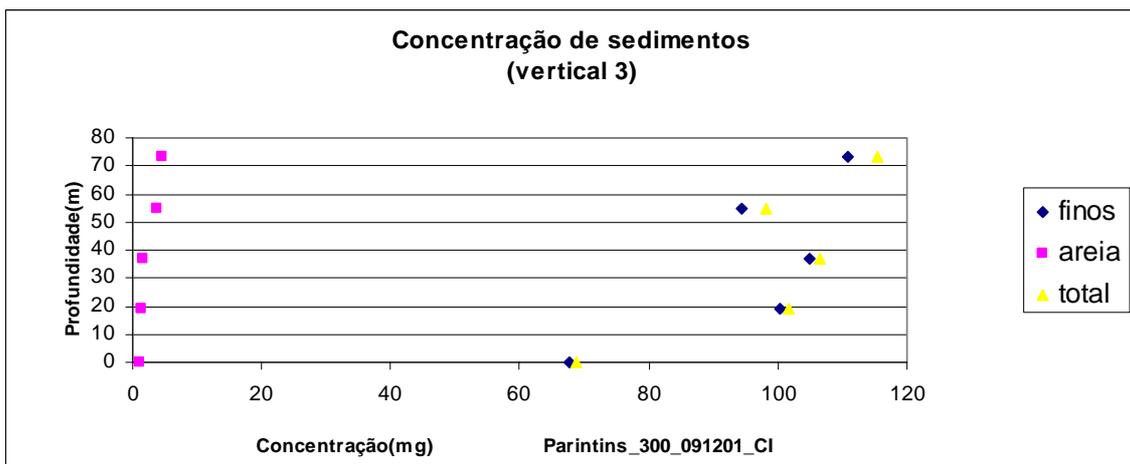
Gráficos 5.13



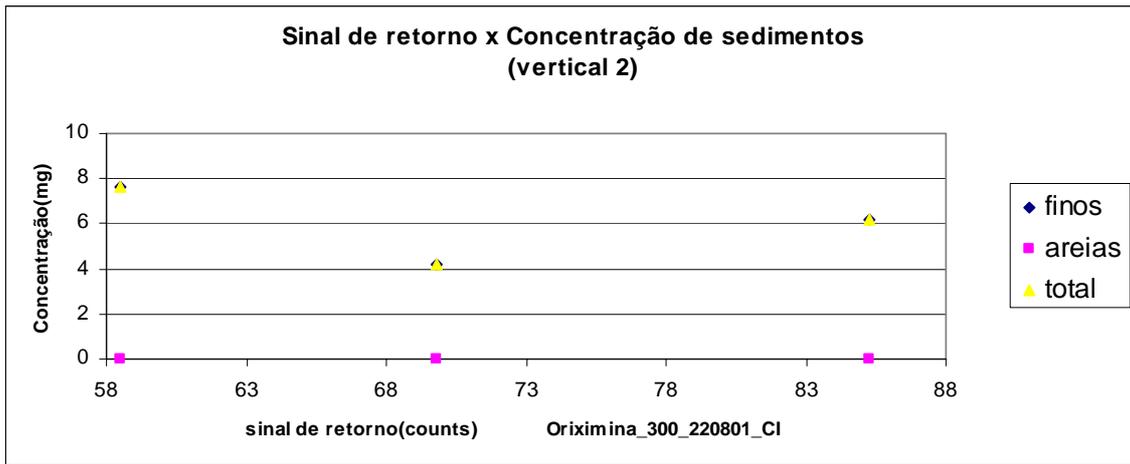
Gráficos 5.14



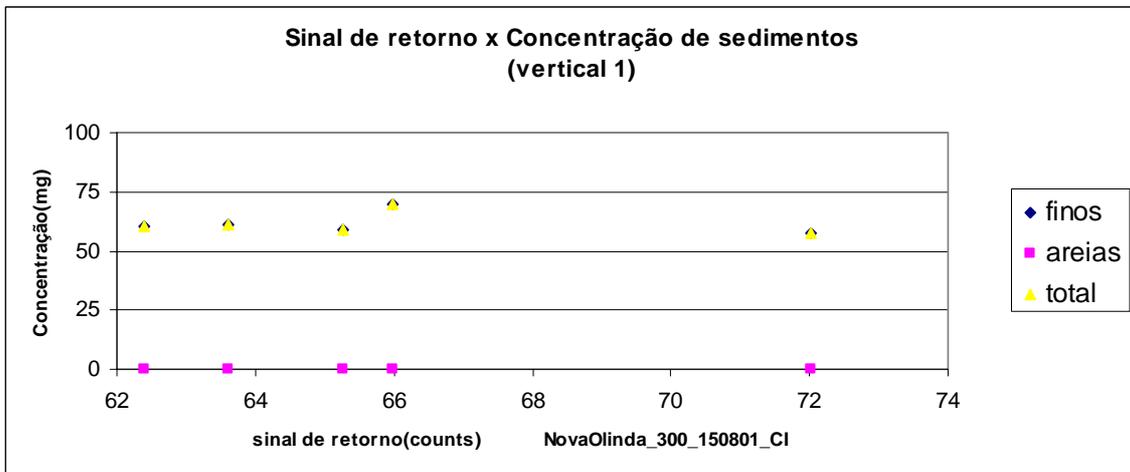
Gráficos 5.15



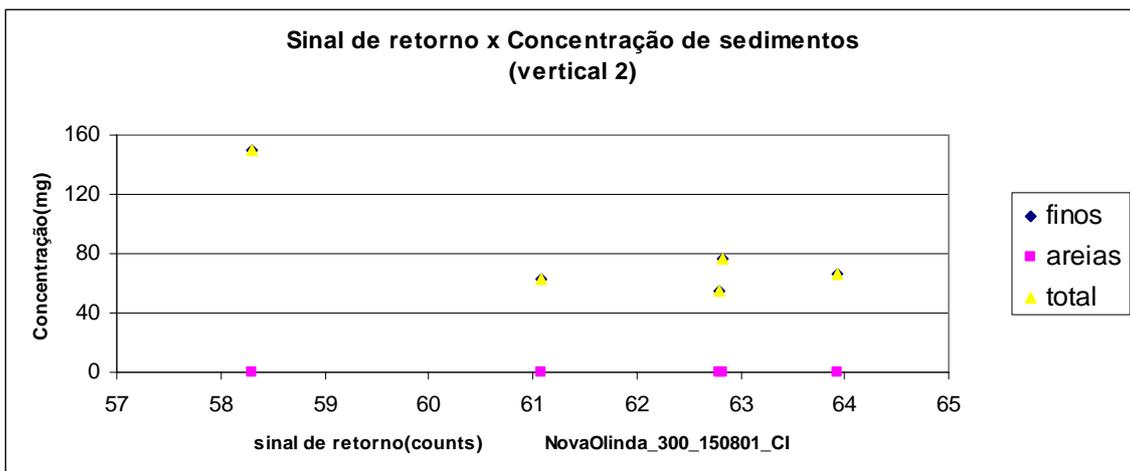
Gráficos 5.16



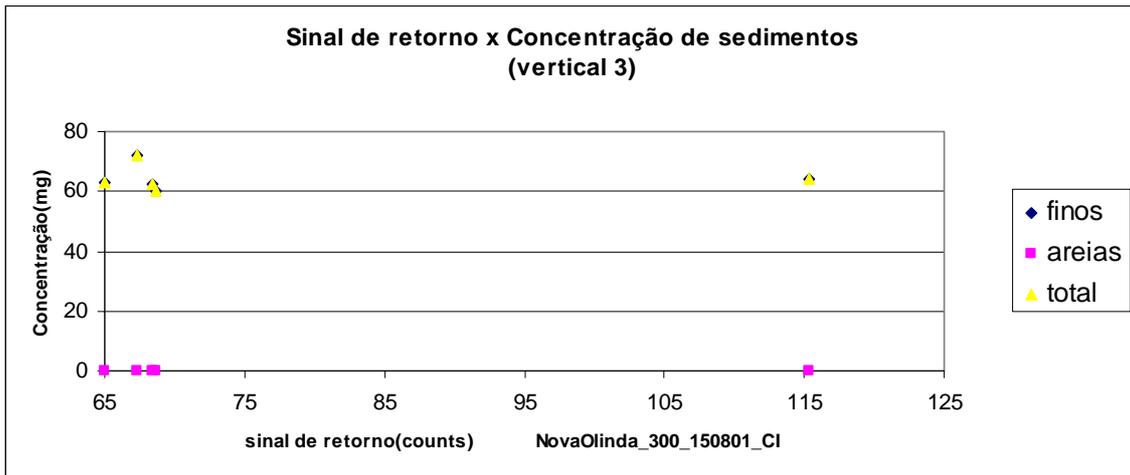
Gráficos 5.17



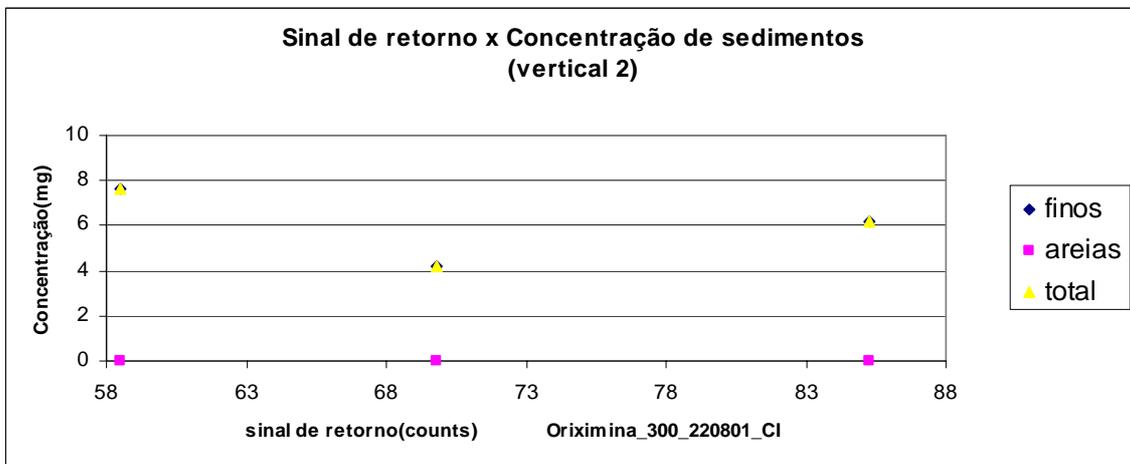
Gráficos 5.18



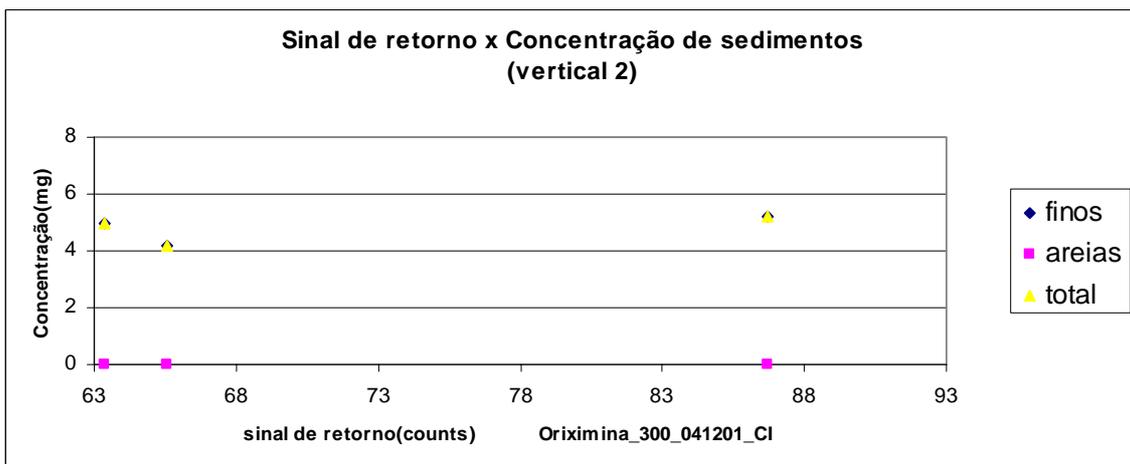
Gráficos 5.19



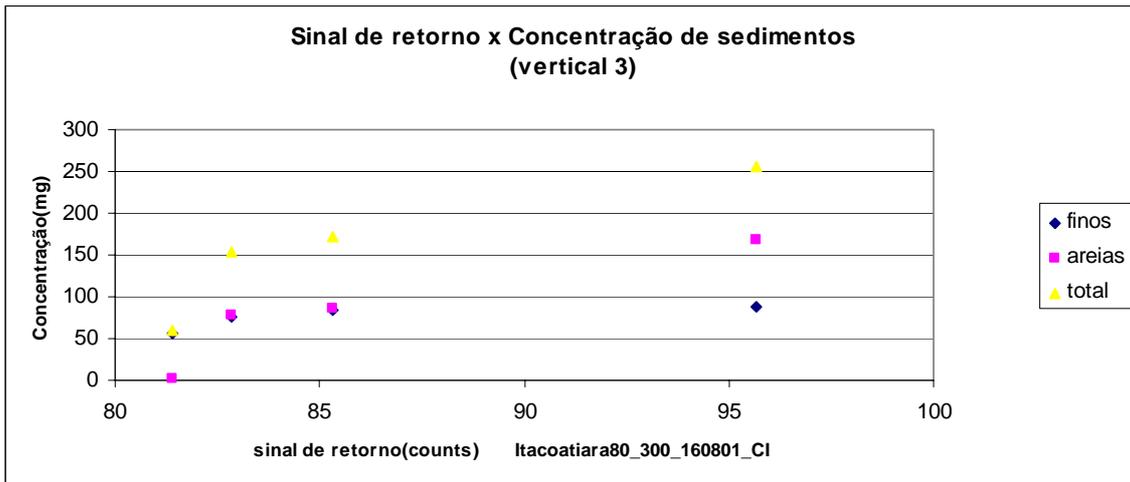
Gráficos 5.20



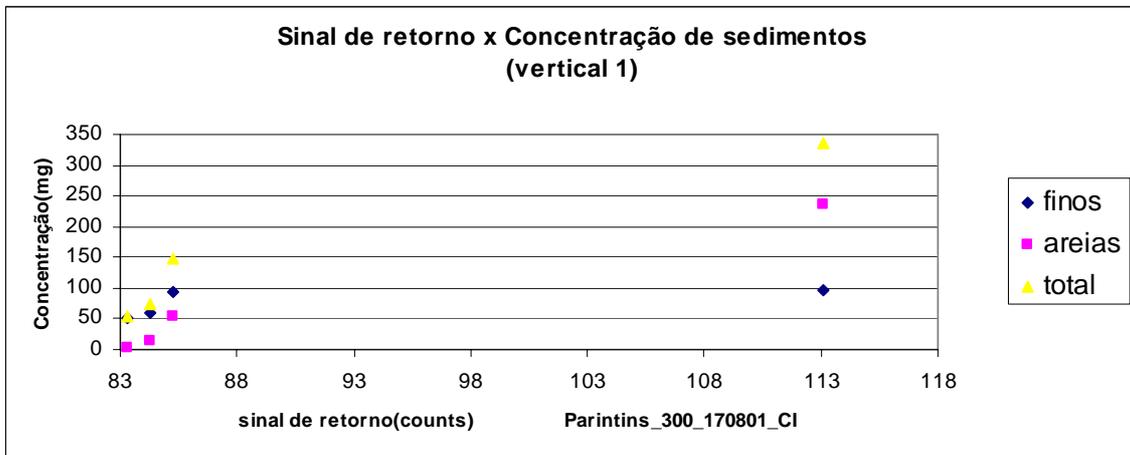
Gráficos 5.21



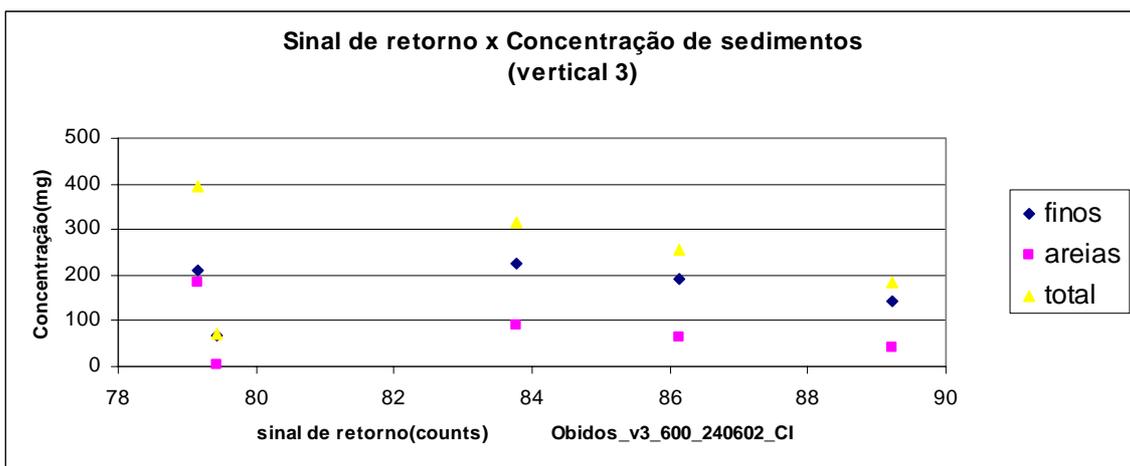
Gráficos 5.22



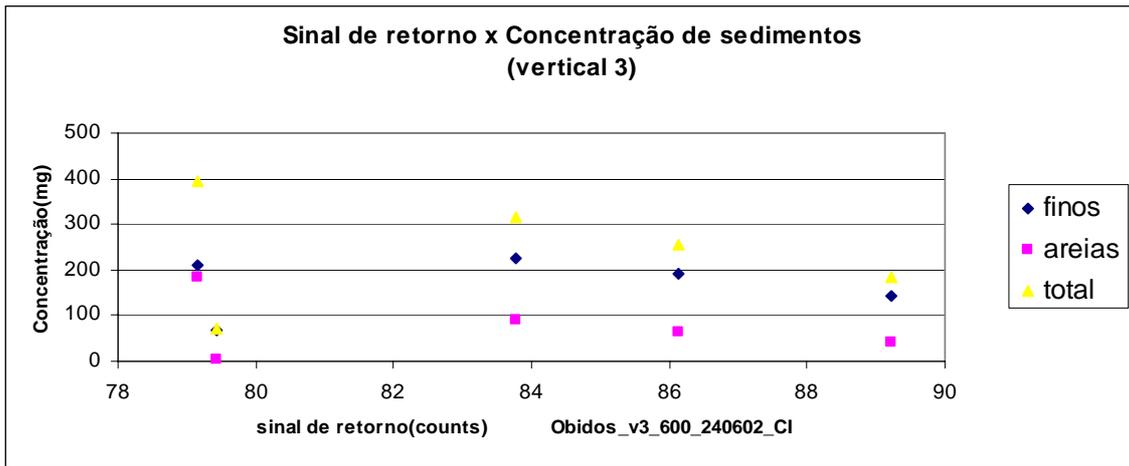
Gráficos 5.23



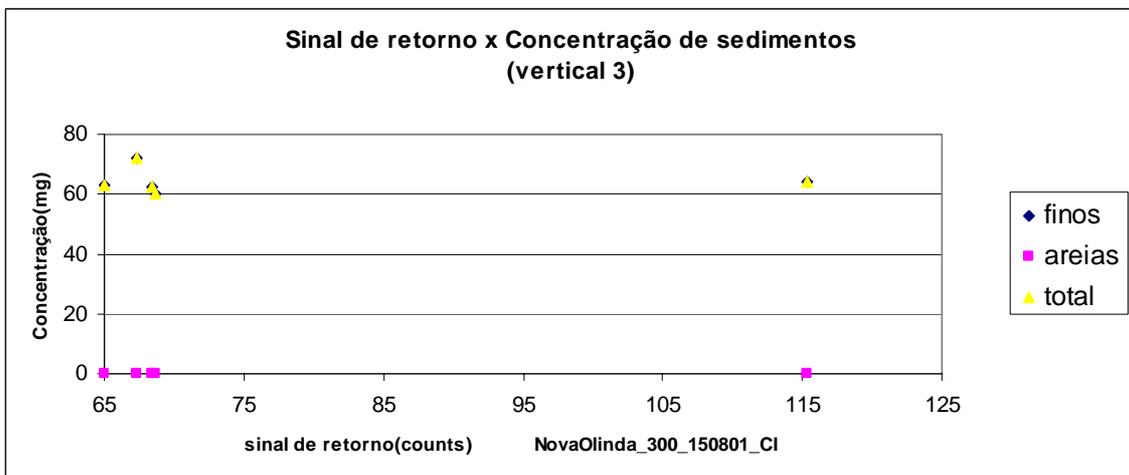
Gráficos 5.24



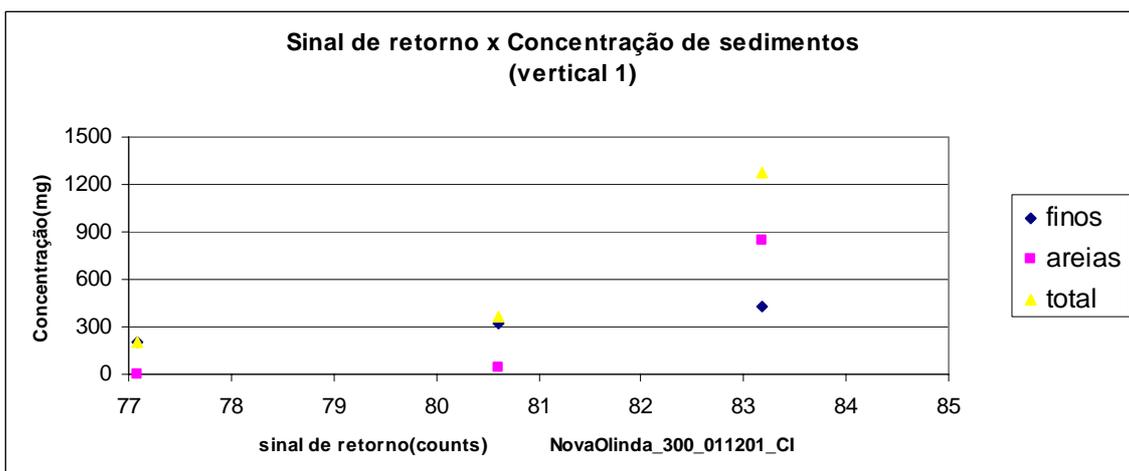
Gráficos 5.25



