

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos**



**Dissertação**

**Estimativa da Concentração de Sedimento em Suspensão no Canal São  
Gonçalo a partir de equipamentos acústicos**

**George Marino Soares Gonçalves**

**Pelotas, 2020**

**George Marino Soares Gonçalves**

**Estimativa da Concentração de Sedimento em Suspensão no Canal São  
Gonçalo a partir de equipamentos acústicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Gilberto Loguercio Collares

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

G635e Gonçalves, George Marino Soares

Estimativa da concentração de sedimento em suspensão no canal são gonçalo a partir de equipamentos acústicos / George Marino Soares Gonçalves ; Gilberto Loguercio Collares, orientador. — Pelotas, 2020.

194 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Backscatter. 2. Hidrometria. 3. Métodos acústicos. 4. Sedimentometria. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Título.

CDD : 550

**George Marino Soares Gonçalves**

**Estimativa da Concentração de Sedimento em Suspensão no Canal São  
Gonçalo a partir de equipamentos acústicos**

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 03 de março de 2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria, 1994

Prof. Dra. Nilza Maria dos Reis Castro - IPH, UFRGS

Doutor em Geografia Física e Geomorfologia pela Université Louis Pasteur, 1996

Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Junior – IO, FURG

Doutor em Oceanologia pela Université Bordeaux, Sciences et Technologies, 1996

**Dedico este trabalho a todos que,  
de forma direta ou indireta,  
tornaram essa conquista possível.  
Obrigado.**

## **Agradecimentos**

À Deus, pela saúde e serenidade mental para a conclusão desta obra.

À minha noiva, Cristiane Zandonotto, pela paciência e compreensão nos momentos em que me ausentei para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais, pela fé dedicada, e incansáveis orações zelando pelo meu sucesso nesta caminhada.

Às minhas irmãs, pelo carinho e amor dedicado quando me fiz presente ou não.

À minha pequenina sobrinha Helena, por servir de motivação para que eu seja um exemplo para ela.

Ao meu orientador Dr. Gilberto Loguercio Collares, pela incansável atenção dedicada, pela compreensão que demonstrou em me guiar nesse processo de amadurecimento pessoal e profissional, por servir de inspiração, e por servir como amigo quando necessário.

À professora Dra. Viviane Santos Silva Terra, pela amizade, carinho, e apoio emocional durante essa jornada.

Ao meu estimado colega de laboratório Ms. Guilherme Kruger Bartels, o qual se demonstrou uma incansável fonte de conselhos e ajudas nas questões acadêmicas. Alguém que construí uma grande amizade nesses 24 meses de mestrado.

Ao Tecnólogo em Geoprocessamento, e Técnico em Hidrologia Reginaldo Galski Bonczynski, por toda ajuda depositada na construção deste trabalho, participando com um herói nas saídas de campo realizadas, com chuva ou sol, com ou sem ondas, com a embarcação em pleno funcionamento ou não. Um profissional e amigo exemplar.

Aos colegas do laboratório NEPE – HidroSedi, pela amizade, companheirismo, e motivação durante os últimos 24 meses.

À Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim – ALM, por viabilizarem a execução deste trabalho fornecendo infraestrutura e logísticas necessárias.

À CAPES-Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil, código de financiamento 001, pelo apoio à realização do presente trabalho.

## Resumo

GONÇALVES, George Marino Soares. **Estimativa da Concentração de Sedimento em Suspensão no Canal São Gonçalo a partir de equipamentos acústicos.**

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares. 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A quantificação da descarga sólida em suspensão é de grande importância para diferentes áreas, como a hidroenergia, qualidade ambiental, obras hidráulicas e navegação. A partir dos métodos tradicionais de amostragem de sedimentos em suspensão, como é o caso do IIL – Igual Incremento de Largura, e o IID – Igual Incremento de Descarga, a determinação da Concentração de Sedimento em Suspensão (CSS) pode ser um processo dispendioso de tempo, recursos financeiros e humanos. Com isso, métodos alternativos para a estimativa da CSS têm sido aplicados, como é o caso da utilização de equipamentos acústicos do tipo ADCP's (Acoustic Doppler Current Profiler). Embora o Canal São Gonçalo possua grande importância social e econômica para a região na qual se insere, sendo o principal elo fluvial entre Brasil e Uruguai, bem como responsável pela totalidade do deflúvio da Lagoa Mirim em direção à Laguna dos Patos, não existem dados contínuos de monitoramento de CSS. Desse modo, o objetivo deste trabalho é estimar a CSS no Canal São Gonçalo considerando a relação existente com a intensidade de retorno do pulso acústico (backscatter). Para isso, foram realizadas 21 campanhas de amostragem de sedimentos em suspensão no canal, a partir de métodos tradicionais de amostragem, concomitantes com a obtenção e correção de dados de backscatter de um equipamento ADCP do tipo estático. A metodologia utilizada, foi aplicada a duas seções distintas no canal, separadas 70km de distância. Pela estratégia aplicada, pode-se perceber que existe forte correlação entre valores de backscatter corrigidos com a CSS observada. A partir do equacionamento das variáveis, foi possível construir uma série histórica de dados para os locais, bem como, dar início ao monitoramento contínuo acerca dos sedimentos no canal. Certamente, um maior número de amostragens permitirá ampliar o grau de certeza da variável estimada (CSS), considerando um período mais longo de análise aqui observado, onde variações sazonais e fluxos na direção contrária a predominante sejam bastante expressivos e capazes de compor dados de eventos extremos.

Palavras-chave: Backscatter. Hidrometria. Métodos Acústicos. Sedimentometria.

## Abstract

GONÇALVES, George Marino Soares. **Estimating Suspended Sediment Concentration at São Gonçalo Channel using acoustic meters**. Advisor: Prof. Ph.D. Gilberto Loguercio Collares. 2020. 101 f. Dissertation (Masters in Water Resources) – Water Resources Postgraduate Program, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

Quantifying the discharge of suspended solids is very important for different areas, such as hydro-energy, environmental quality, hydraulic structures, and navigation. However, using traditional methods of sampling suspended sediments, as well as, EWI (Equal-Width-Increment), and EDI (Equal Discharge Increment), the determination of Suspended Solids Concentration (SSC) can be a time-costly process, financial and human resources consumption. As a result, alternative methods for estimating SSC have been applied, such as the use of ADCP's (Acoustic Doppler Current Profiler) types of equipment. Although the São Gonçalo Channel has great social and economic importance for the region which it is part of, being the main fluvial link between Brazil and Uruguay, as well as, responsible for the total flow that comes from Mirim Lagoon towards Patos Lagoon, there is no continuous monitoring of SSC. Thus, this work aims to estimate the SSC at the São Gonçalo Channel considering the relation between the backscatter. Thus, this work aims to estimate the SSC at the São Gonçalo Channel considering the relation with the backscatter. For this, 21 suspend sediment surveys were conducted in the channel, using traditional sampling methods, besides the backscatter correction was made from a static type ADCP equipment. The methodology used was applied at two distinct sections in the channel being 70km apart from each other. By the applied strategy, is a strong correlation between corrected backscatter data and observed SSC. From the equation made here, it was possible to build a historical series of data for both locations, as well as, to start continuous monitoring of SSC in the channel. Certainly, a larger dataset of SSC samples can expand or obtain a higher degree of certainty about the estimated variable (SSC), considering a longer period of analysis, where seasonal fluctuations and flow in the opposite direction would be quite expressive and able to predict extreme events.

Keywords: Backscatter. Acoustic Meters. Hydrometry. Sedimentometry.

## Lista de Figuras

Figura 1	Gráfico da ação forçante, tempo geológico em fragmentos de rocha ou solo, e as consequências no diâmetro da partícula e na capacidade de transporte.....	29
Figura 2	Gráfico que representa o comportamento entre a concentração de sedimentos e a vazão líquida em uma dada seção.....	30
Figura 3	Diagramas: a) de distribuição de velocidade, b) concentração de sedimentos, c) e descarga sólida em uma determinada seção de um curso d'água.....	31
Figura 4	Composição e tipo das cargas sólidas transportadas em um curso d'água.....	33
Figura 5	Zona capaz de ser amostrada utilizando um amostrador de sedimentos em suspensão.....	36
Figura 6	Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados pela técnica de subdivisão da seção em Igual Incremento de Largura - IIL.....	37
Figura 7	Subdivisão por IID de uma seção no Rio Corumbá – 1/12/1988.....	38
Figura 8	Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados na técnica de subdivisão da seção em Igual Incremento de Descarga – IID.....	39
Figura 9	Fluxograma dos métodos, formas, e principais equipamentos para amostragem de sedimentos em suspensão.....	41
Figura 10	Garrafa de 470ml utilizada em amostradores de sedimento em suspensão.....	42

Figura 11	a) Vista lateral de um amostrador DH-59. b) Esquema construtivo de um amostrador DH-59.....	42
Figura 12	a) Vista lateral de um amostrador D-49. b) Esquema construtivo de um amostrador D-49.....	43
Figura 13	Cadinho de Gooch.....	45
Figura 14	Relação entre CSS e Vazão, CSS e Backscatter a partir de um equipamento acústico, instalado no Rio Clearwater, Spalding – Idaho.....	46
Figura 15	Representação das áreas medidas e extrapoladas utilizando-se um ADCP móvel.....	48
Figura 16	Frequência a) constante quando não há movimento percebido entre emissor e receptor, e b) alterada quando há movimento, por exemplo, da esquerda para a direita por parte do emissor.....	50
Figura 17	Forma com que as partículas na água reagem à pulsos sonoros emitidos.....	50
Figura 18	Seção discretizada em células com vetores velocidade A) em diferentes direções, B) adicionados (cinza) locais de medida de um molinete hidrométrico.....	52
Figura 19	Presença de fundo móvel causando “falso” movimento do barco no sentido montante do local de medição.....	52
Figura 20	Ilustração de uma medição de vazão com barco em movimento utilizando ADCPs.....	53
Figura 21	ADCP do tipo estático instalado de forma que profile a horizontal e colete valores de nível. Possui discretização por tamanho de células fixas (cells).....	55