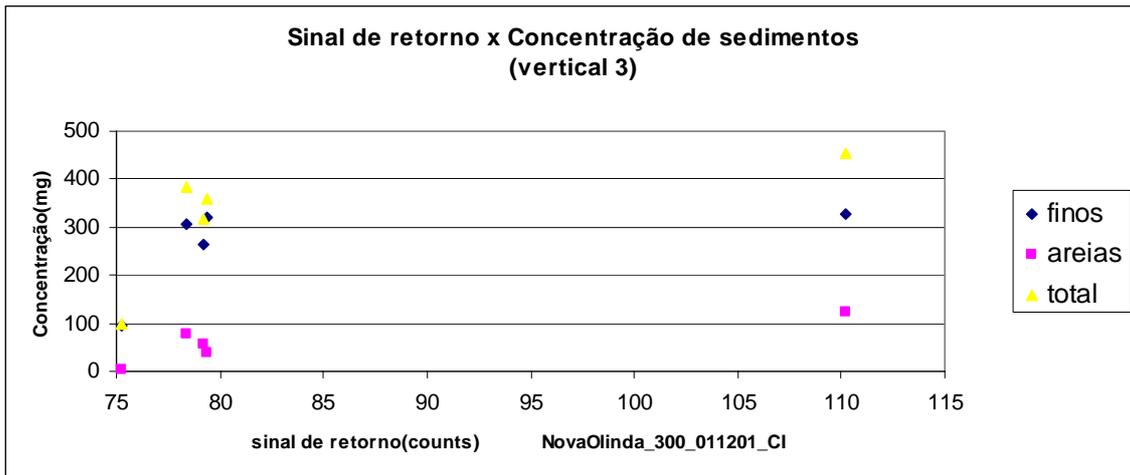
Gráficos 5.26



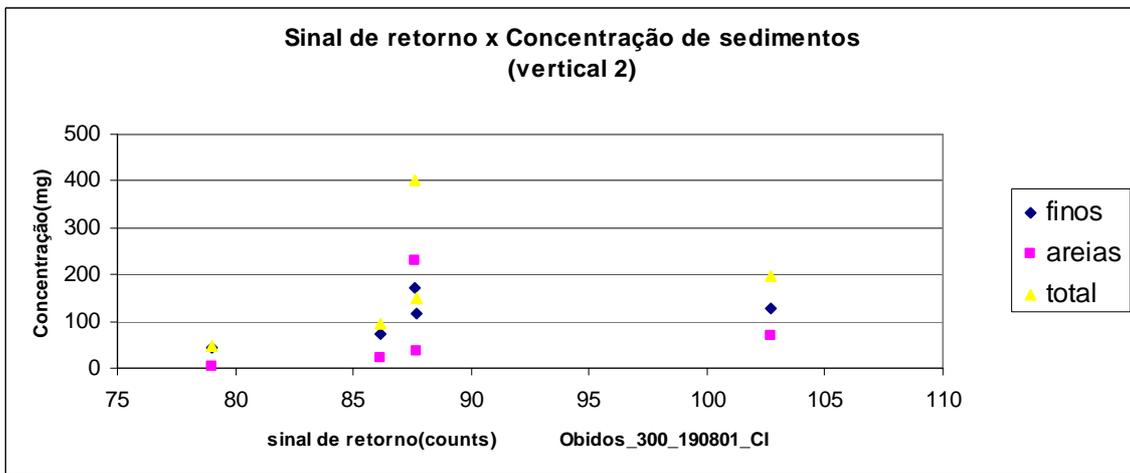
Gráficos 5.27



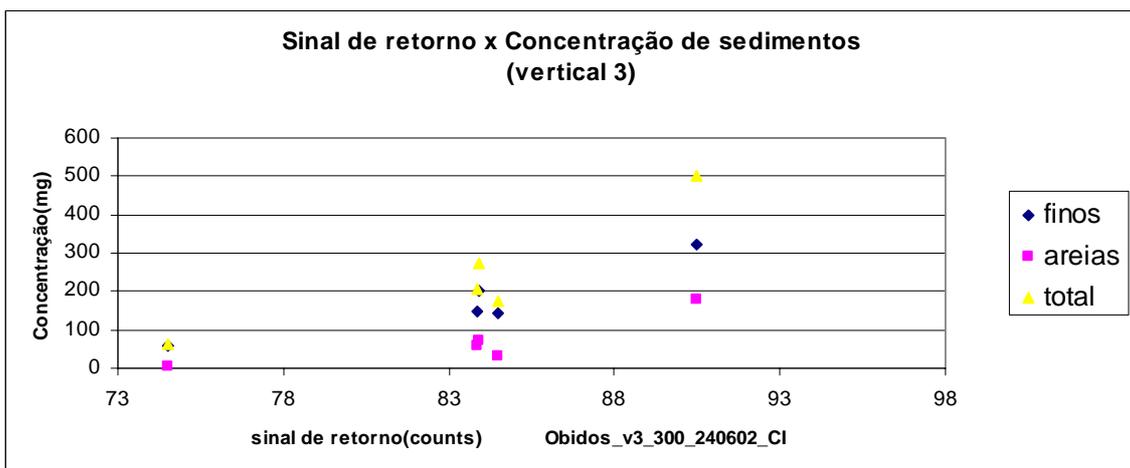
Gráficos 5.28



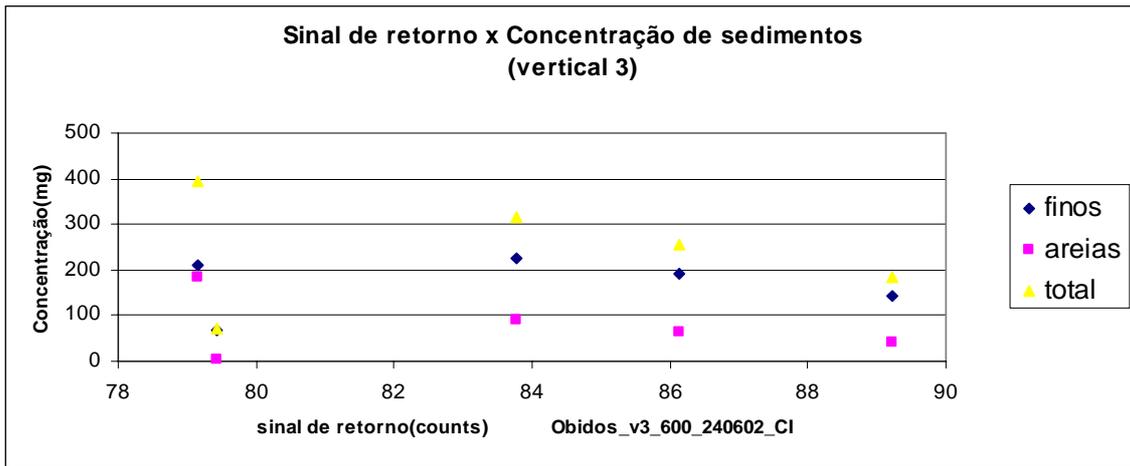
Gráficos 5.29



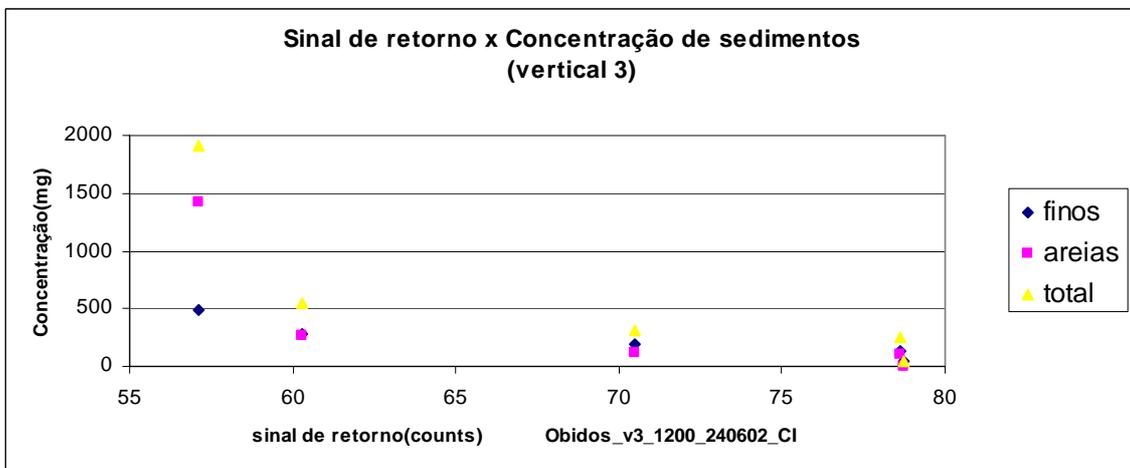
Gráficos 5.30



Gráficos 5.31



Gráficos 5.32



Gráficos 5.33

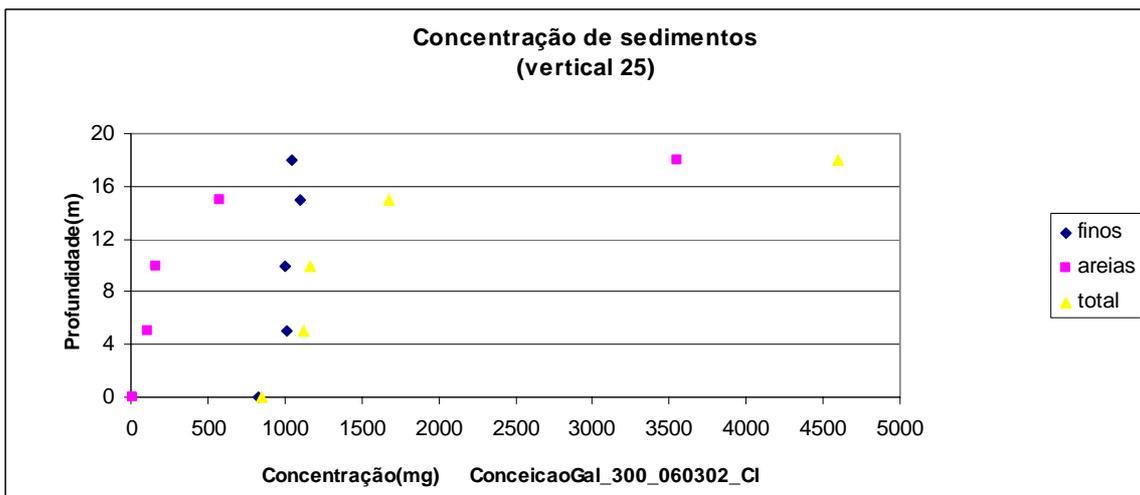


Gráfico 5.34

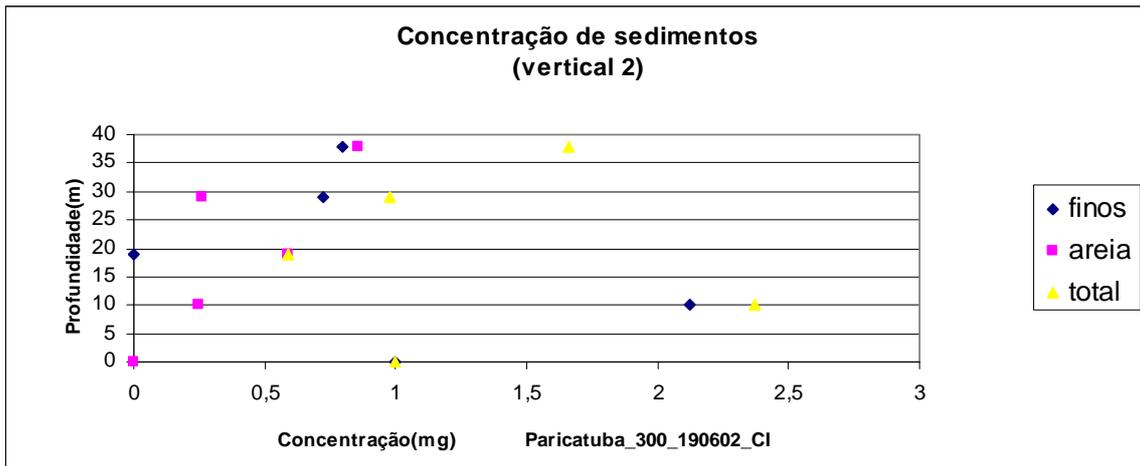


gráfico 5.35

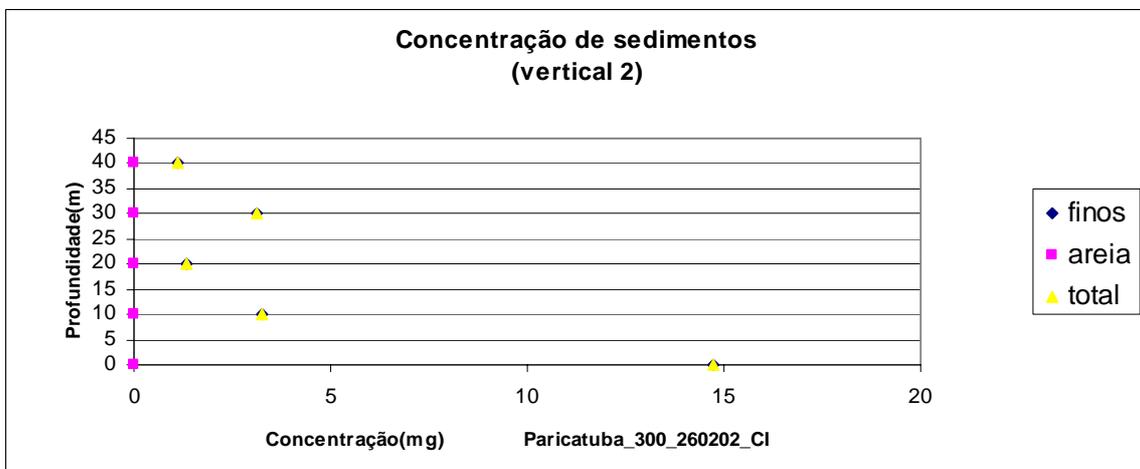


Gráfico 5.36

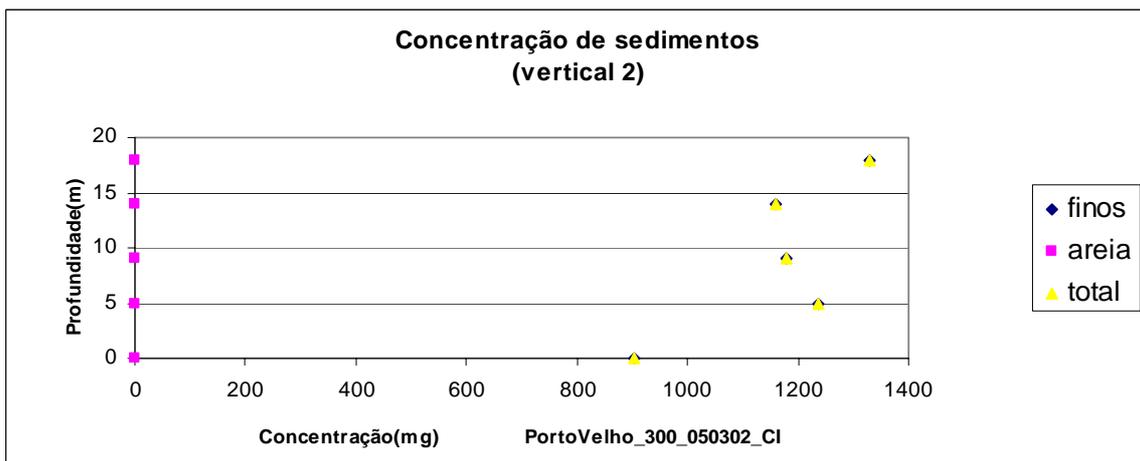


Gráfico 5.37

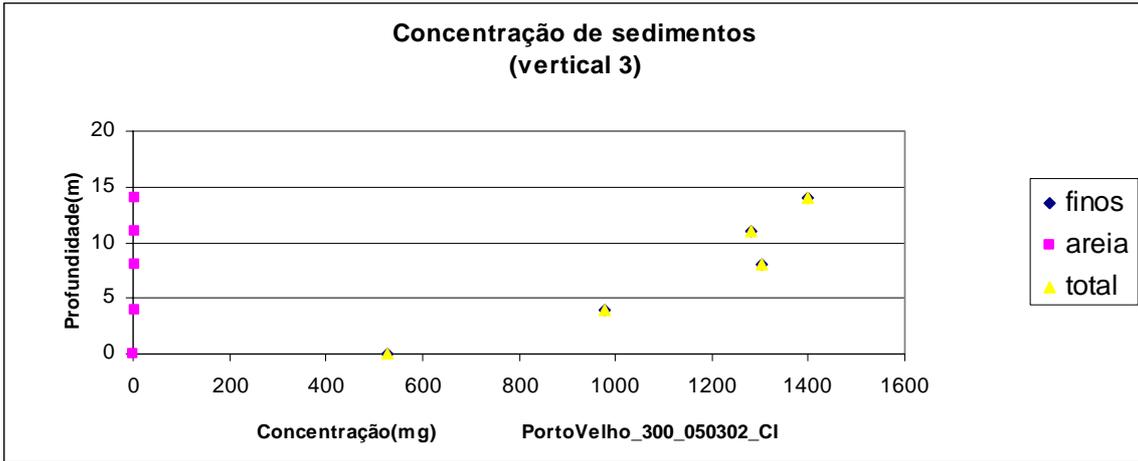


Gráfico 5.38

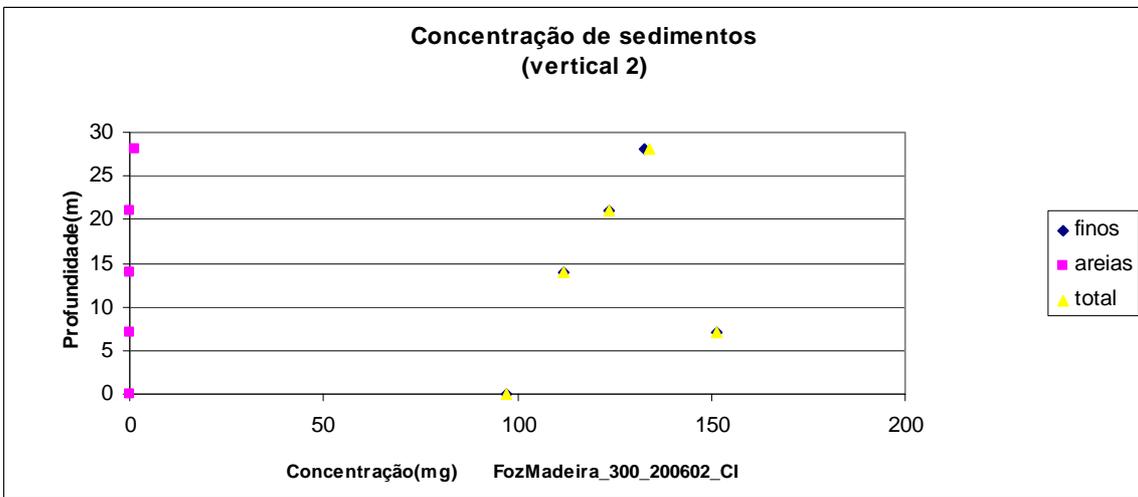


Gráfico 5.39

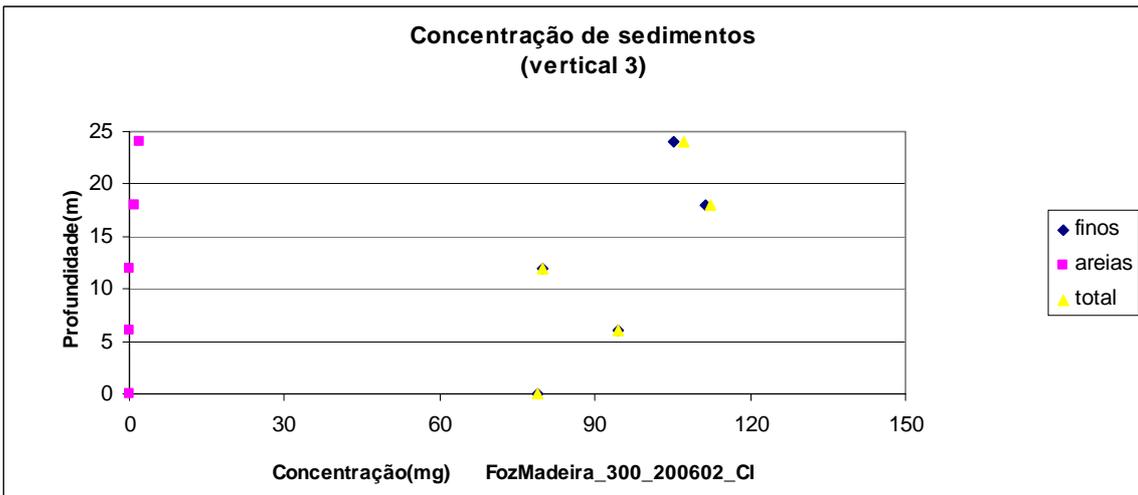


Gráfico 5.40

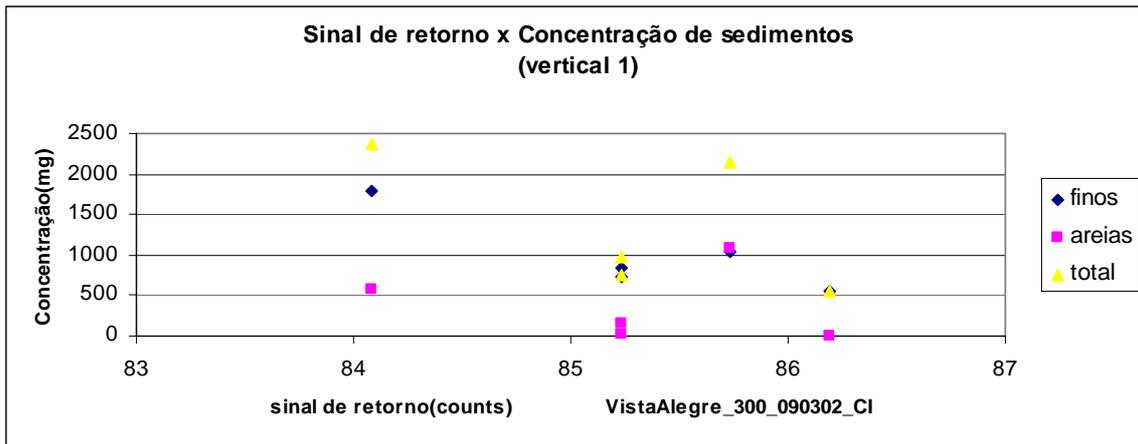


Gráfico 5.41

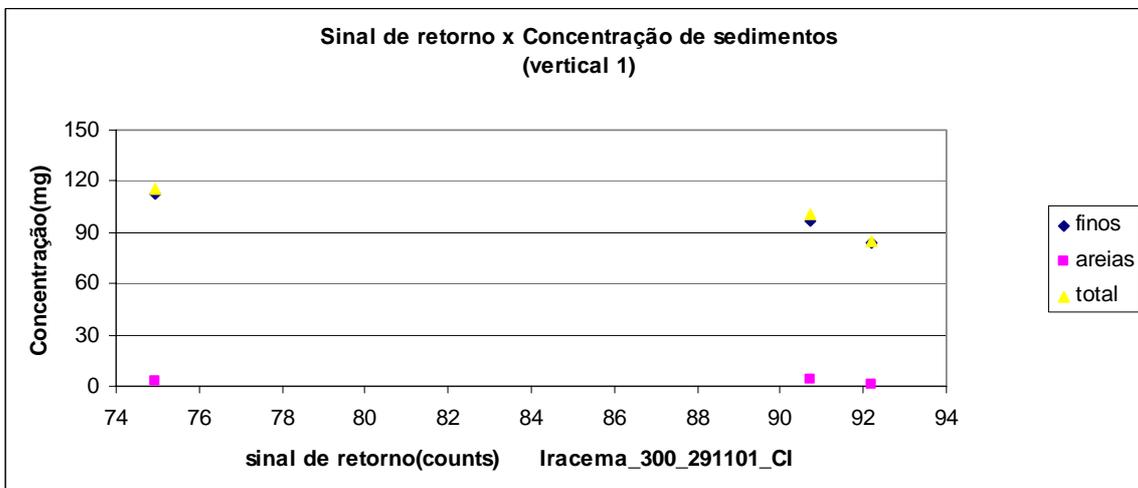


Gráfico 5.42

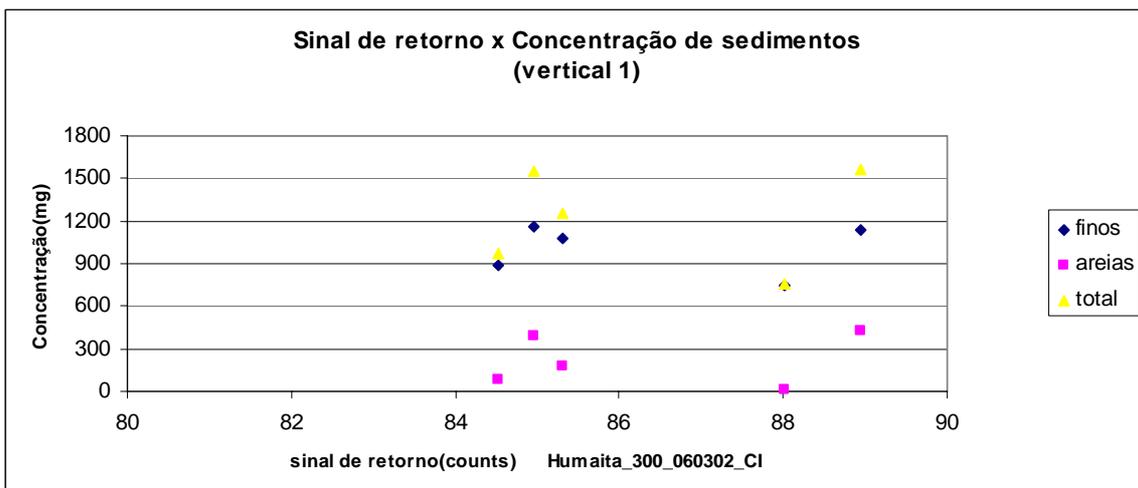


Gráfico 5.43

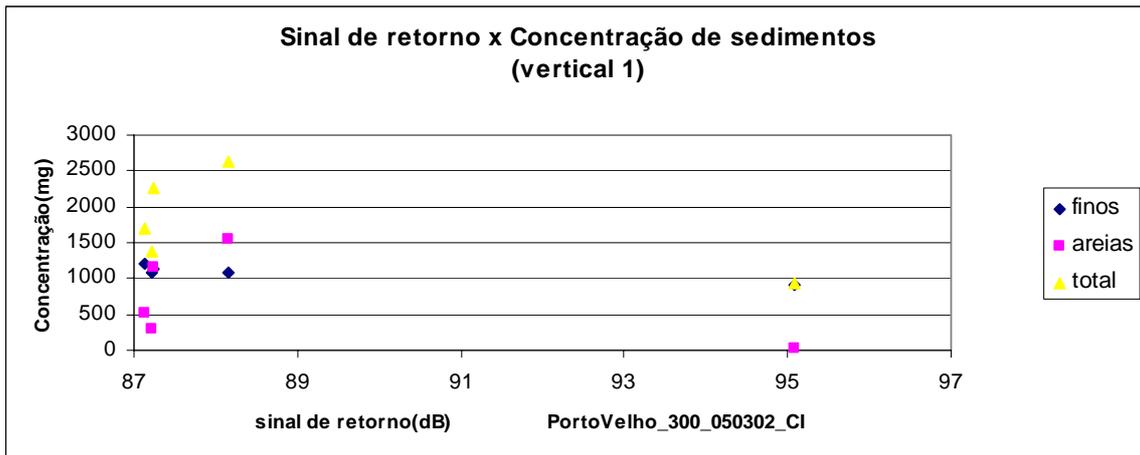


Gráfico 5.44

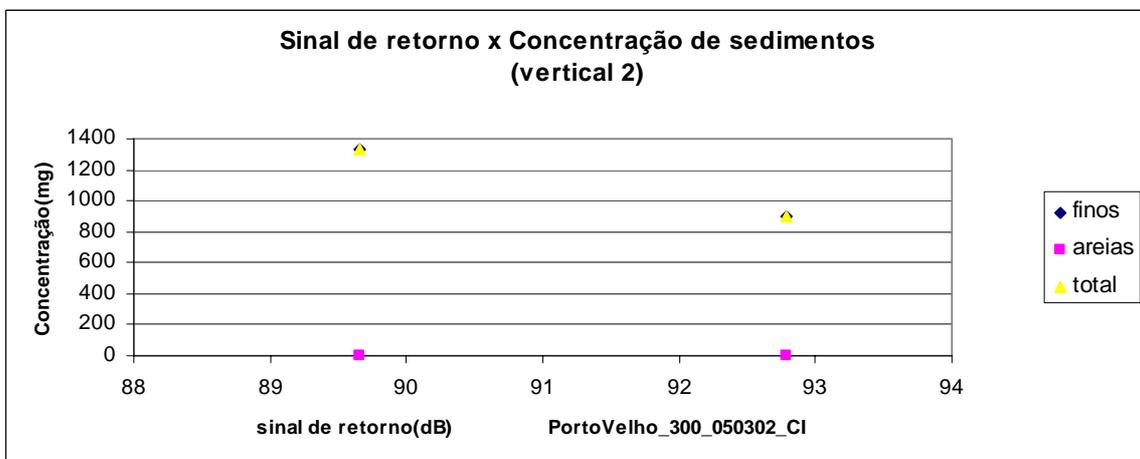


Gráfico 5.45

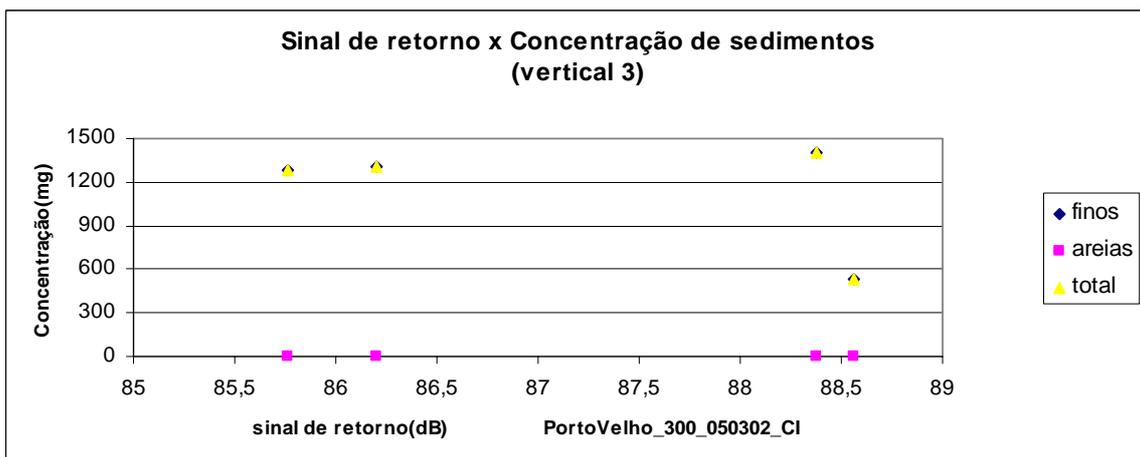


Gráfico 5.46

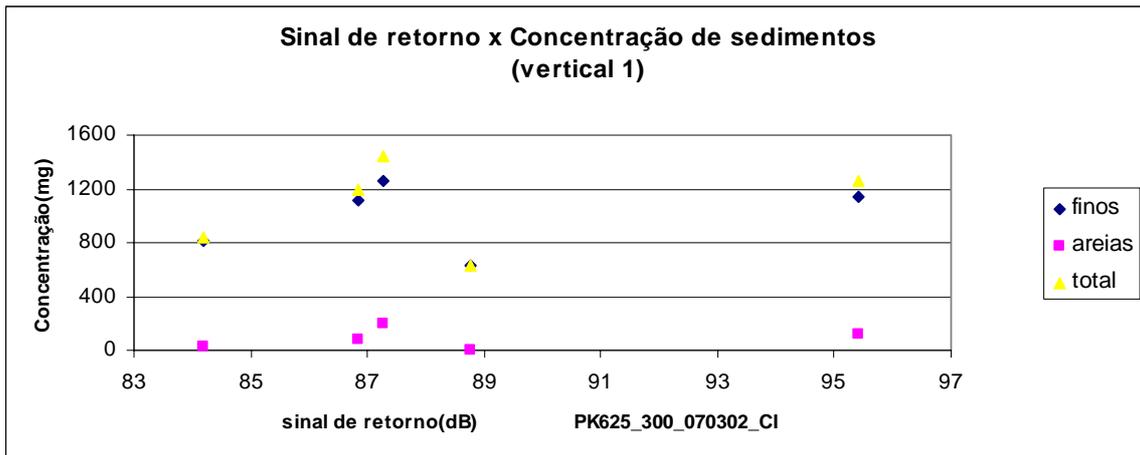


Gráfico 5.47

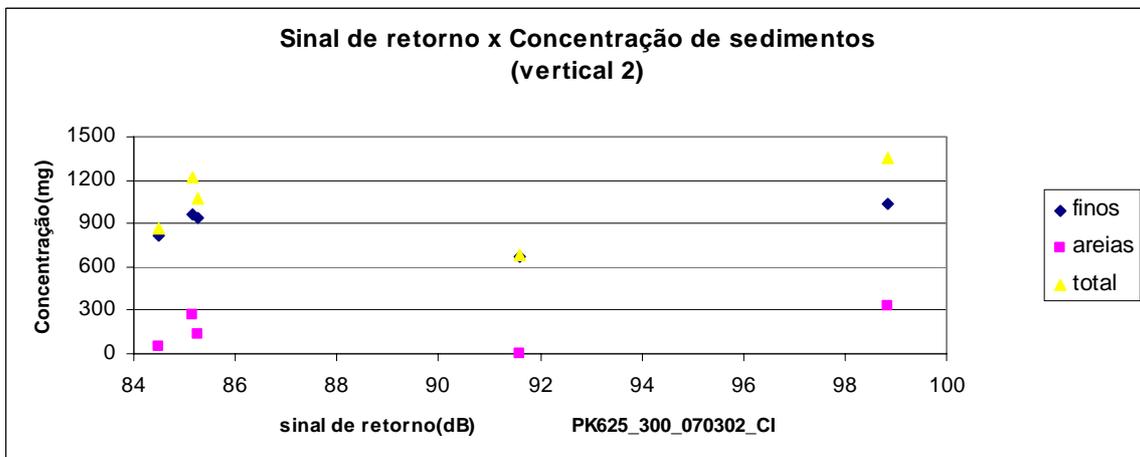


Gráfico 5.48

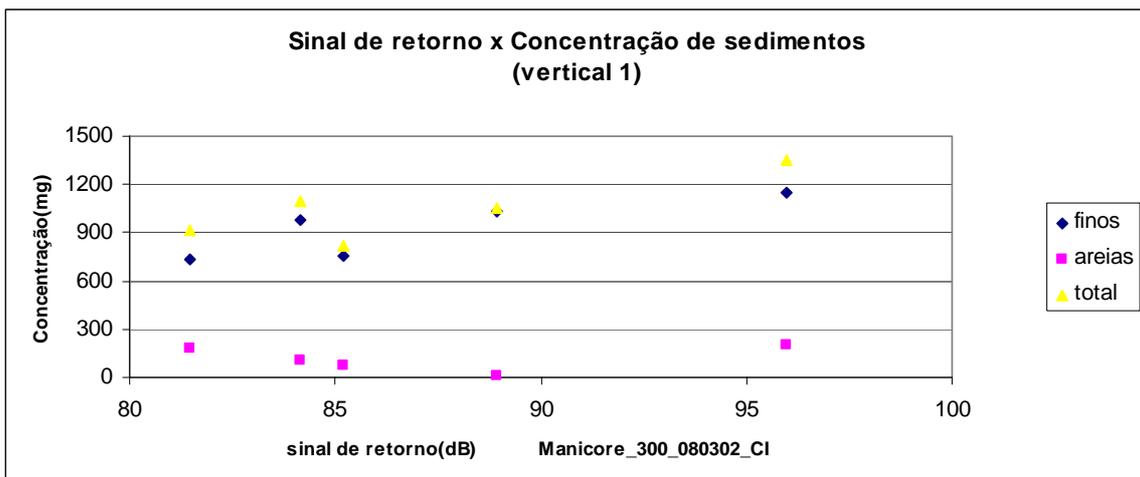


Gráfico 5.49

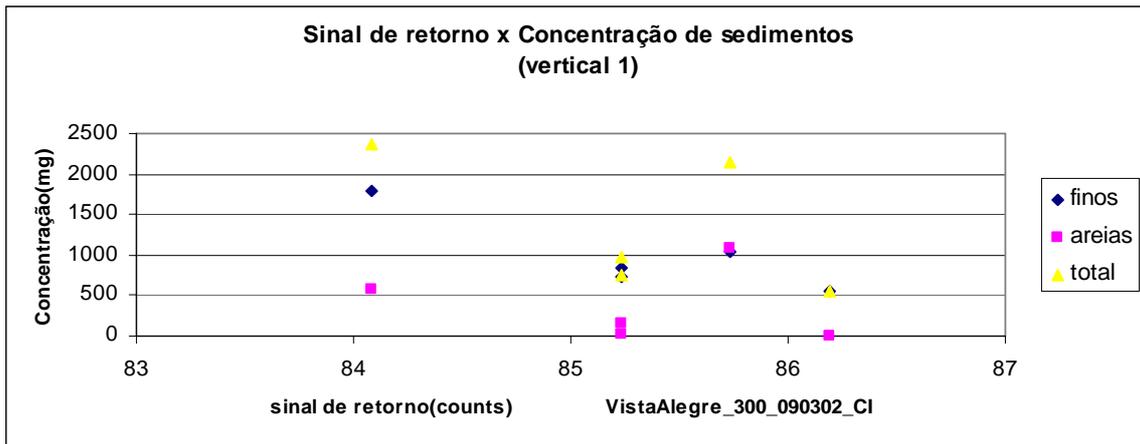


Gráfico 5.50

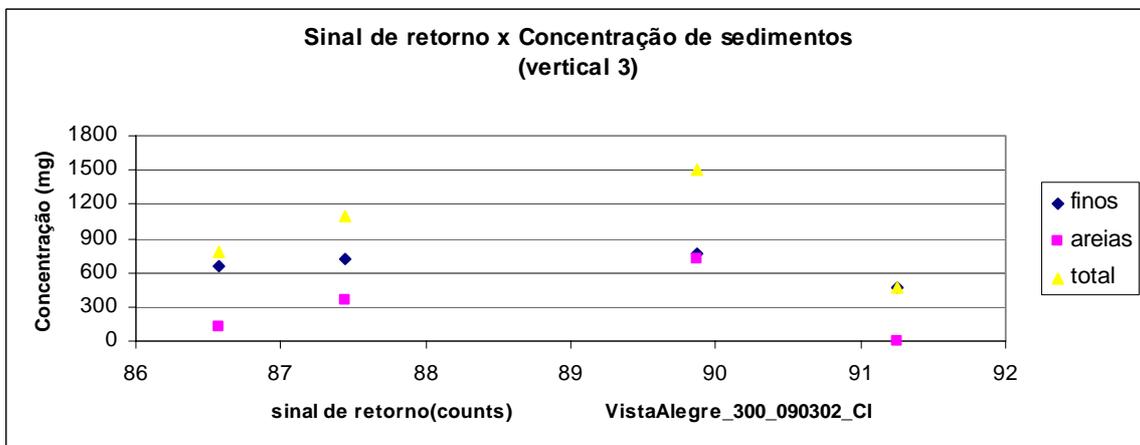


Gráfico 5.51

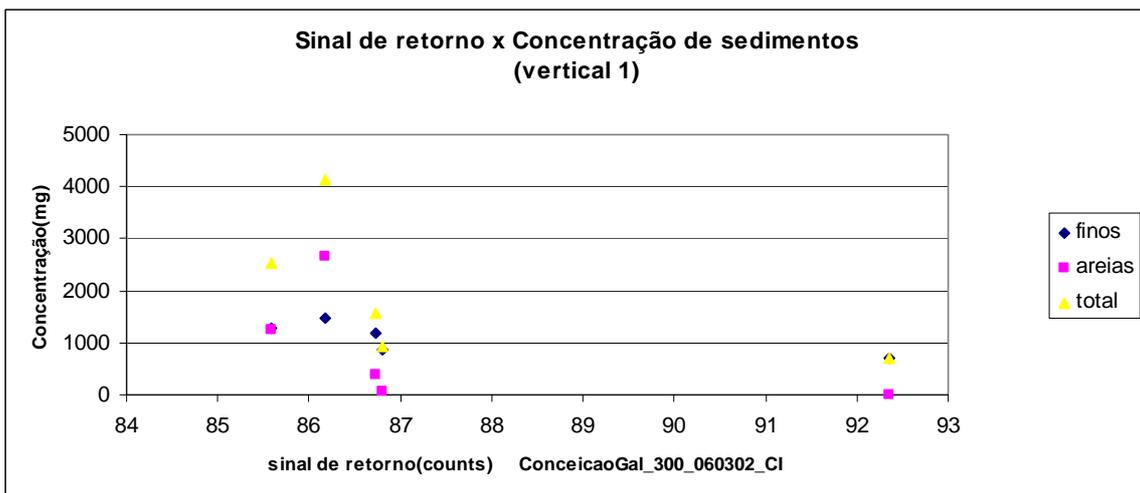


Gráfico 5.52

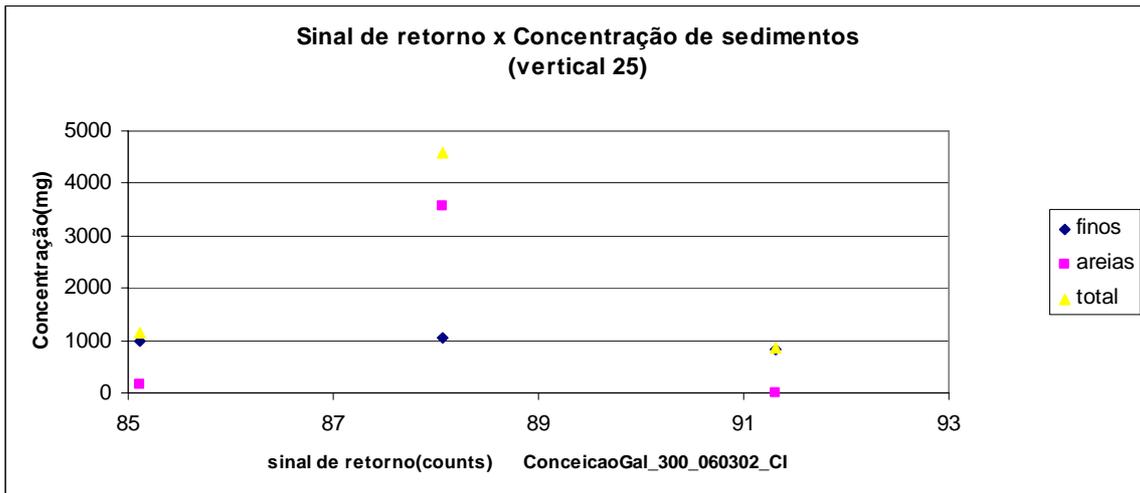


Gráfico 5.53

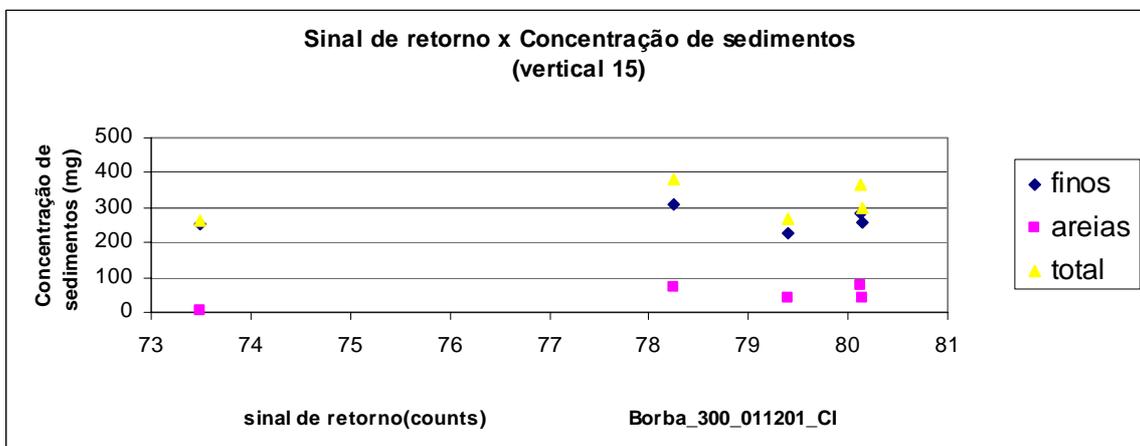


Gráfico 5.54