Figura 22	Dispersão de forma esférica da energia acústica na água no campo próximo e além desse, a partir de um emissor.....	58
Figura 23	Atenuação da onda influenciada pela água, sedimento, e dispersão da própria onda.....	61
Figura 24	Mapas da região na qual se insere a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo, o Canal São Gonçalo, e as seções de monitoramento utilizadas neste trabalho.....	64
Figura 25	a) Seção 1 (Pelotas, Campus Anglo – UFPel), e b) Seção 2 (Santa Isabel do Sul) .....	66
Figura 26	Seção 2 localizada em Santa Isabel do Sul a) com vazões médias, e b) com vazões máximas. Em destaque aparece o Data Logger e painel solar do LS-500 lá instalados (06/11/2019) .....	67
Figura 27	ADCP estático modelo SL-500, da marca Sontek .....	68
Figura 28	Esquema ilustrativo apresentando as principais características configuráveis de um ADCP do tipo estático.....	69
Figura 29	Exemplo de medição utilizando o ADCP dinâmico M9 na a) Seção 1, e b) seção 2 .....	71
Figura 30	Formas de utilização do ADCP dinâmico RiverSurveyor M9 a) superfície flutuante com comunicação por cabos, b) estrutura fixa e operado por rádio .....	71
Figura 31	Balizamento da embarcação durante processo de amostragem de sedimentos (Local: Seção 1) .....	74
Figura 32	Sistema montado para execução do método de filtração das amostras, contendo cada peça um cadinho de Gooch (1), uma membrana filtrante (2) e um Erlenmeyer (3) .....	75

Figura 33	Membranas filtrantes após processo de filtragem .....	75
Figura 34	Fluxograma do processo de preparação das amostra água-sedimento para filtragem .....	76
Figura 35	Tela inicial do software SAID .....	77
Figura 36	Telas de a) configuração, e b) opções de processamento no software SAID. Exemplo utilizando parâmetros da seção 1 – Pelotas. ....	78
Figura 37	Telas contendo a) corrigido para atenuações geradas pelo sedimento, b) corrigido para atenuações geradas pela água, c) backscatter medido .....	80
Figura 38	Fator de discrepância (r) para as seções 1 e 2, junto das faixas restritivas 1,5, 2, e 3.....	90
Figura 39	Dados extraídos do ADCP estático na seção 1 – Pelotas, onde a) velocidade nas direções X e Y (eixo principal), e direção do equipamento em relação ao eixo X (eixo secundário), b) SNR (dB) nos eixos X e Y.....	93
Figura 40	Seção 1, Pelotas. Séries históricas a) nível, b) vazão, c) direção do equipamento em relação a transversal .....	95
Figura 41	Seção 1, Pelotas. Séries históricas a) temperatura, b) $\overline{SCB}$ , c) CSS estimada .....	96
Figura 42	Seção 2, Santa Isabel do Sul. Séries históricas a) nível, b) vazão, c) direção do equipamento em relação a transversal.....	97
Figura 43	Seção 2, Santa Isabel do Sul. Séries históricas a) $\overline{SCB}$ , b) CSS estimada .....	98

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Características de instalação dos ADCP's estáticos.....	68
Tabela 2	Medidas de vazão realizadas na seção 1 – Pelotas.....	72
Tabela 3	Medidas de vazão realizadas na seção 2 – Santa Isabel do Sul.....	72
Tabela 4	Faixas do fator r de discrepância, conforme TERABE (2003).....	81
Tabela 5	Faixas de classificação do fator de tendência PBIAS.....	83
Tabela 6	Concentração de sedimento em suspensão para a seção 1, localizada em Pelotas.....	86
Tabela 7	Concentração de sedimento em suspensão para a seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul.....	87
Tabela 8	Modelo para estimativa de CSS, seção 1.....	87
Tabela 9	Modelo para estimativa de CSS, seção 2.....	88
Tabela 10	Valores de CSS observado e estimado para a Seção 1 – Pelotas.....	89
Tabela 11	Valores de CSS observado e estimado para a Seção 2 – Santa Isabel do Sul.....	89
Tabela 12	Estimativa dos erros para a Seção 1 – Pelotas.....	91
Tabela 13	Estimativa dos erros para a Seção 2 – Santa Isabel do Sul.....	91

## Lista de abreviaturas e siglas

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADP	Acoustic Doppler Profiler
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
ADVM	Acoustic Doppler Velocity Meter
ALM	Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim
ANA	Agência Nacional de Águas
Backscatter	Intensidade do eco de retorno
Beam	Transdutor
Bio-fouling	Incrustação biológica
Blanking distance	Distância não amostrada pelo equipamento acústico
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
IID	Igual incremento de descarga
IIL	Igual incremento de largura
Near-field	Campo próximo
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SAID	Surrogate Analysis and Index Developer
SNR	Signal noise ratio
USGS	United States Geological Service

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Geral	20
1.1.2	Específicos	20
1.1.3	Hipótese	20
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica</b>	<b>21</b>
2.1	Estado da arte	21
2.2	Processo de formação dos Sedimentos	27
2.2.1	Comportamento e distribuição dos sedimentos	29
2.2.2	Sedimento em suspensão	32
2.2.3	Métodos e Equipamentos de amostragem de sedimentos em suspensão	34
2.2.4	Determinação da CSS	43
2.3	Equipamentos Acústicos em corpos d'água	47
2.3.1	Princípio de funcionamento	49
2.3.2	Medidores estáticos e dinâmicos	53
2.3.3	Estimativa da CSS	55
<b>3</b>	<b>Material e Métodos</b>	<b>62</b>
3.1	Local de estudo	62
3.2	Seções monitoradas	64
3.2.1	Medição de vazão	69
3.2.2	Amostragem de sedimentos	71
3.2.3	Determinação da CSS em laboratório	73
3.2.4	Correção do backscatter	76
3.2.5	Avaliação dos modelos	79

<b>4 Resultados e discussões .....</b>	<b>83</b>
4.1 Concentração de Sedimentos por amostragem .....	83
4.2 Equações de ajuste.....	86
4.3 Erros e estimativas dos modelos .....	87
4.4 Série histórica .....	91
<b>5 Conclusões, considerações finais e sugestões .....</b>	<b>98</b>
5.1 Conclusão.....	98
5.2 Sugestões.....	99
<b>Referências .....</b>	<b>100</b>

## 1 Introdução

Cerca de 70% do Planeta Terra é coberto por água, e cerca de 97% desses é composto de água salgada. Embora a água doce represente uma pequena porcentagem do todo, estima-se que cerca de 2,5% está disposta em geleiras, 0,5% de água confinada em aquíferos subterrâneos, restando apenas 0,04% do volume total, fluindo em rios e canais continentais ou disposta em lagos ao redor do mundo.

Em vista da importância da água para a manutenção da vida, historicamente as civilizações buscaram seu desenvolvimento próximo a cursos d'água em função dos benefícios que esses podem trazer. Com isso, tem sido desafiador para o homem aprimorar o uso dos recursos hídricos para extrair o máximo de benefícios, assim como, diminuir os danos causados ao meio ambiente, tanto por ações antrópicas ou naturais.

Para a sustentabilidade do desenvolvimento econômico e social em regiões próximas à rios, lagos e canais, o conhecimento e domínio de parâmetros que podem afetar esses ambientes torna-se importante. Para tal, os sedimentos se apresentam como peça-chave a ser entendida, pois podem expressar a condição geral de saúde desses ecossistemas, assim como, são responsáveis pela conformação do leito a partir de processos de deposição e sedimentação.

Sedimentos também possuem importância, devido a seus efeitos em ambientes aquáticos, em estruturas de engenharia (pontes, barramentos, portos, canais artificiais e condutos) e na qualidade da água, dependendo de sua natureza. Por exemplo, em regiões portuárias a quantificação, caracterização e estimativa do aporte de sedimentos torna-se uma ferramenta de apoio à gestão pois, a formação de bancos de sedimento ou modificação da seção transversal, pode reduzir a capacidade de navegabilidade, sendo necessário grandes gastos para a manutenção de calado em suas bacias de evolução e canais de acesso.

O transporte de sedimentos, que se refere a concentração de sedimentos em equilíbrio no escoamento superficial, é variável no espaço e no tempo. Entretanto, é consenso que essa concentração é maior em épocas chuvosas, podendo representar de 70 a 90% de todo o sedimento transportado, devendo ser destacados eventos de grandes precipitações e períodos de elevadas vazões (CARVALHO, 1994; SILVA *et al.*, 2003).

O conhecimento do aporte de sedimentos em cursos d'água é de suma importância para a boa gestão dos recursos hídricos, visando principalmente a vida útil e a manutenção de obras hidráulicas. Atualmente, no Brasil, o órgão público detentor do maior número de estações hidrometeorológicas é a Agência Nacional de Águas (ANA), à qual possui em sua base de dados 2.769 estações pluviométricas (monitoramento de chuvas), 1.556 estações fluviométricas (medição de vazão d'água), 1.722 estações de qualidade de água, e 468 estações sedimentométricas (medição de sedimentos em suspensão) (ANA, 2019).

Empresas de geração de energia elétrica comumente possuem estações sedimentométricas próximas à hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), porém, esses dados não são de veiculação pública e a contagem oficial de estações também é de domínio privado.

O baixo número de pontos de monitoramento de sedimentos com dados públicos ocorre principalmente em função da limitação e dificuldade de obtenção de dados a partir de métodos indiretos (amostragem de água *in loco* e posterior avaliação em laboratório para determinação da concentração de sedimento), pois a amostragem, tanto em pequenos como em grandes rios, depende de muito tempo, logística e recursos. Se incluirmos eventos extremos (de elevadas vazões, altos índices pluviométricos e condições climáticas desfavoráveis), devemos considerar os riscos em se perder equipamentos, danificar embarcações, ou até mesmo riscos à vida humana.

Em vista das dificuldades e limitações que a amostragem de sedimentos por métodos indiretos impõe, se intensifica a aplicação de metodologia que estime a descarga sólida em suspensão para cursos d'água através de métodos diretos (utilizam um ou mais parâmetros para estimar a concentração de sedimento presente), com destaque para a utilização de equipamentos acústicos por efeito Doppler, também conhecidos como ADV<sup>1</sup> (Acoustic Doppler Velocity Meter), e ADCP<sup>2</sup> (Acoustic Doppler Current Profiler), sendo a segunda mais amplamente difundida, portanto, a terminologia que passaremos a utilizar. Esses equipamentos

---

<sup>1</sup> ADV<sup>1</sup> serve como nomenclatura genérica para esse tipo de equipamento. É uma terminologia comumente utilizada pela USGS.