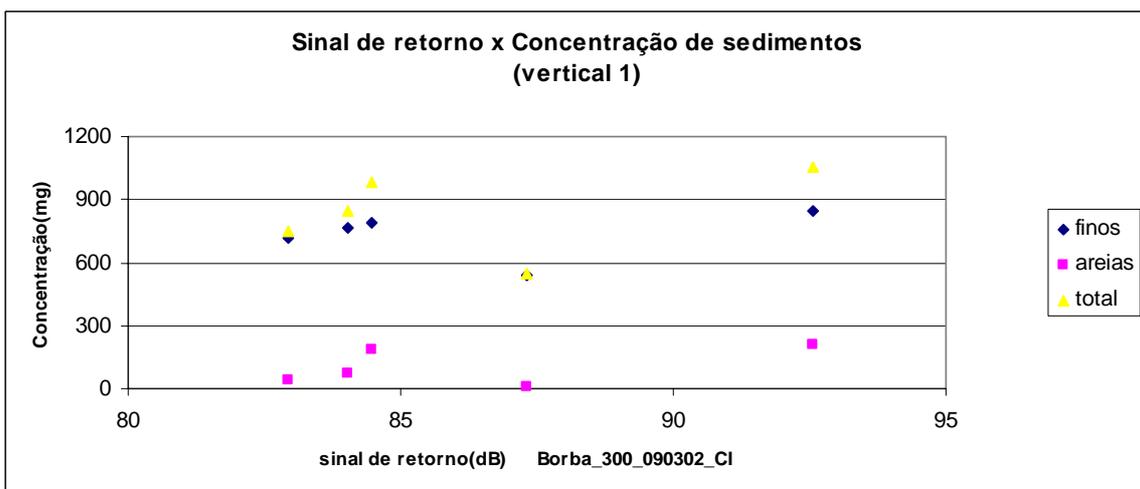


Gráfico 5.55

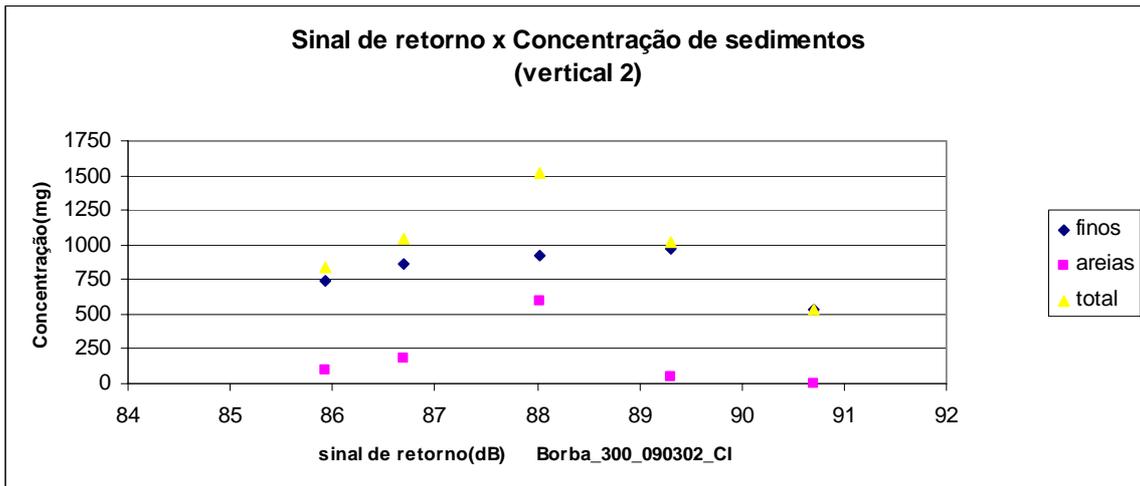


Gráfico 5.56

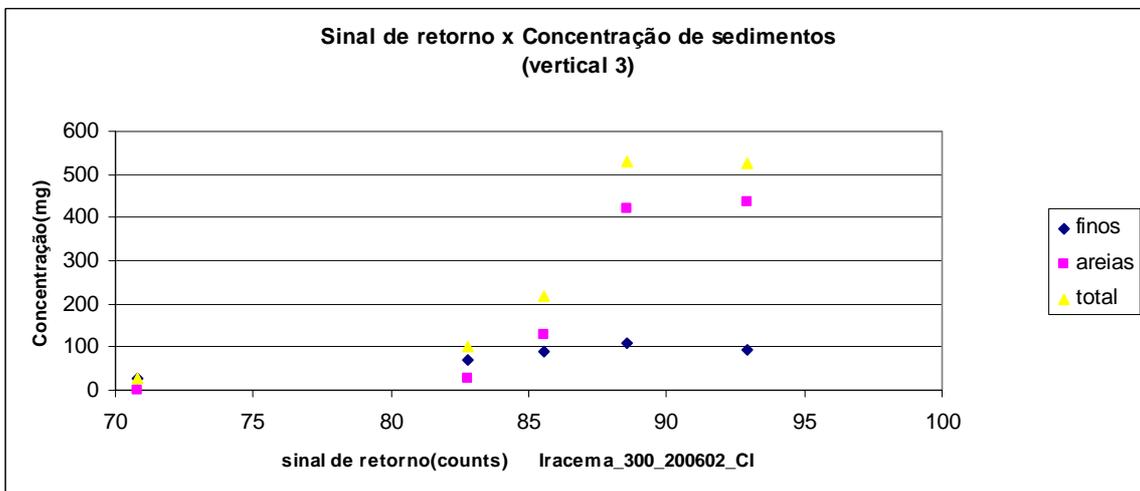


Gráfico 5.57

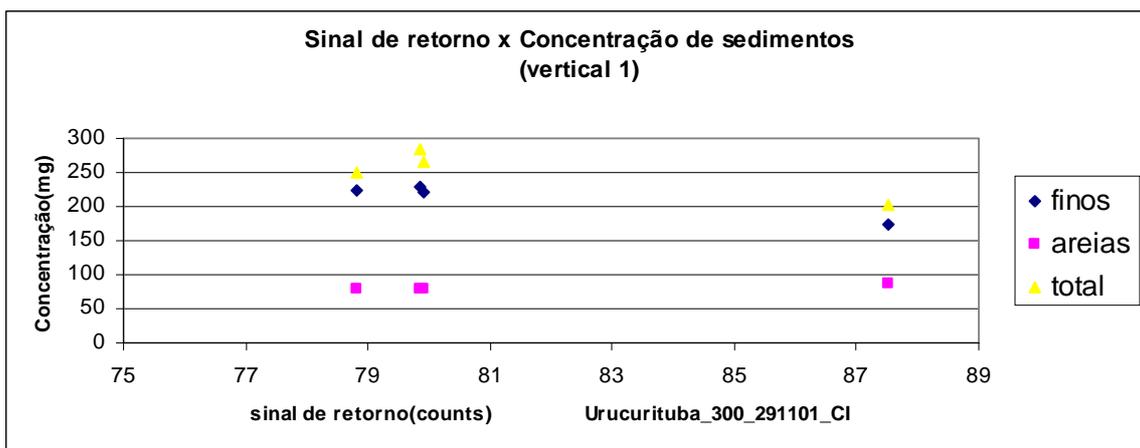


Gráfico 5.58

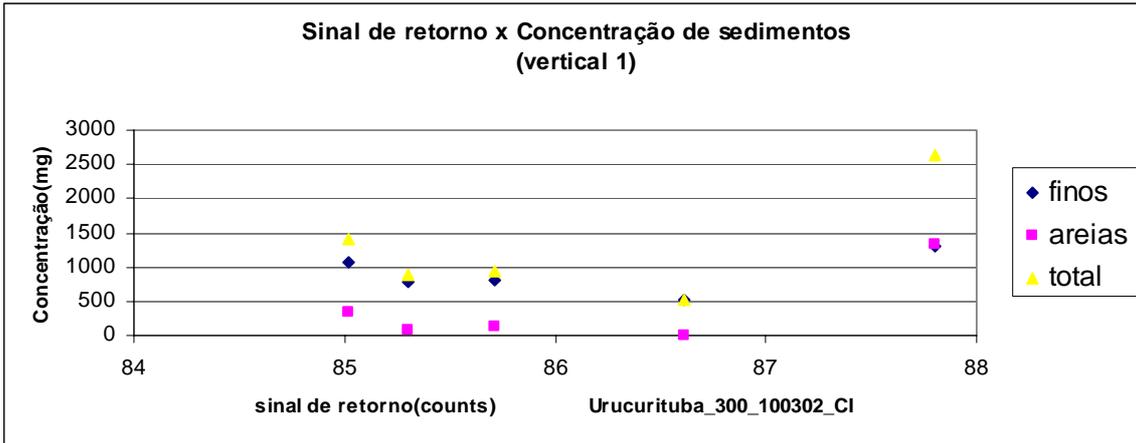


Gráfico 5.59

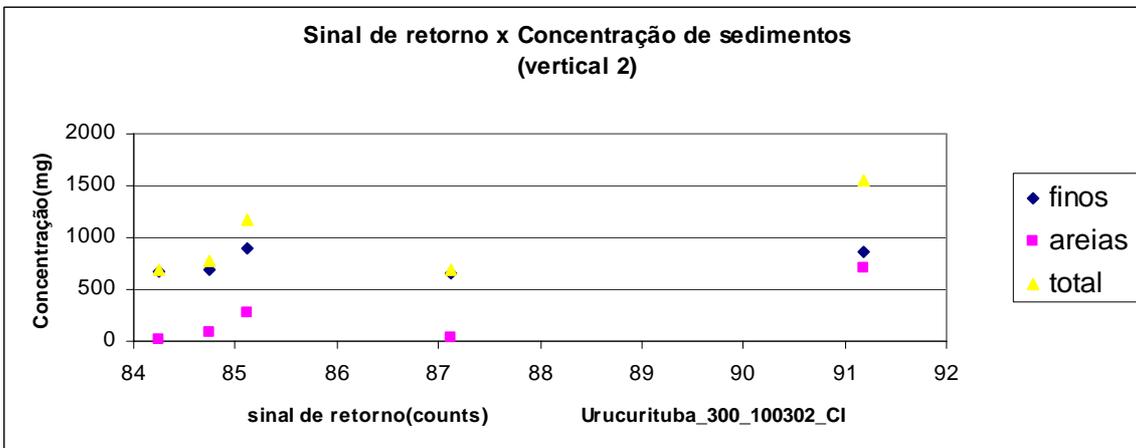


Gráfico 5.60

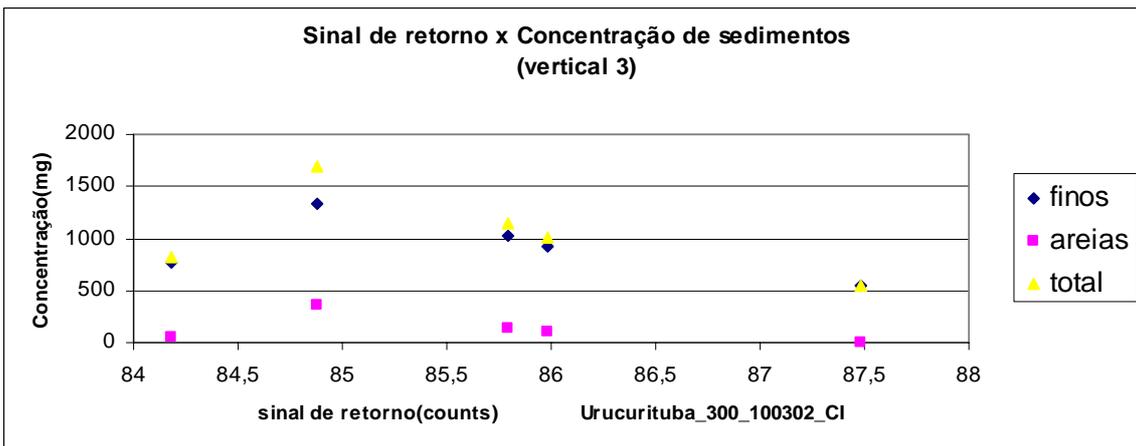


Gráfico 5.61

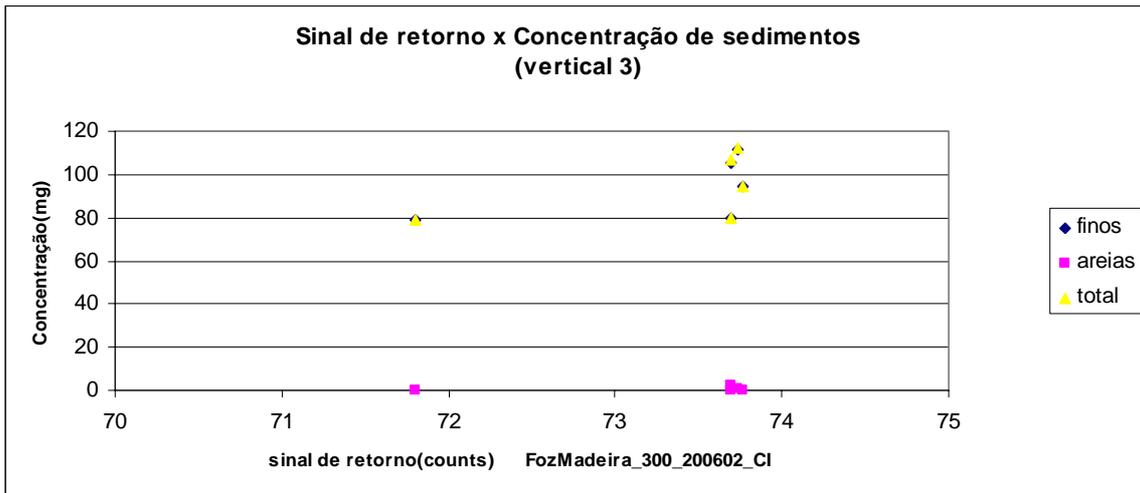


Gráfico 5.62

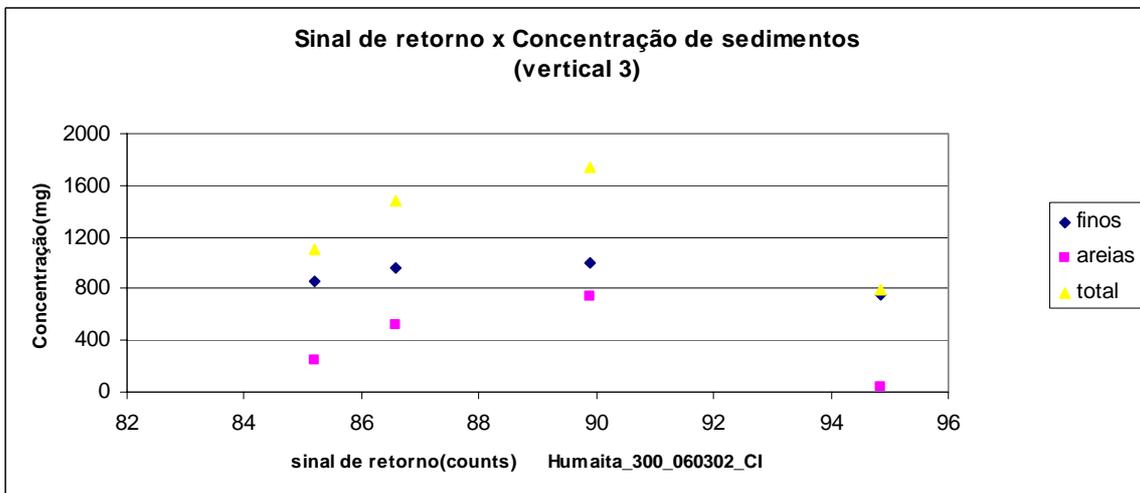


Gráfico 5.63

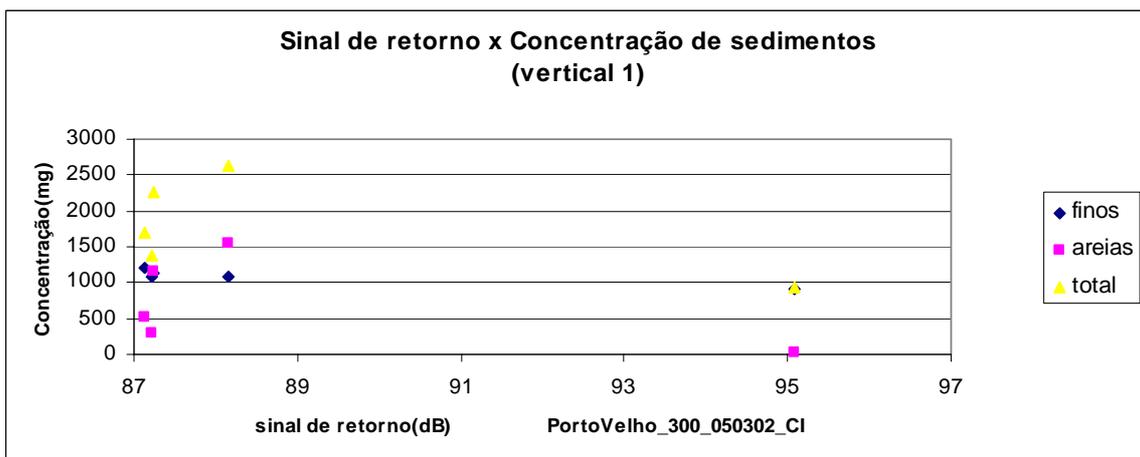


Gráfico 5.64

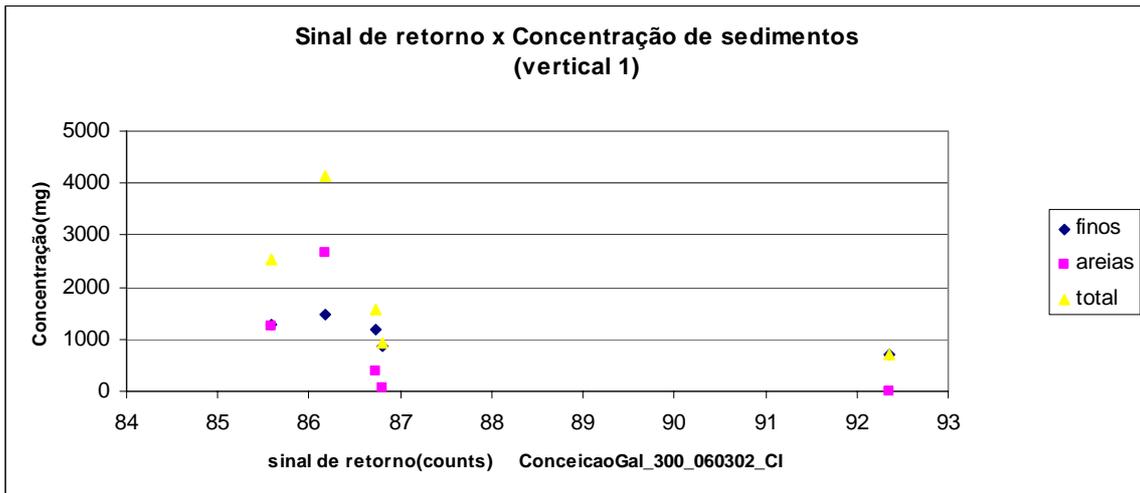


Gráfico 5.65

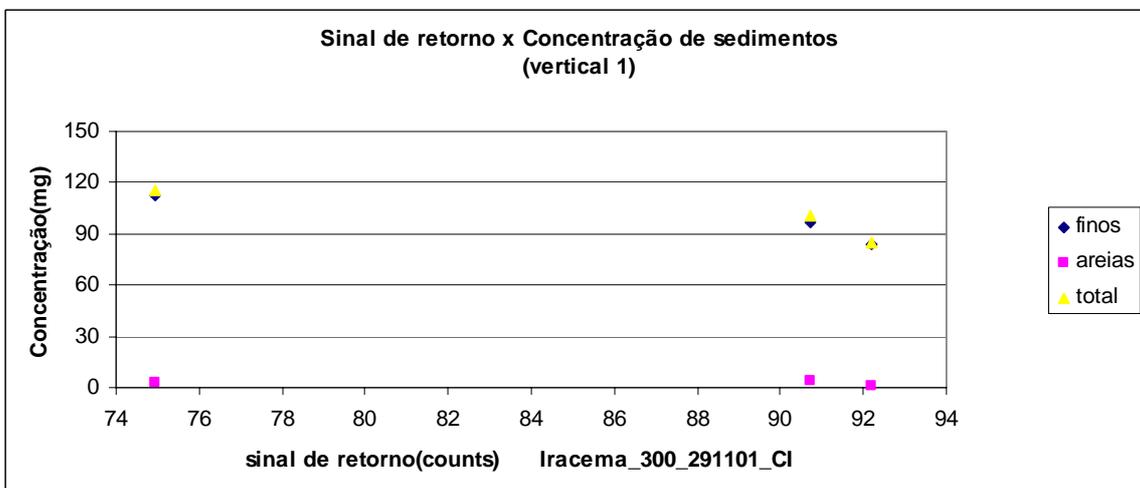


Gráfico 5.66

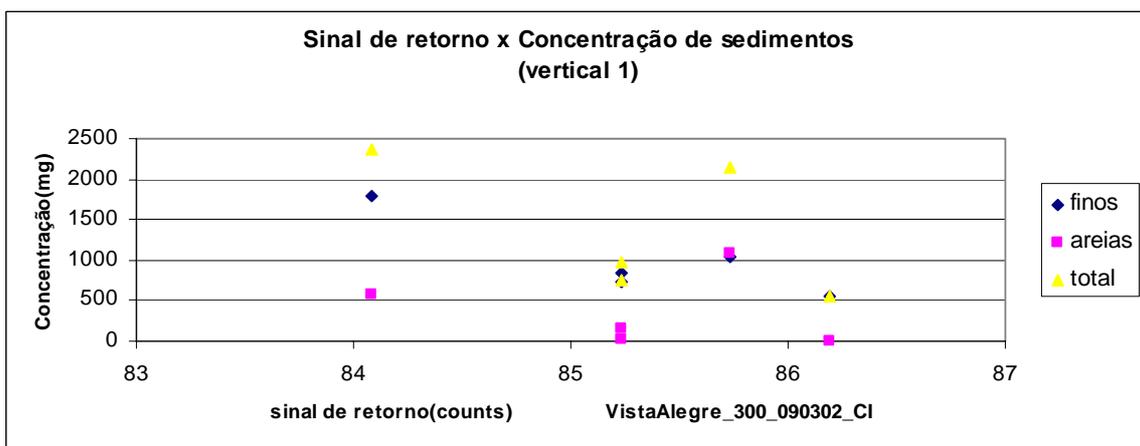


Gráfico 5.67