<sup>2</sup> Nomenclatura criada pela empresa RDI, se popularizou no meio técnico, sendo a sigla ADCP utilizada para denominar de forma geral os medidores acústicos por efeito Doppler.

possuem como vantagem a possibilidade de estimar a carga de sedimentos de forma contínua a partir de uma posição fixa.

ADCP's possuem como princípio de funcionamento a emissão de um pulso sonoro na coluna d'água, o qual pode ser dissipado, ou absorvido ao colidir com as partículas. A fonte responsável por emitir o pulso, é também responsável por captar o retorno. Através da avaliação da variação da frequência do sinal acústico é possível calcular a velocidade de escoamento do fluido. Para realizar a estimativa da carga sólida presente é possível utilizar-se da intensidade de retorno do eco (*backscatter*), que se constitui da energia necessária para amplificar o sinal de retorno até sua frequência original (frequência de emissão).

Essas estratégias, empregando tecnologias avançadas, impõem condições adequadas para que a necessidade de informações contínuas sobre a concentração e o transporte de sedimentos em rios e canais sejam mais rapidamente medidos e analisados.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Estimar a concentração de sedimento em suspensão (CSS) no Canal São Gonçalo considerando a relação existente com a intensidade de retorno do pulso acústico (*backscatter*).

### **1.1.2 Específicos**

i – Determinar a concentração de sedimento em suspensão (CSS) no Canal São Gonçalo através de métodos indiretos, utilizando amostragem por integração da vertical, e subdivisão da seção por Igual Incremento de Descarga – IID;

ii – Estimar a CSS de forma contínua a partir da relação estabelecida entre o backscatter corrigido e a CSS observada a partir de amostragem.

### **1.1.3 Hipótese**

A utilização de equipamentos acústicos, pode ser uma metodologia adequada para estimar a concentração de sedimento em suspensão no Canal São Gonçalo quando comparada à métodos tradicionais de amostragem e determinação de CSS.

## 2 Fundamentação teórica

Nesse tópico estão descritas bases conceituais e a fundamentação relevante observadas na literatura sobre o tema sedimentometria, em especial quando relacionado à utilização de equipamentos acústicos para estudos sedimentométricos.

### 2.1 Estado da arte

Embora a utilização de equipamentos do tipo ADCP seja indicada para a medição de velocidade em cursos d'água, esses têm sido testados ao longo dos anos para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) (URICK, 1975; DEINES, 1999; JAY e ORTON, 1999; WREN *et al.*, 2001; CREED *et al.*, 2001; ALVAREZ e JONES, 2002; GARTNER, 2002, 2004; MAYERLE e POERBANDONO, 2002; GRAY *et al.*, 2003; HOSSANI, SHAMSAI e ATAIE-ASTIANI, 2005; WALL, NYSTROM e LITTEN, 2006; THORNE e MERAL, 2007; DORNELLES, 2009; WOOD e TEASDALE, 2013; SCHUCK, 2013; ÁVILA, MÖLLER e ANDRADE, 2014; CABRAL, 2014, 2019; LATOSINSKI *et al.*, 2014; DOMANSKI *et al.*, 2015; WOOD, FOSNESS e ETHERIDGE, 2015; LANDERS *et al.*, 2016; WOOD *et al.*, 2018).

Apesar das empresas fabricantes desse tipo de equipamento não preverem em manuais ou catálogos sua aplicação para estimativa de sedimentos, os fabricantes encorajam técnicos e cientistas do campo da sedimentometria a buscarem técnicas e ferramentas eficazes para seu emprego.

Alguns pesquisadores da área de sedimentos podem ser citados e destacados em vista de suas contribuições e conquistas na utilização de métodos acústicos para estimativa de sedimentos.

Deines (1999) fez uma grande contribuição para os estudos de estimativas de CSS através de métodos acústicos, quando propôs uma forma de equacionamento dessa relação, a partir da equação do sonar proposta por Urick (1975), considerando a proporcionalidade entre os incrementos de intensidade do pulso acústico com a razão entre concentrações. O autor sugere que se defina uma correlação entre intensidade do eco acústico e uma determinada CSS, para que sirva de nível de

referência para as outras intensidades de eco acústicas, permitindo então que se converta intensidade do eco em CSS. O autor também sugere a correção da intensidade do eco para perdas inerentes ao feixe acústico, ao meio (corpo d'água), e a massa (sedimento).

Jay e Orton (1999) deram início a estudos que comparavam métodos óticos com métodos acústicos, os quais permitiram investigar o efeito da variação das propriedades do sedimento na relação existente entre o pulso acústico e a CSS. Os autores também investigaram a influência causada pela intrusão salina para a estimativa da CSS, assim como, investigaram a variação temporal entre a mudança da concentração do sedimento e o pulso acústico. Apontam também os autores nesse estudo, as dificuldades existentes na obtenção de amostras *in loco* para a calibração do ADCP, considerando que essas amostras devem ser obtidas nas proximidades de onde o equipamento está instalado.

Wren *et al.* (2001) foram responsáveis por um experimento na qual exploram a capacidade de estimativa da CSS através de equipamentos ADCP's. Através de métodos implícitos e explícitos de correlação de variáveis, converteram o *backscatter* (definido pelos autores como sendo a taxa de retroespalhamento do ruído observado) do pulso acústico, em concentração de sedimento, dando início a uma nova modalidade de resultados e relações entre som e sedimento.

No mesmo ano, Creed *et al.* (2001) conduziram um importante experimento no qual utilizaram três tipos diferentes de equipamentos: óticos; acústicos; laser. Esses três foram instalados e medidas foram realizadas de forma simultânea. O estudo permitiu que os autores correlacionassem a voltagem obtida no instrumento laser, com a concentração de 32 diferentes granulometrias de partículas, permitindo identificar quais faixas granulométricas o método acústico possui melhor desempenho na estimativa da CSS para o local analisado (baía de Newark, NY, EUA). Para esse estudo os autores concluíram que existe uma correlação entre os dois métodos (laser e acústico) superior a 0,7 para classes de sedimentos entre 0,075mm e 0,25mm, concluindo que a utilização de métodos acústicos pode produzir bons resultados na estimativa de concentrações de sedimentos entre essas classes.

Gartner (2002) em seu estudo compara a utilização de métodos acústicos e métodos óticos para estimativa da CSS, e concluí que equipamentos acústicos se

valem de vantagens por serem equipamentos menos intrusivos e menos suscetíveis a formação de crostas por ação biológica (bio-fouling). Embora o autor saliente as vantagens na utilização de ADCP's, também enfatiza as limitações de aplicação, principalmente referentes a incapacidade desses equipamentos diferenciarem mudanças na distribuição da concentração granulométrica. Para o autor o principal ponto favorável de métodos acústicos é a possibilidade da construção de séries temporais a partir de dados já obtidos para leituras de vazão. A grande conquista deste trabalho é justamente a proposição feita pelo autor que consiste na utilização de uma relação direta, obtida pela regressão entre a CSS observada e o logarítmico da intensidade do eco de retorno. A partir dessa proposição, diversos trabalhos foram, e ainda são realizados utilizando dessa teoria.

Ainda em 2002, Alvarez e Jones (2002) estudaram a relação entre o comprimento do *backscatter* e leitura de equipamento óticos para a estimativa da CSS. Esse estudo resultou em um coeficiente de regressão linear de 0,80 entre os parâmetros CSS e SNR (Signal to noise ratio), que se constitui do ruído observado no sinal gerado pelo contato com as partículas sólidas que compõem a água. A qualidade dos resultados se refere a uma pré-calibração dos instrumentos para a variação da geometria e intervalo granulométrico.

Gray *et al.* (2003) executaram estudos em diferentes cursos d'água, fazendo uso de diferentes técnicas para estimativa da CSS. O grande feito dessa pesquisa foi justamente os autores avaliarem não só a correlação entre a turbidez e a CSS, mas também a avaliação do parâmetro pressão. Esse parâmetro pode ser facilmente medido por equipamentos acústicos, e nesse estudo os autores fizeram relação indireta da pressão medida com a CSS, ajustando o equacionamento com parâmetros como a densidade e a temperatura da água (parâmetro esse também monitorado por ADCP's). Os autores conseguiram resultados expressivos, obtendo um coeficiente de determinação de 0,93 entre turbidez e CSS.

Hosseni, Shamsai e Ataie-Astiani (2005) realizaram um experimento onde compararam a utilização de diferentes métodos acústicos entre si e com métodos tradicionais de amostragem de sedimentos. Com essa análise, os autores apontam a forte relação existente entre a concentração de sedimentos e a taxa de ruído produzida pelo pulso acústico no momento da amostragem. Os autores também levantam o fato da importância existente no tamanho da partícula, embora tenha

sido descartado do estudo a composição granulométrica do sedimento. Uma das principais conclusões desse estudo foi apontar as limitações da aplicação de ADCP's, pois para elevadas concentrações de sedimentos (acima de  $50 \text{ g.l}^{-1}$ ) o som emitido acaba sendo absorvido pela carga de sedimento, dificultando a estimativa.

Wall, Nystrom e Litten (2006) em conjunto com a USGS (United States Geological Service - Serviço Geológico dos Estados Unidos) executaram um estudo no rio Hudson, NY, EUA, onde investigaram a performance de métodos acústicos para a estimativa de CSS no local. O foco do trabalho se deu na identificação das limitações existentes nos métodos, as quais foram identificadas com sendo a uni-frequência do equipamento, dificultando seu desempenho em ocasiões de variação das condições de fluxo d'água, conseqüentemente concentrações e distribuições granulométricas.

Thorne e Meral (2007) diferente da maioria dos autores anteriores, utilizaram um equipamento acústico multi-frequência em seu estudo. Esse estudo teve como foco principal identificar parâmetros do sedimento para correlação com o *backscatter*. O estudo objetivou gerar equações para a estimativa de CSS para sedimentos arenosos. Com o auxílio de mecanismos laboratoriais, os autores fazendo uso de um tanque, na qual o equipamento acústico se encontrava mergulhado, foi adicionado areia de praia peneirada, de granulometria conhecida, gerando uma mistura água e sedimento que era agitada e ressuspensa por um sistema de bombeamento. O experimento permitiu aos autores a elaboração, em laboratórios, de equações para a estimativa desse tipo de sedimentos em condições reais (*in loco*).