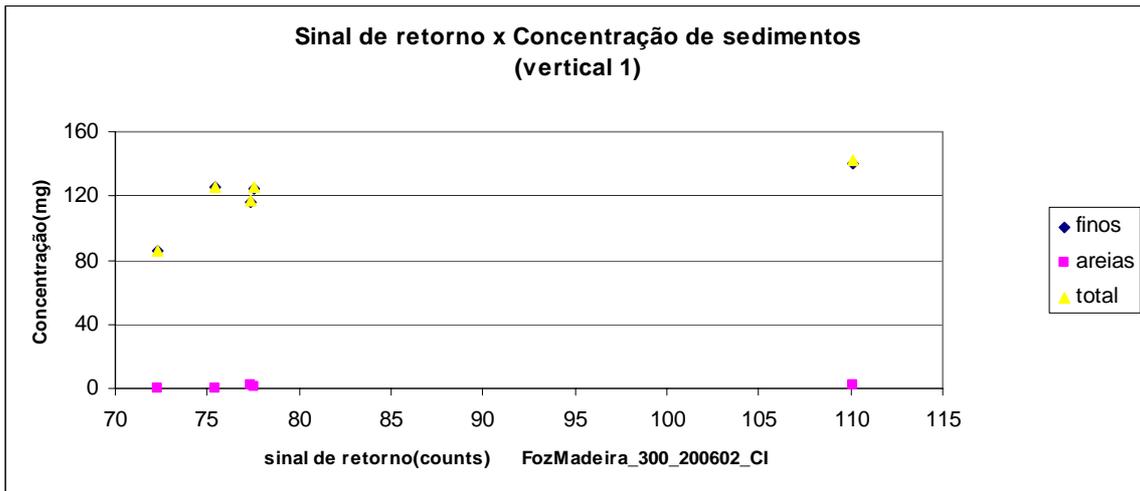


Gráfico 5.68

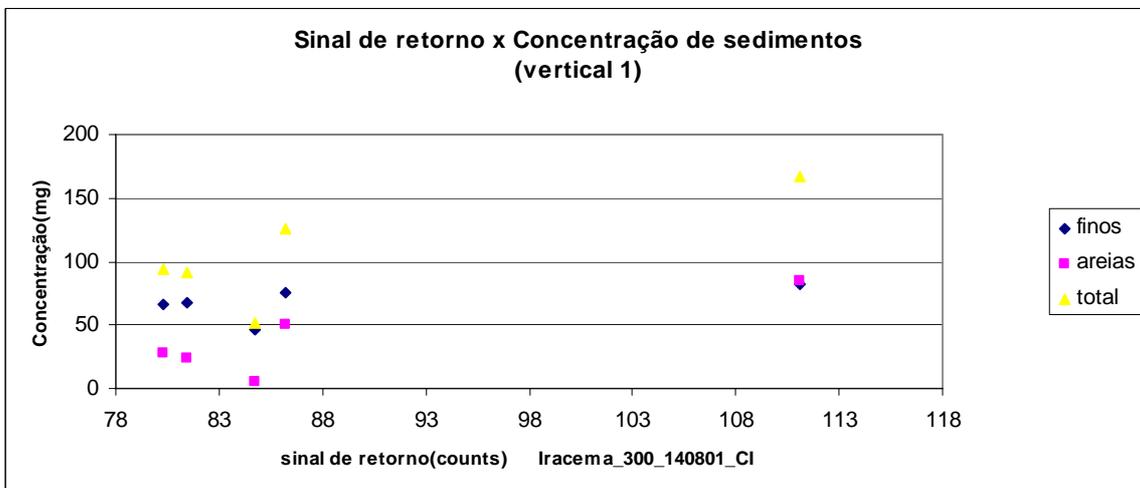


Gráfico 5.69

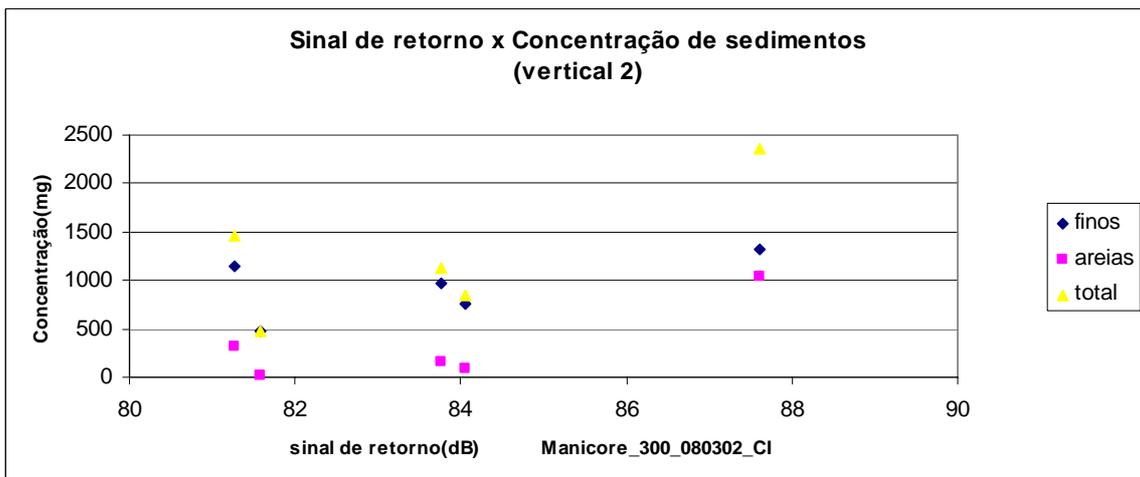


Gráfico 5.70

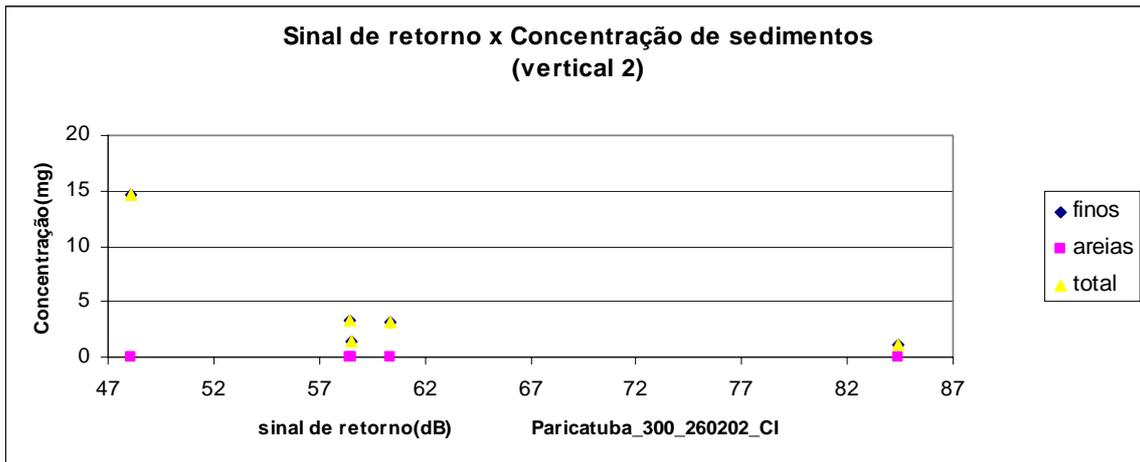


Gráfico 5.71

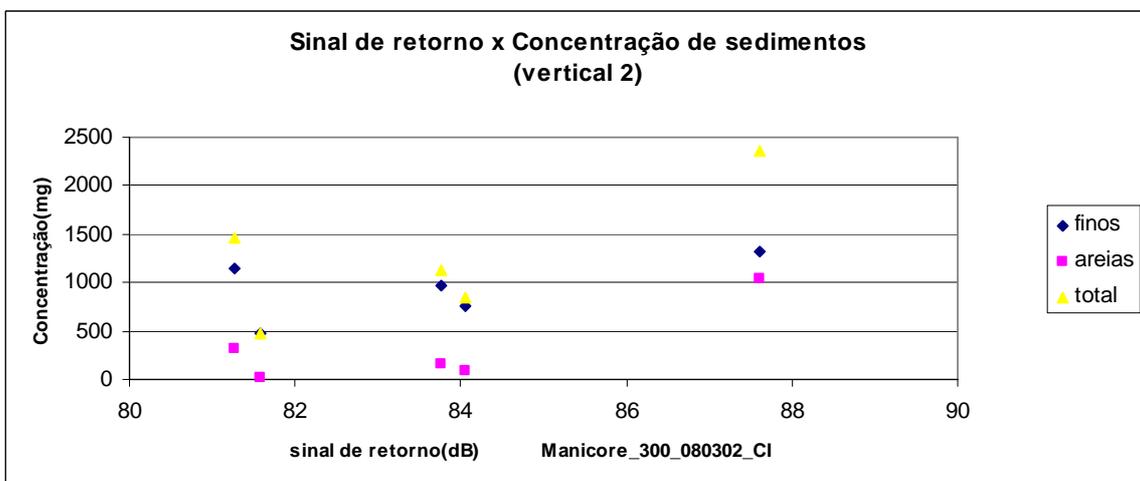


Gráfico 5.72

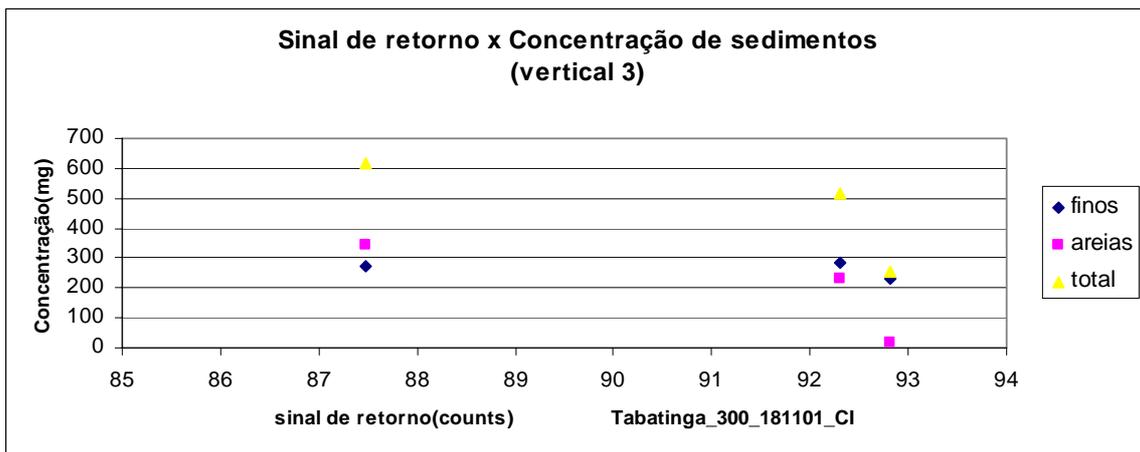


Gráfico 5.73

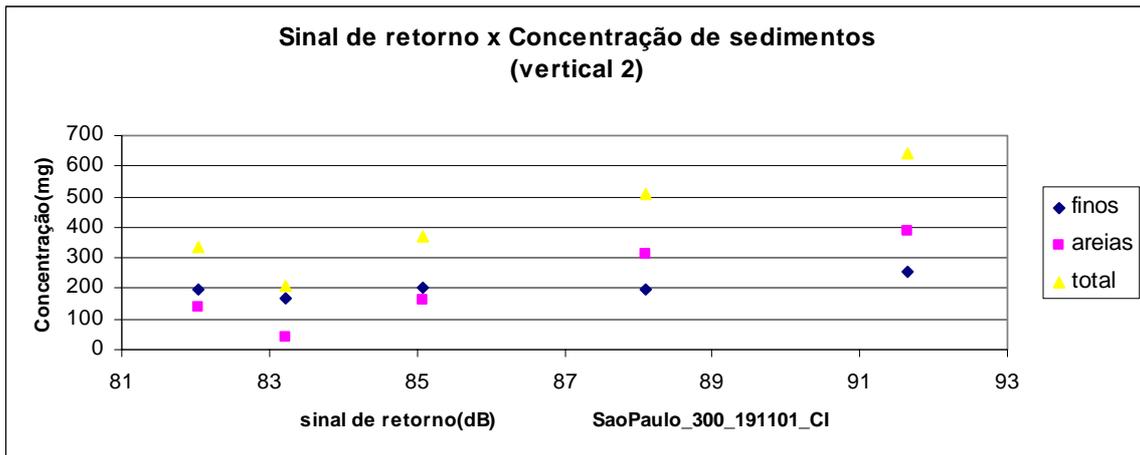


Gráfico 5.74

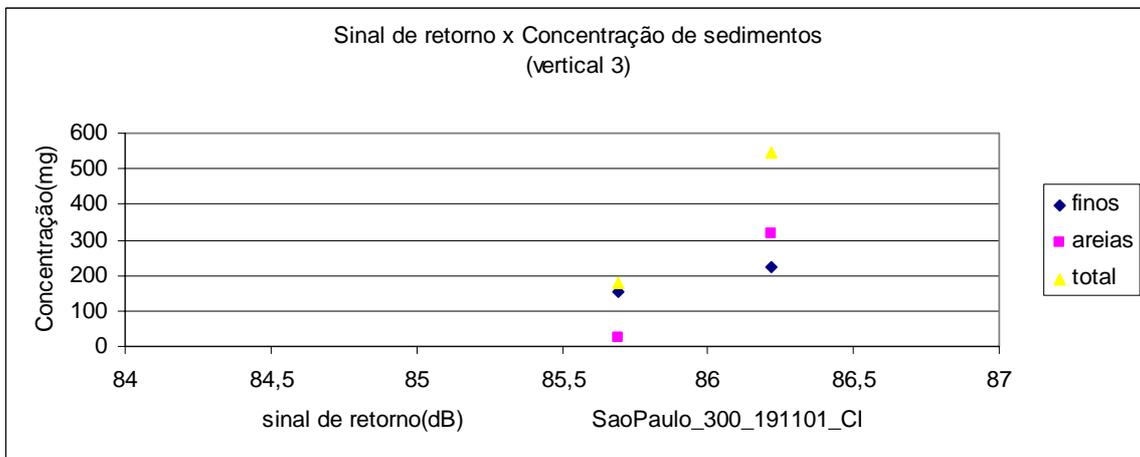


Gráfico 5.75

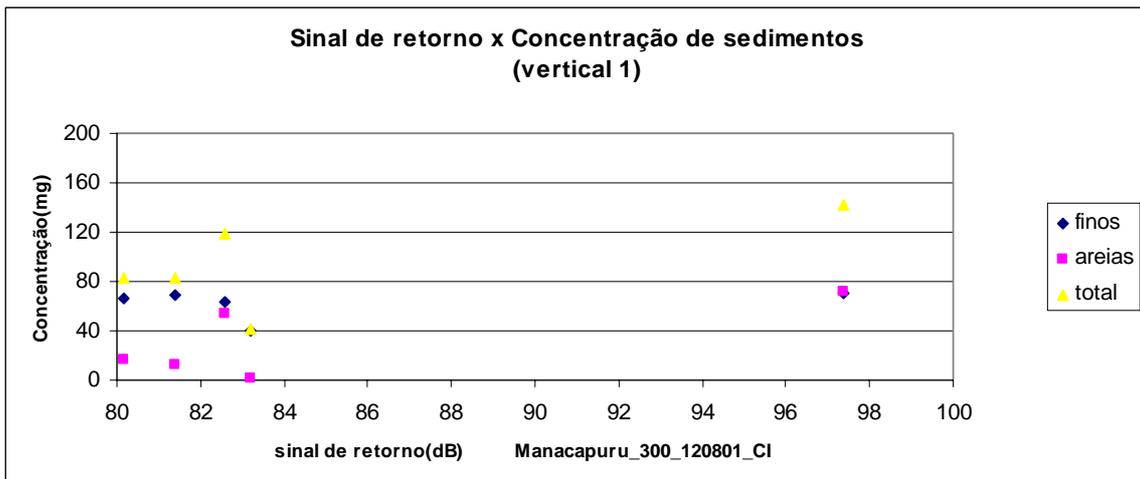


Gráfico 5.76

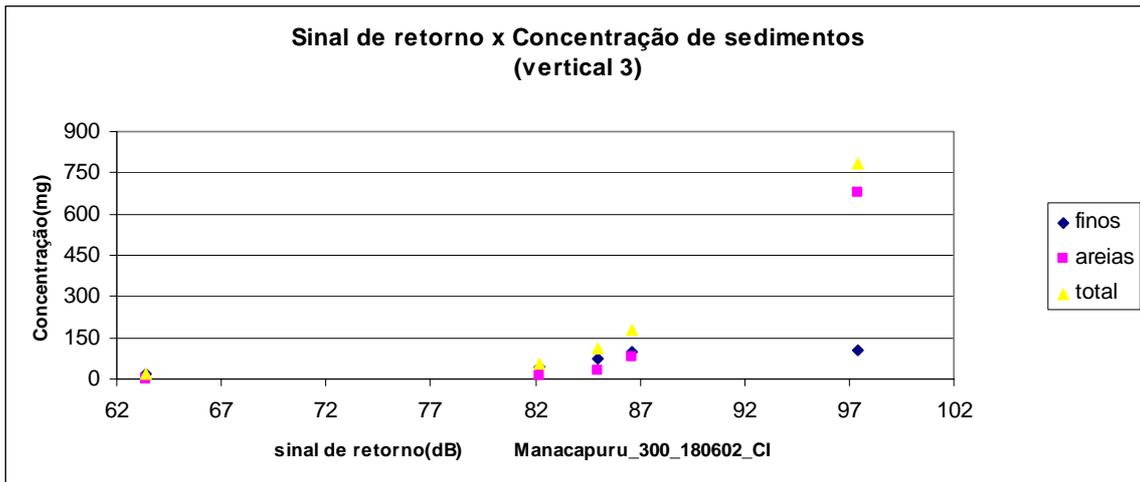


Gráfico 5.80

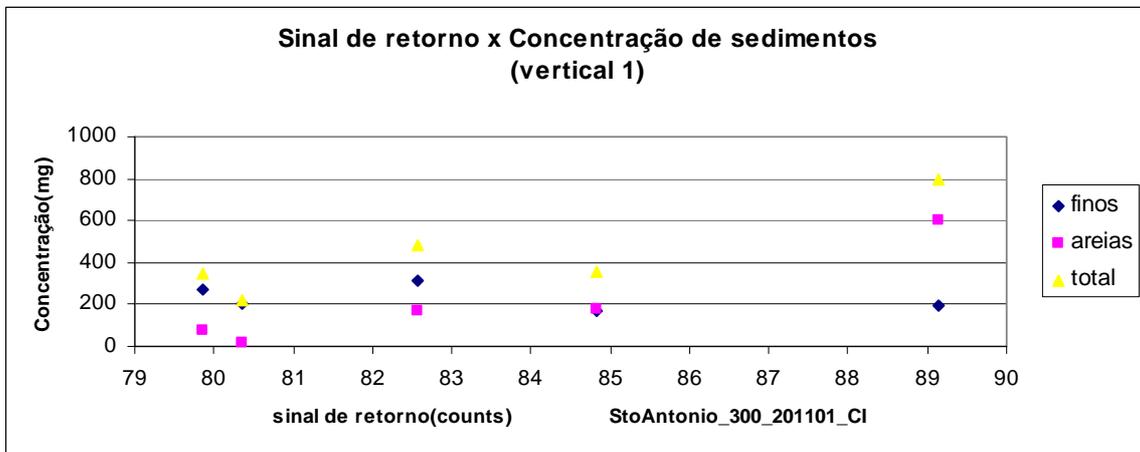


Gráfico 5.81

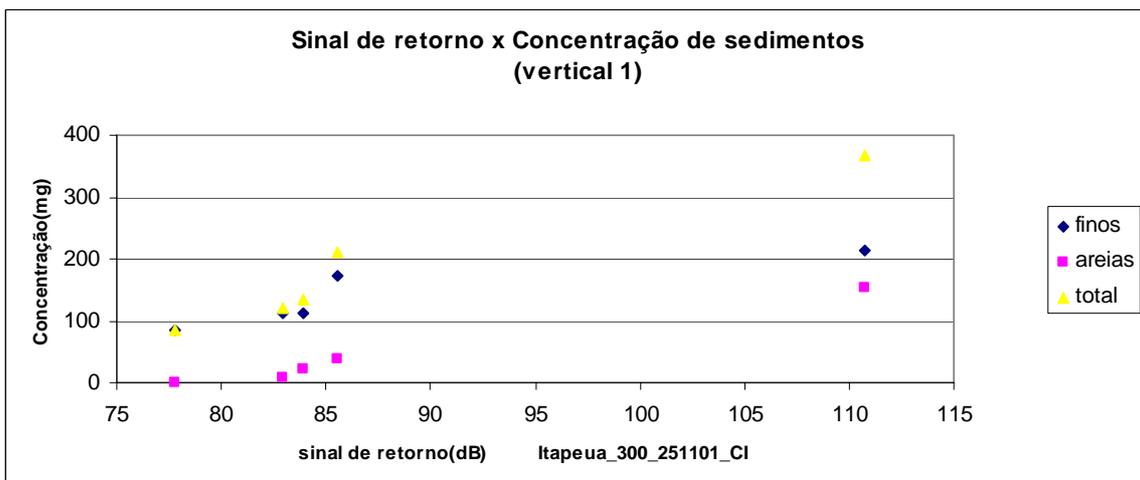


Gráfico 5.82

ANEXO G

(Lista dos Arquivos de Concentração)

Anexo G

Borba_300_011201_CI_editado_____.txt
Borba_300_090302_CI_editado_____.txt
Caldeirao_300_220602_CI_editado____.txt
ConceicaoGal_300_060302_CI_editado_.txt
FonteBoa33_300_211101_CI_editado____.txt
FonteBoa34_300_140602_CI_editado____.txt
FozMadeira_300_200602_CI_editado____.txt
Humaita_300_060302_CI_editado_____.txt
Iracema_300_140801_CI_editado_____.txt
Iracema_300_200602_CI_editado_____.txt
Iracema_300_291101_CI_editado_____.txt
Itacoatiara80_300_160801_CI_editado.txt
Itapeua_300_160602_CI_editado_____.txt
Itapeua_300_251101_CI_editado_____.txt
Manacapuru_300_120801_CI_editado____.txt
Manacapuru_300_180602_CI_editado____.txt
Manacapuru_300_270202_CI_editado____.txt
Manacapuru_300_271101_CI_editado____.txt
Manicore_300_080302_CI_editado_____.txt
NovaOlinda_300_011201_CI_editado____.txt
NovaOlinda_300_150801_CI_editado____.txt
Obidos_300_051201_CI_editado_____.txt
Obidos_300_130302_CI_editado_____.txt
Obidos_300_190801_CI_editado_____.txt
Obidos_300_230602_CI_editado_____.txt

Anexo G

Obidos_v3_1200_240602_CI_editado____.txt

Obidos_v3_300_240602_CI_editado____.txt

Obidos_v3_600_240602_CI_editado____.txt

Oriximina_300_041201_CI_editado____.txt

Oriximina_300_220801_CI_editado____.txt

Oriximina_300_230602_CI_editado____.txt

Paricatuba_300_110801_CI_editado____.txt

Paricatuba_300_190602_CI_editado____.txt

Paricatuba_300_260202_CI_editado____.txt

Paricatuba_300_281101_CI_editado____.txt

Parintins_300_091201_CI_editado____.txt

Parintins_300_120302_CI_editado____.txt

Parintins_300_170801_CI_editado____.txt

PK625_300_070302_CI_editado_____.txt

PortoVelho_300_050302_CI_editado____.txt

SaoPaulo_300_110602_CI_editado____.txt

SaoPaulo_300_191101_CI_editado____.txt

StoAntonio_300_120602_CI_editado____.txt

StoAntonio_300_201101_CI_editado____.txt

Tabatinga_300_060602_CI_editado____.txt

Tabatinga_300_181101_CI_editado____.txt

Tefe_300_150602_CI_editado_____.txt

Tefe_300_231101_CI_editado_____.txt

Urucurituba_300_100302_CI_editado____.txt

Urucurituba_300_291101_CI_editado____.txt

Anexo G

VistaAlegre_300_090302_CI_editado__.txt

VistaAlegre_300_301101_CI_editado__.txt

ANEXO H

(Correlação Entre a Intensidade do Sinal de Retorno e a Concentração de sedimentos)

(EM MEIO DIGITAL)

ANEXO I

(Programas MATLAB)

(EM MEIO DIGITAL)

ANEXO J

(Dados Usados Nesta Tese)

(EM MEIO DIGITAL)