Dornelles (2009) no Rio Jacuí-RS, comparou o desempenho de três equações para estimativas de CSS a partir do *backscatter* não corrigido. Os métodos se basearam em calibrar as relações a partir de amostragens pontuais, em diferentes profundidades, buscando o melhor nível de referência para a relação. O autor utilizou os métodos propostos por Deines (1999), Mayerle e Poerbandono (2002), e Gartner (2002), ressaltando que este último teve o melhor desempenho dentre os três.

Wood e Teasdale (2013) em conjunto com a USGS e U.S Army (Exército dos Estados Unidos), desenvolveram um estudo exploratório para a aplicação de técnicas de estimativa da CSS nos rios Clearwater, Idaho, e Snake, Washington,

ambos nos EUA. O estudo objetivou a aplicação de métodos acústicos para a determinação da CSS, utilizando-se também de equipamentos de turbidez. O grande feito do estudo foi a adição de dados obtidos por difração a laser para melhor correlação dos parâmetros, identificando com maior precisão a variação granulométrica nos locais.

Schuck (2013) e Cabral (2014, 2019) em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), desenvolveram estudos nos quais, em laboratório, foram montados aparatos experimentais utilizando um ADCP, um recipiente com água, e um sistema de recirculação. Adicionando amostras de sedimento classificadas granulometricamente, os autores puderam determinar a relação existente entre cada uma das concentrações com a intensidade do sinal de retorno medido. Schuck (2013) obteve valores de correlação de 0,76 para ensaios de laboratório. Para ensaios de campo os valores foram promissores, resultando em valores de correlação de 0,96 entre a turbidez observada e o eco captado pelo equipamento.

Ávila, Möller e Andrade (2014) avaliaram em seu estudo a relação existente entre o material particulado em suspensão (MPS) presente no estuário da Laguna dos Patos-RS, e o backscatter corrigido de um ADCP da marca Sontek de 1,5MHz de frequência. Os autores realizaram sete cruzeiros, totalizando 205 amostras coletadas, que foram comparados com os valores de retroespalhamento do sinal acústico para o equacionamento da relação. Os autores também utilizaram 19 transectos realizados na desembocadura do estuário da lagoa, para estimativa da quantidade de MPS exportado pelo estuário. Até então, não havia registros científicos da exploração dessas relações no ambiente estuarino da Laguna dos Patos.

Latosinski *et al.* (2014) realizaram um estudo no Rio Paraná, Argentina, no qual os autores definiram seções transversais e realizaram amostras de sedimento em suspensão no intuito de relacionar com o retro espelhamento do sinal acústico emitido. O grande feito do estudo foi ter feito a análise utilizando-se de um ADCP móvel, com o qual os autores realizaram uma varredura da seção para a obtenção de dados de *backscatter*. Os resultados, para os autores, foram satisfatórios, obtendo diferença inferior a 46% comparando a descarga sólida estimada por método acústicos com a amostrada através de integração da vertical e posteriores

etapas de secagem, peneiramento, evaporação, e pesagem das amostras em laboratório para determinação da CSS por métodos tradicionais.

Boldt (2015) apresenta o software Sediment Transect Acoustics (STA), uma ferramenta baseada em MATLAB para a estimativa da CSS a partir de ADCPs do tipo dinâmico, a partir da calibração de modelos que relacionam de forma linear o *backscatter* corrigido e a CSS, utilizando equações já propostas por Gartner (2004). A ferramenta utiliza amostras pontuais de água-sedimento, e as relaciona com o *backscatter* da célula de mesma posição. A ferramenta propõe uma forma de calibração e avaliação de modelos de estimativa para seções de pequenos e grandes rios, de forma automatizada. A ferramenta se encontra ainda em testes, porém, autores como Wood *et al.* (2018) já apresentaram avanços no desenvolvimento da ferramenta, bem como testes e resultados obtidos.

Domanski *et al.* (2015) apresentaram a ferramenta Surrogate Analysis And Index Developer (SAID) para cálculo e avaliação das relações entre *backscatter* corrigido em CSS de forma automatizada, utilizando a forma de equacionamento proposta por Gartner (2004) junto das correções para dispersão do pulso acústico, do meio aquoso, e da presença de sedimentos. A grande conquista do trabalho foi oferecer a pesquisadores e profissionais da área de sedimentometria uma ferramenta que auxilie na construção de estimativas de CSS a partir de equipamentos acústicos.

Wood, Fosness e Etheridge (2015) utilizaram nesse estudo ADCP's com 1,5 e 3,0MHz de frequência para avaliar o equacionamento do *backscatter* corrigido com a CSS em uma seção no rio Kootenai, Idaho – EUA. Também utilizaram a vazão como variável explanatória para a mesma seção. O grande trunfo do trabalho foi conseguir equacionar a relação CSS x *backscatter* corrigido para diferentes frações (areia, silte e argila), isso possível pela utilização de diferentes frequências.

Landers *et al.* (2016) em conjunto com a USGS, realizaram um estudo minucioso descrevendo o método para estimativa da CSS de forma contínua através de métodos acústicos utilizando-se dos dados de *backscatter* gerados pelo equipamento. Nesse estudo os autores exploraram a interferência e ajuste da correlação das variáveis levando em consideração outros parâmetros, como o tamanho e forma da partícula sólida.

## 2.2 Processo de formação dos Sedimentos

É unanime entre os autores que escrevem sobre a área de sedimentos, que o estudo e conhecimentos de tais, são capazes de auxiliar o homem a entender a relação de interação existente entre atmosfera e pedosfera, auxiliando na obtenção de respostas acerca da relação de causa e efeito entre a ação antrópica e meio ambiente. Para Siviero e Coiado (1999), são naturais os processos que envolvem a geração e o transporte de sedimentos, porém, embora naturais, esses podem ser intensificados pela ação antrópica em atividade do tipo desmatamentos, construções, exploração de jazidas, e atividade agrícola. Autores como Araújo *et al.* (2003), e Simões e Coiado (2001), ainda salientam que ações antrópicas negativas ao solo, como as citadas anteriormente, podem elevar os processos erosivos em até 100 vezes, quando comparados a processos erosivos naturais.

Merten e Poletto (2006), ainda destacam o fato de estudos acadêmicos na área de sedimentos se apresentarem de forma limitada no Brasil, recebendo algum enfoque mais voltado para os estudos de problemas físicos gerados pelos sedimentos, os quais se apresentam como problemas de assoreamento de lagos, rios e reservatórios. Bortoluzzi e Petry (2008) reforçam o fato de que a formação, transporte e deposição dos sedimentos possui ligação direta com o ciclo da água e é diretamente influenciada pela ação antrópica, porém, sendo essa ação antrópica capaz de variar a magnitude das etapas citadas.

Para Vestena, Lucini e Kobiyama (2008), é de grande importância a correta avaliação do transporte de sedimentos para que se possa compor a caracterização de bacias hidrográficas, assim como a quantificação de impactos do manejo do terreno e de alterações antrópicas. Ainda segundo os autores, tem se apresentado como um problema o fato de medições pontuais, com intervalos amostrais relativamente grandes, apresentarem dificuldades em representar a dinâmica hidrossedimentológica de cursos d'água, pois amostragens, por exemplo, com intervalo diário podem esconder variações significativas, principalmente tratando-se de pequenas e médias bacias.

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), a compreensão de processos hidrossedimentológicos se faz possível através do monitoramento (processo contínuo de medição) de determinadas características de fenômenos hidrológicos.

Entretanto, o processo de monitoramento automático de forma contínua necessita de dados amostrados *in loco* para aferição e calibração das estimativas, isso muito se deve ao fato das influências sofridas no monitoramento por diversos fatores (VESTENA, LUCINI e KOBIYAMA, 2008).

Para Carvalho (2008), os sedimentos são partículas derivadas das rochas ou de materiais biológicos oriundos de fragmentação dessas rochas através de processo físico ou químico, sendo a partícula de sedimento em si, capaz de ser transportada por um fluído (água). Ainda segundo o autor, a partícula de sedimento é na maioria dos casos transportada pela água ou pelo vento, de seu local de origem (rocha) até seu local de deposição (cursos d'água), sendo então o sedimento, o material sólido presente em suspensão ou depositado no leito de cursos de água.

Para se tornar sedimento propriamente dito, esse deve passar por processos como: erosão, transporte, e deposição, os quais tem ação direta nas rochas e fragmentos de rochas. Segundo Carvalho (2008), esses processos são naturais e ocorrem através do tempo geológico, tendo como principais agentes externos a água, o vento, a gravidade, o gelo e os agentes biológicos, como o caso da ação humana. Ainda segundo o autor, esses fenômenos podem ocorrer de forma isolada ou combinando suas forças e agentes. Além disso, o autor introduz a este trabalho os termos sedimento fluvial e sedimento eólico, sendo que o primeiro representa uma determinada quantidade de partículas minerais transportadas ou depositadas em cursos d'água por ação do escoamento das águas, e sedimento eólico como o sedimento movido ou depositado por ação e influência do vento.

Os processos de erosão, transporte e depósito, são termos isolados, porém fenômenos que se completam dentro do ciclo de existência dos sedimentos, podendo ser a erosão definida como, o fenômeno em que ocorre o desprendimento e/ou remoção de partículas de rocha ou solo, causado pelos agentes motrizes anteriormente citados, água e/ou vento. Em adição, o fenômeno intitulado de transporte se refere ao carregamento dessas partículas, já com seus processos de fragmentação iniciados, por cursos d'água na maioria dos casos, podendo que esses sedimentos incorporados ao fluído se mantenham distribuídos de forma uniforme ao longo da coluna de água, ou por força física, precipitem e venham a se depositar, justificando o fenômeno intitulado depósito ou deposição dos sedimentos.

A ação da força tempo geológico na partícula de fragmento de rocha ou solo, possui relação com o aumento da capacidade desse fragmento em ser transportado, de forma que, com o aumento do tempo geológico, a partícula tenda a ter seu diâmetro diminuído, e sua capacidade de ser transportada aumentada (Figura 1).



Figura 1 – Gráfico da ação forçante, tempo geológico em fragmentos de rocha ou solo, e as consequências no diâmetro da partícula e na capacidade de transporte.  
Fonte: Próprio autor.

### 2.2.1 Comportamento e distribuição dos sedimentos

O sedimento já inserido no curso d'água é submetido, como já dito anteriormente, a processos como erosão, transporte e deposição. Quando o fenômeno transporte entra em ação, esse é capaz de subdividir o sedimento em diferentes grupos, que de acordo com Silva (2003) são: Carga sólida do leito ou de arrasto; Carga sólida saltitante; Carga sólida em suspensão. Essas classificações se dão principalmente em função da granulometria de partícula e características do fluxo (turbulento ou laminar, com altas ou baixas velocidades de escoamento). A influência das características do fluxo no transporte de sedimentos pode ser percebida ao visualizarmos a semelhança de comportamento existente entre a carga de sedimentos transportada, e a descarga líquida da mesma seção, sugerindo que

existem relações entre velocidade, e ou, descarga líquida do fluxo, com a descarga sólida (Figura 2).

Para Carvalho (1994), partículas de sedimento de granulometrias mais finas, como silte e argila, apresentam-se distribuídas de forma mais uniforme na vertical, enquanto partículas de sedimentos de granulometria mais grosseira apresentam-se com variação de distribuição crescente da superfície para o leito. Esse fato acaba por inferir em concentrações de sedimento mais baixas quando próximo das margens, na maioria dos casos, fato influenciado pelas baixas velocidades encontradas nesses locais, quando comparadas as velocidades existentes no meio da seção.

Carvalho (2008) destaca que, o sedimento em suspensão possui seu transporte regido principalmente pela velocidade da corrente do escoamento, enquanto o sedimento de leito, por exemplo, é bastante influenciado pelo atrito que atua e sofre em seu processo de transporte. Isso pode ser explicado principalmente pela diferença de tamanho, peso e densidade de partícula que ambas as formas de transporte de sedimento possuem, fazendo com que um determinado fluxo e características de canal, influenciem de forma distinta em ambos os tipos de sedimento.

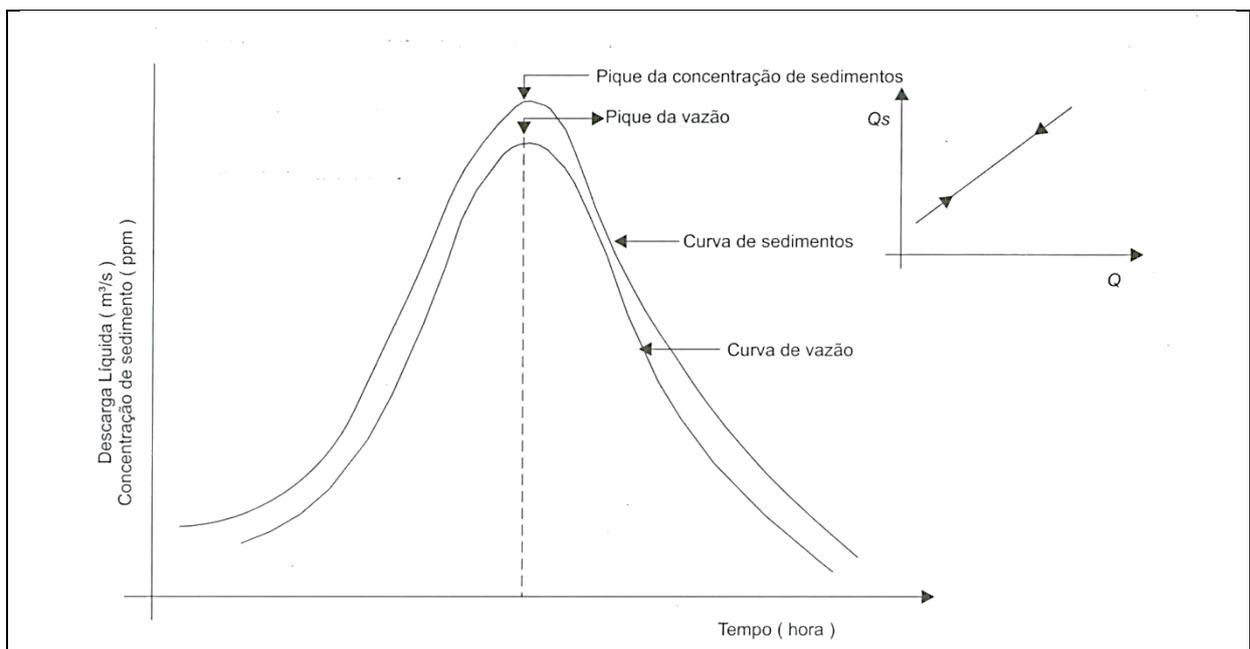


Figura 2 –Gráfico que representa o comportamento entre a concentração de sedimentos e a vazão líquida em uma dada seção.  
Fonte: CARVALHO, 2008.

Ainda considerando o mesmo tipo de sedimento transportado, esse pode variar sua distribuição na seção em função da posição em que se encontra, podendo essa variação ser tanto vertical quanto horizontal, resultando em diagramas de distribuição de sedimentos. Para Carvalho e Hora (2014), partículas finas como argila e silte, constituem na grande maioria a carga em suspensão, sendo que essa granulometria aumenta conforme a profundidade, fazendo com que partículas mais grossas estejam próximas ao leito, onde há pouquíssimo material fino. Entretanto, se considerarmos diferentes tipos de sedimentos, essa variação também ocorre de forma semelhante, resultando igualmente em diagramas de distribuição de velocidades (Figura 3a).

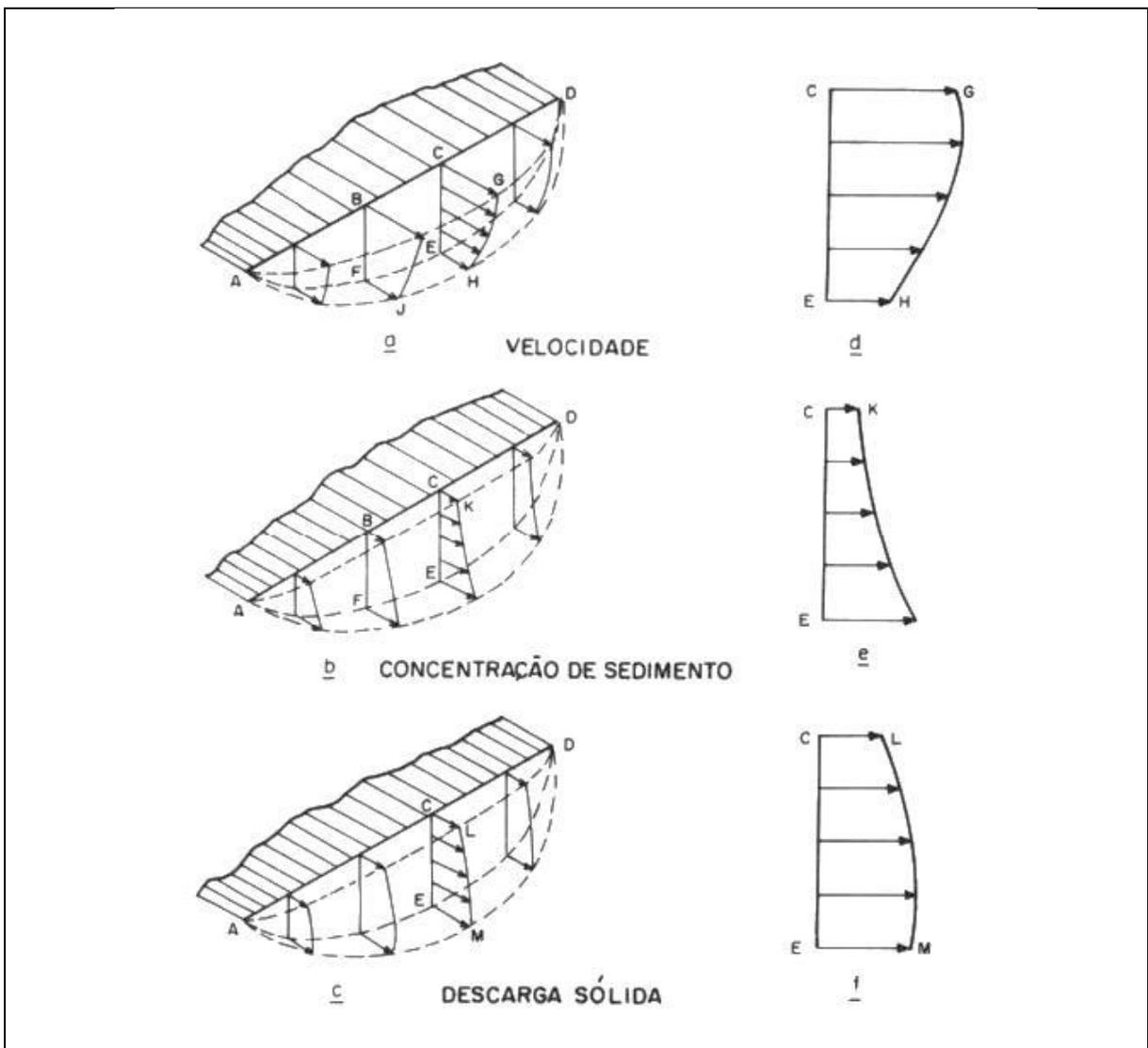


Figura 3 –Diagramas: a) de distribuição de velocidade, b) concentração de sedimentos, c) e descarga sólida em uma determinada seção de um curso d’água.  
 Fonte: SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963.

Silva *et al.* (2003), afirmam que a distribuição de sedimentos carregados para dentro de cursos d'água possui distribuição sazonal irregular por influência da chuva, sendo que em períodos chuvosos há maior carregamento de sólidos para dentro de corpos d'água. Carvalho (1994) complementa afirmando que cerca de 70% a 90% do total de sedimentos inseridos no curso d'água são advindos de fortes precipitações. Carvalho e Hora (2014) também ressaltam a heterogeneidade da concentração de sedimentos conforme a proximidade ou distância, pois como a velocidade varia próximo as margens (Figura 3a), sendo mais alta no meio da seção, passa a ser óbvio que a descarga sólida possua comportamento semelhante (Figura 3c).

Santos *et al.* (2001) ainda ressaltam serem os sedimentos materiais erodidos e suscetíveis ao transporte e deposição, sendo característico desses fenômenos a grande variação no tempo e no espaço. Ainda mencionado pelos mesmos autores, um importante conceito abordado é de que o sedimento incorporado ao curso d'água pode ser proveniente da ação erosiva da água sobre as margens e leito (*bed material*), ou então pela remoção detrítica superficial do solo (*wash load*), gerando como consequência o fato do transporte de sedimentos ser governado principalmente por fatores hidrológicos (regime de escoamento superficial) e pelas características do material particulado (origem, granulometria, densidade e etc).

### **2.2.2 Sedimento em suspensão**

Para Vanoni (1977), e Carvalho (2000), carga de sedimentos refere-se ao tipo, qualidade do material transportado (Figura 4), enquanto descarga sólida faz referência a massa total que passa em uma determinada seção por unidade de tempo, geralmente expressa em toneladas por dia.

Segundo Xavier *et al.* (2012), a capacidade de se estimar a CSS atua como fator essencial no entendimento do comportamento dos sedimentos em cursos d'água, assim como, representa um dos principais fatores na estimativa e determinação de taxas de sedimentação, e ou, dinâmicas de fluxo.

De acordo com Santos *et al.* (2001), a carga de sedimento em suspensão é composta principalmente de partículas de granulometria reduzida, como silte, argila e algumas granulometrias de areia (aquelas pequenas o suficiente para serem

transportadas pelo fluxo e misturadas à solução de forma homogênea). Ainda segundos os autores, o conceito de sedimento em suspensão se refere principalmente ao mecanismo de transporte dos sedimentos, pois dependendo da declividade do curso d'água e da turbulência do fluxo, um mesmo tipo de material pode ter seu transporte configurado do tipo suspensão ou leito, em função dessas variáveis.

Dessa forma, a carga em suspensão é caracterizada pela fração mais fina, nas quais as forças provenientes do fluxo e da turbulência do escoamento, são capazes de superar a ação da gravidade sobre essas partículas em questão, fazendo da carga em suspensão, um forte indicativo da velocidade do fluxo d'água, pois o material em suspensão acaba por participar das características físicas desse escoamento. Como consequência, pode-se observar o comportamento de precipitação dessas partículas sólidas dentro da coluna d'água influenciadas pela diminuição da turbulência do escoamento, respeitando uma ordem de precipitação ditada pelo tamanho e densidade das partículas (SANTOS *et al.*, 2001).

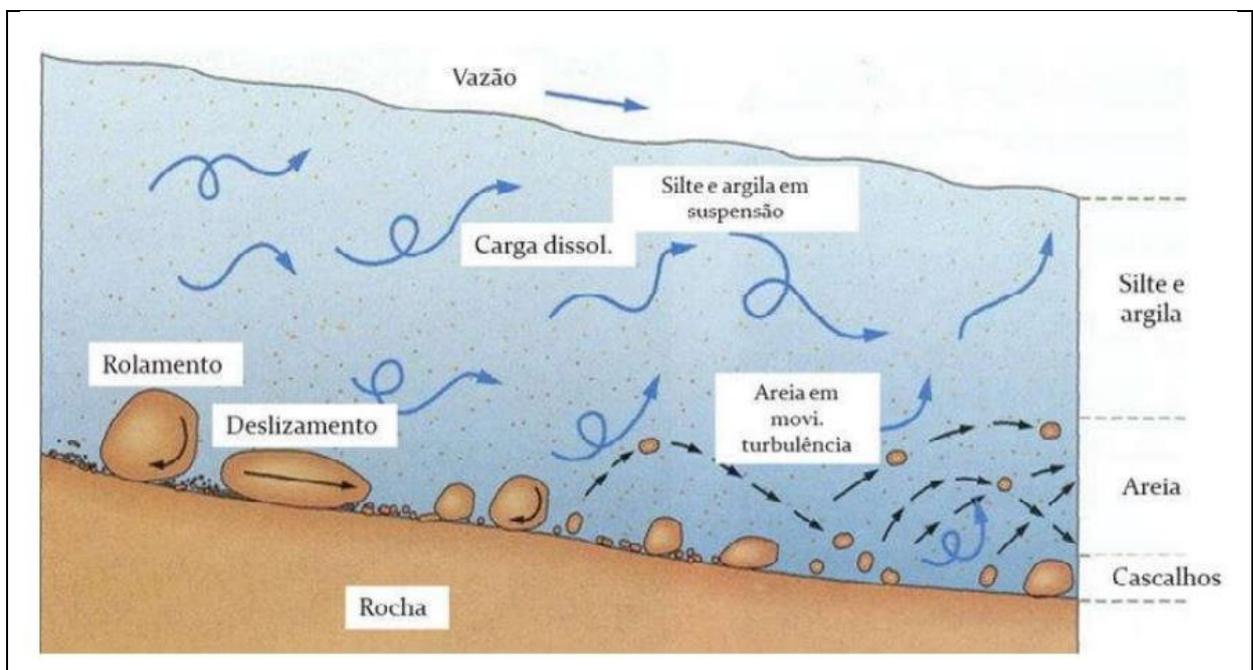


Figura 4 - Composição e tipo das cargas sólidas transportadas em um curso d'água.  
Fonte: MARCONDES, 2011.

### 2.2.3 Métodos e Equipamentos de amostragem de sedimentos em suspensão

Para Santos *et al.* (2001), a amostragem de sedimentos possui como objetivo a determinação da descarga sólida na seção do curso d'água, ou seja, a quantidade de sedimento que passa por unidade de tempo. Sendo essa quantificação, primordial para a prevenção e controle de problemas causados pela deposição de sedimentos. Ainda segundo os autores, essa descarga sólida pode ser subdividida em descarga sólida de leito, descarga sólida em suspensão e descarga sólida dissolvida.

Indiferentemente do tipo de descarga sólida que se objetiva amostrar, essa possui métodos de amostragem já descritos na literatura. Sendo de interesse para este trabalho a obtenção de valores de CSS, para tal, serão abordados equipamentos utilizados, e formas de amostragem desse tipo de descarga ou material sólido.

Os métodos para determinação da carga sólida em cursos d'água, podem ser classificados em forma direta, e forma indireta. Nos métodos diretos é realizado, *in loco* e em tempo real, a medida da variável de interesse, fazendo com que esses métodos possuam cálculos mais simplificados e menos onerosos de tempo. Porém, métodos diretos ainda se apresentam como métodos menos precisos comparados a métodos indiretos. Métodos indiretos, por sua vez, possuem cálculos mais complexos e o resultado se dá a partir da medição indireta da variável resposta (amostra de solução água-sedimento), através da medida de variáveis que possuem relação com essa (por exemplo, cota ou vazão), fazendo dos métodos indiretos, métodos mais precisos e confiáveis quando comparados aos métodos diretos.

Dentre os métodos indiretos para determinação da CSS, ou descarga sólida em suspensão, os mais tradicionais são: amostragem pontual instantânea; amostragem pontual por integração; amostragem por integração da vertical.

Segundo Carvalho *et al.* (2000), a amostragem por integração da vertical é mais comum de ser utilizada, pois permite a obtenção da granulometria e concentração média de sedimentos na vertical analisada, sendo que nessa técnica, a amostra é coleta por tempo normalmente superior a 10 segundos, permitindo maior representatividade da vertical quando comparado a métodos pontuais.

As técnicas de amostragem, pontuais ou por integração, levam em consideração o fato de que a distribuição de sedimentos ser variável ao longo da seção (Figuras 3b e 3c), portanto, essas técnicas priorizam que a seção analisada seja subdividida em verticais, e nessas verticais aplica-se a técnica desejada.

Em ambas as técnicas, diversos cuidados devem ser tomados por hidrometristas e laboratoristas, merecendo destaque o citado por Carvalho (2000), no qual o autor salienta que amostras com baixos valores de CSS, tanto para amostragens pontuais, como para amostragens por integração da vertical, podem não oferecer boas condições para uma análise com confiança elevada, pelo fato de conduzirem a erros de pesagem durante o processo de determinação da CSS.

- Amostragem por integração da vertical: A amostragem do tipo integração pode ser realizada de duas formas, amostrando apenas na subida ou descida do amostrador, ou em ambas direções, sendo que a escolha fica a critério da limitação do equipamento (com ou sem válvula de fechamento), ou da necessidade do hidrometrista.

Conforme descrito por Carvalho (2000), no caso de amostragens por integração da vertical, a mistura água-sedimentos se acumula de forma contínua dentro do recipiente coletor, sendo que o amostrador se move de forma contínua na vertical, com velocidade constante (Velocidade de trânsito) desde a superfície d'água até a profundidade desejada (próximo ao leito ou o limite do amostrador, que geralmente são 4,6 metros de profundidade), e a mistura água-sedimento entra no recipiente com uma velocidade instantânea quase que igual à do fluxo d'água no ponto de amostragem. Ainda segundo o autor, um cuidado que deve ser tomado na utilização de amostradores com a técnica de integração da vertical, é que o amostrador não deve tocar o fundo, para que o mesmo não colete, de forma equivocada, sedimento de arraste, nem tampouco, o amostrador deve inclinar no eixo horizontal, para que a velocidade de entrada da mistura seja igual a velocidade do fluxo. Com isso, o amostrador passa a ter uma zona amostrada, e uma não amostrada (Figura 5).

Ainda dentro da técnica de amostragem por integração da vertical, a metodologia escolhida para subdivisão da seção analisada, pode seguir duas

formas diferentes, por Igual Incremento de Largura (IIL), ou, por Igual Incremento de Descarga (IID), os quais serão descritos a seguir.

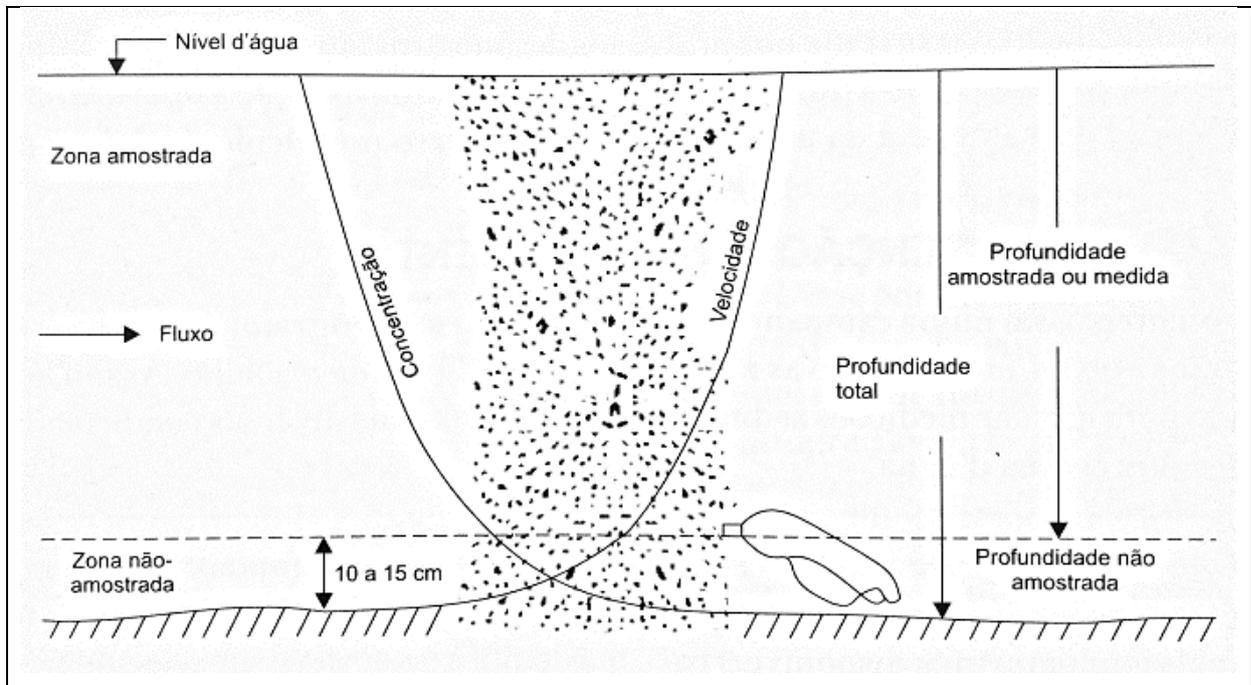


Figura 5: Zona capaz de ser amostrada utilizando um amostrador de sedimentos em suspensão.  
Fonte: CARVALHO, 2008.

- Igual Incremento de Largura (IIL): Muito utilizada por hidrometrístas no mundo todo devido sua simplicidade, essa técnica se baseia em subdividir a seção no sentido transversal, em trechos de igual largura para posterior amostragem de sedimentos. Uma das características dessa técnica é que a velocidade de trânsito do amostrador é a mesma para todas as verticais da seção, isso faz com que o volume coletado da mistura água-sedimento seja diferente entre as verticais (Figura 6), pois como citado anteriormente, a velocidade varia na seção, e conseqüentemente nas verticais.

Esse método prevê um mínimo de verticais a serem amostradas de 10, e máximo de 20, e essas subamostras podem ser combinadas (amostra composta) todas em um único frasco, ou discretizadas (cada vertical com uma subamostra). Para ambos os casos é possível obter-se a CSS média da seção.

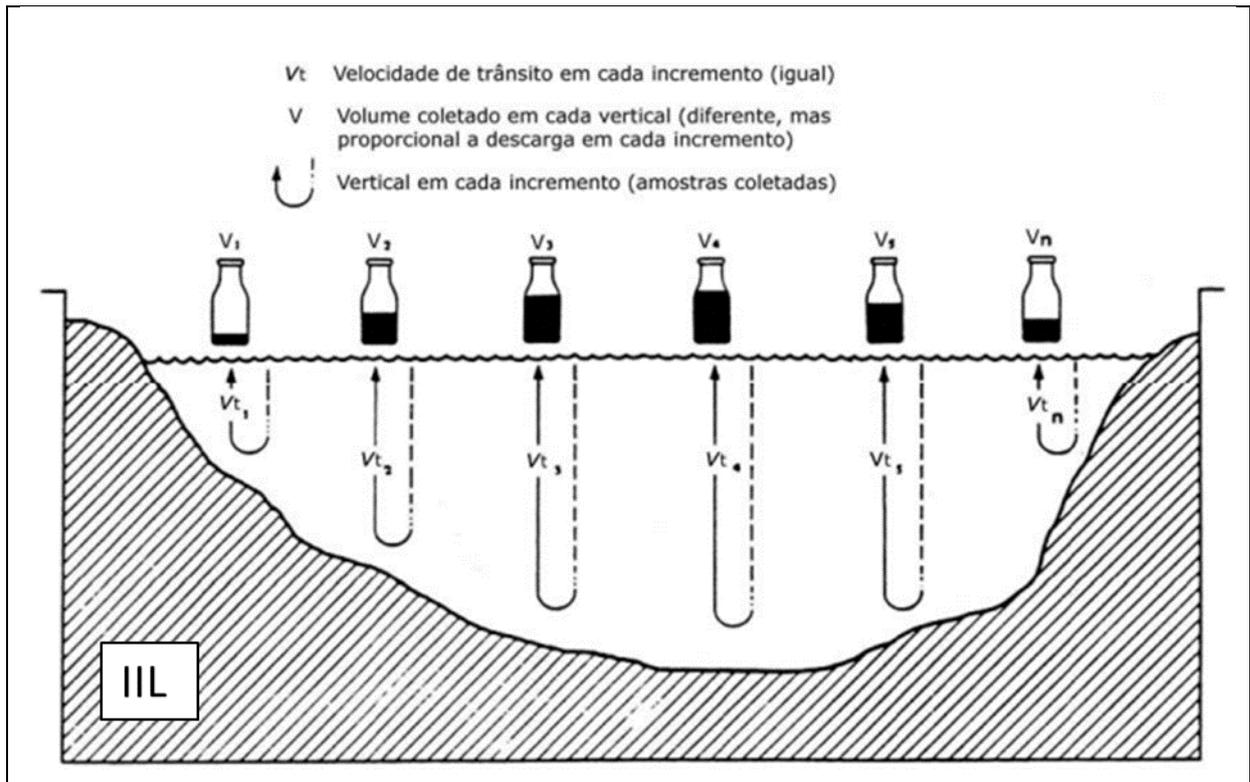


Figura 6 -Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados pela técnica de subdivisão da seção em Igual Incremento de Largura - IIL.  
 Fonte: Modificado de EDWARDS e GLYSSON, 1988.

- Igual Incremento de Descarga (IID): Nesse método, a subdivisão da seção transversal é feita em função da descarga líquida da mesma, sendo que o método IID necessita de um mínimo de 5, e máximo de 15 verticais amostradas.

Nesse método, assim como no IIL, realiza-se antes a medida da vazão da seção, e o valor total da vazão é utilizado para se definir a posição das verticais em função da vazão acumulada para cada uma delas. Segundo Carvalho (2000), o processo pode ser exemplificado da seguinte maneira: Em uma seção com vazão total de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , em que se objetiva amostrar 10 verticais, essa resultará em incrementos de descarga de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , sendo que em todas as verticais serão amostradas no meio da subseção, resultando na primeira vertical em  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a segunda  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e assim por diante, sendo que na última será de  $95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Esse conceito é exemplificado por Carvalho (2000), onde o autor apresenta um exemplo de subdivisão de uma seção transversal localizada no Rio Corumbá (Figura 7). No Gráfico superior é possível ver a vazão acumulada (ordenadas), e as distâncias em metros das

verticais (abcissas). No gráfico inferior é possível ver as profundidades em metros (ordenadas), e as distâncias em metros (abcissas).

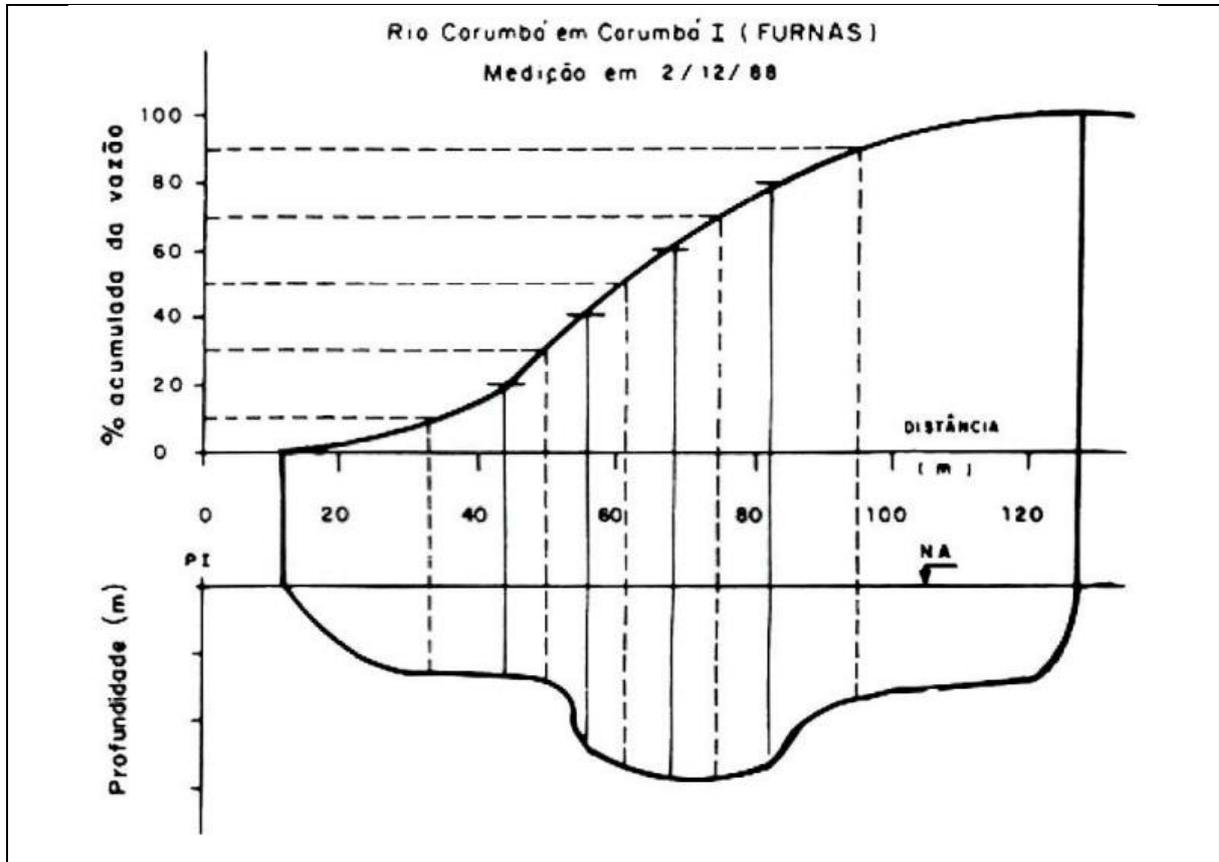


Figura 7 - Subdivisão por IID de uma seção no Rio Corumbá – 1/12/1988.  
Fonte: CARVALHO, 2000a.

Uma diferença em relação ao método IIL é que, no método IID os tempos de amostragem em cada uma das verticais variam, resultando em subamostras de igual volume (Figura 8), porém, o método permite também amostras compostas ou discretizadas por vertical.

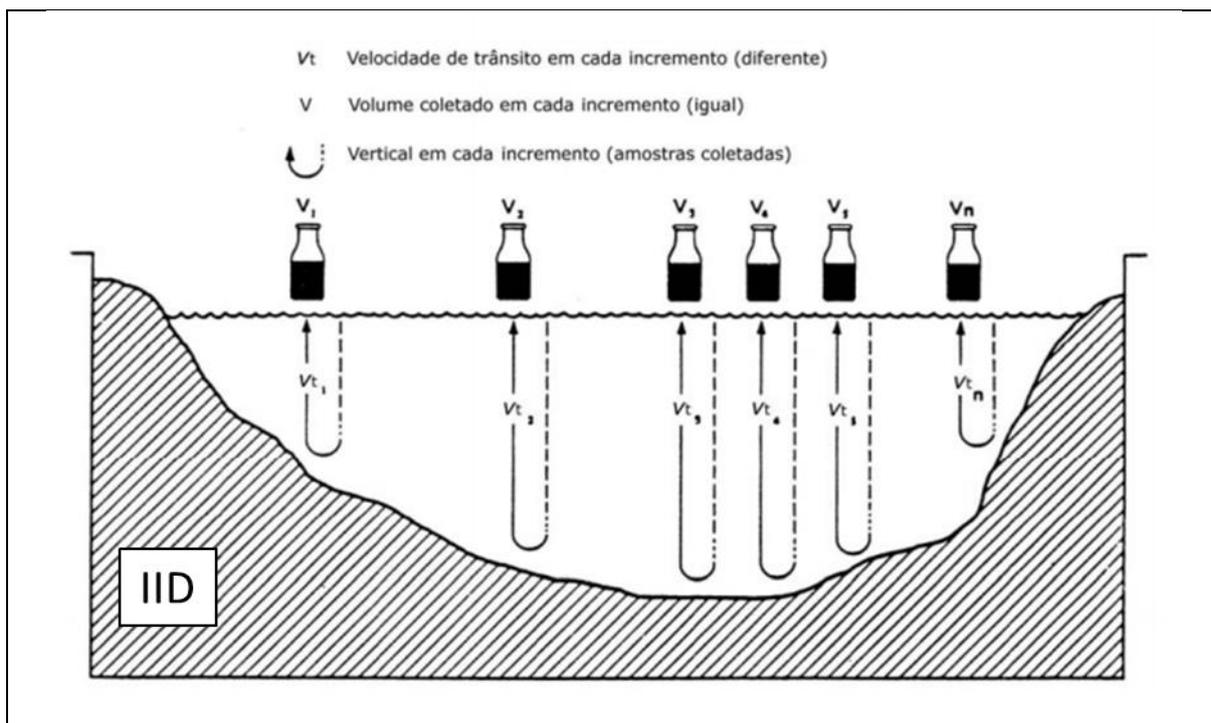


Figura 8 -Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados na técnica de subdivisão da seção em Igual Incremento de Descarga – IID.  
 Fonte: Modificado de EDWARDS e GLYSSON, 1988.

Para cálculo e definição das verticais a serem amostradas, pode-se efetuar esse procedimento de forma manual, ou de forma automatizada. Com a difusão de utilização de ADCPs, já existem softwares que executam os cálculos para subdivisão da seção, conforme dados e configurações de entrada disponibilizadas pelo usuário. Esses softwares agilizam o processo de se obter as distâncias das verticais em relação à margem, por exemplo, a partir de uma medida de vazão com ADCP. Um exemplo desses softwares é o HidroSedimentos® (BACK, 2011), software livre e desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural e Santa Catarina – Epagri. Este permite que o usuário importe os dados de vazão de um ADCP, escolha o equipamento amostrador, o diâmetro do bico de entrada do amostrador, o número de verticais desejadas, o método de subdivisão (IIL ou IID), e a margem de referência, e o software calcula a distância e o tempo de amostragem das verticais.

- Equipamentos: Diversos são os equipamentos já fabricados para amostragem de sedimentos em cursos d'água, porém, no Brasil os mais utilizados ainda

são os oriundos da série norte americana, sendo esses utilizados pelos principais órgãos que executam monitoramento de águas no país, como Agência Nacional de Águas – ANA, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, ITAIPU Binacional, e universidades e centros de pesquisa ligados à recursos hídricos. Existem também alguns equipamentos oriundos da série holandesa, sendo o mais comum a garrafa de Delft, que pode ser utilizada para amostragem de sedimentos em suspensão.

Não menos comuns, porém com restrições de aplicação, existem também os equipamentos acústicos, os quais são tema deste trabalho, sendo esses capazes de medir de forma direta a CSS ou descarga sólida através de uma ou mais variáveis previamente calibradas. A grande dificuldade de aplicação desses métodos é que eles necessitam de grande quantidade de amostragens, e em diferentes condições para que se possa inferir de forma direta, e com aceitável grau de certeza, sobre a quantidade de sedimentos da seção. Outro fator limitante desse método é que a calibração executada para um local, serve apenas para esse, necessitando-se de nova calibração para cada novo local de estudo.

Também de difusão considerável, existem os métodos ópticos como turbidímetros, que executam medidas diretas que podem ser relacionadas com a CSS pontual, ou média da seção, sendo necessário para esses equipamentos sua calibração com soluções específicas. A grande vantagem desses é a possibilidade de efetuarem medidas contínuas de turbidez, e atualmente são equipamentos de baixo custo.

Na Figura 9 apresenta-se um fluxograma com os principais métodos de amostragem de sedimentos em suspensão de forma direta e indireta, bem como os equipamentos mais comumente utilizados.

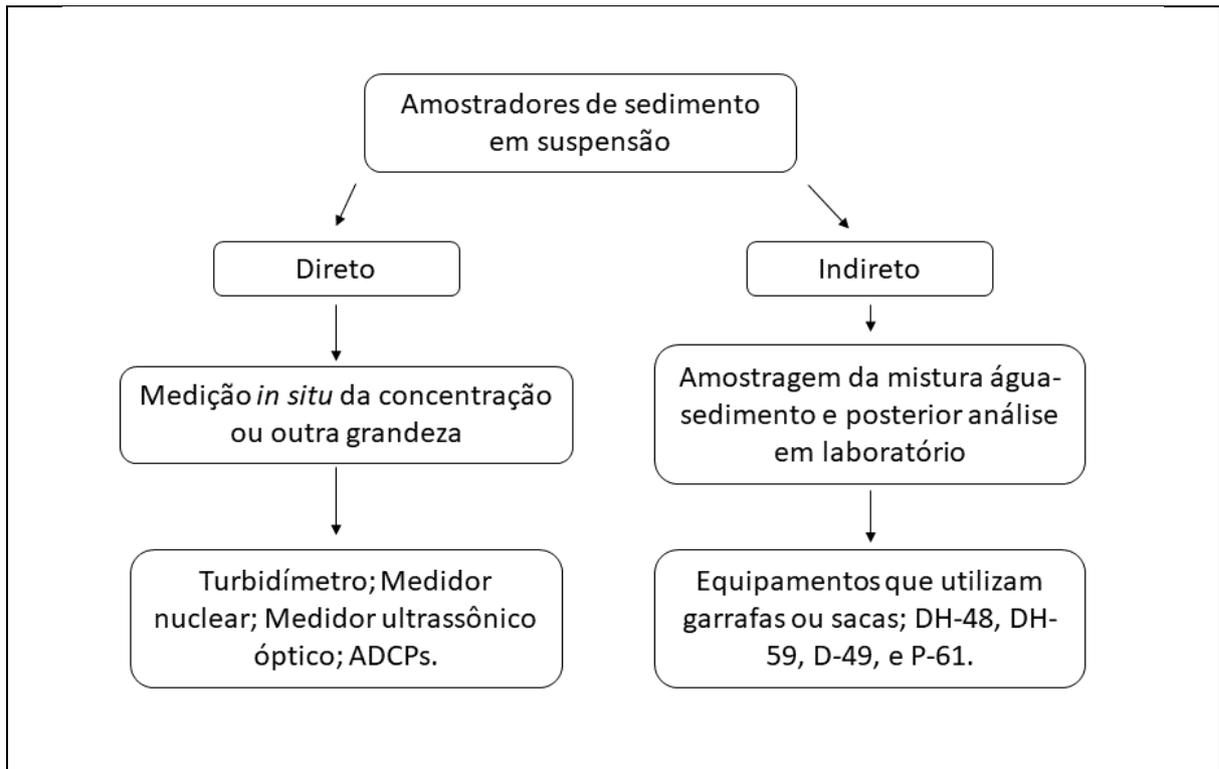


Figura 9 - Fluxograma dos métodos, formas, e principais equipamentos, para amostragem de sedimentos em suspensão.

Fonte: Próprio autor.

Para amostragem de sedimentos em suspensão, que é o foco deste trabalho, os amostradores tradicionais, da série norte americana, possuem como principais características corpo hidrodinâmico, utilizam uma garrafa de 470 ml (Figura 10) para armazenamento da mistura água-sedimento coletada, e possuem bicos cambiáveis (1/4", 3/16", e 1/8"), sendo que a escolha se dá em função da velocidade do fluxo e tamanho de partícula. No Brasil são fabricados os amostradores DH-48, DH-59 (Figura 11), D-49 (Figura 12), e P-61. Ambos são amostradores por integração da vertical, com a diferença que o D-49 pode ser utilizado tanto no sentido subida-descida, pontual, apenas subida, apenas descida. Entretanto, o DH-59, quando utilizado para integração da vertical possui como limitação a profundidade máxima de amostragem de 4,5 metros de profundidade, isso em função do recipiente armazenador (470 ml) e as opções de diâmetros de bico (1/4", 3/16", e 1/8").



Figura 10 – Garrafa de 470ml utilizada em amostradores de sedimento em suspensão.  
Fonte: Próprio autor.

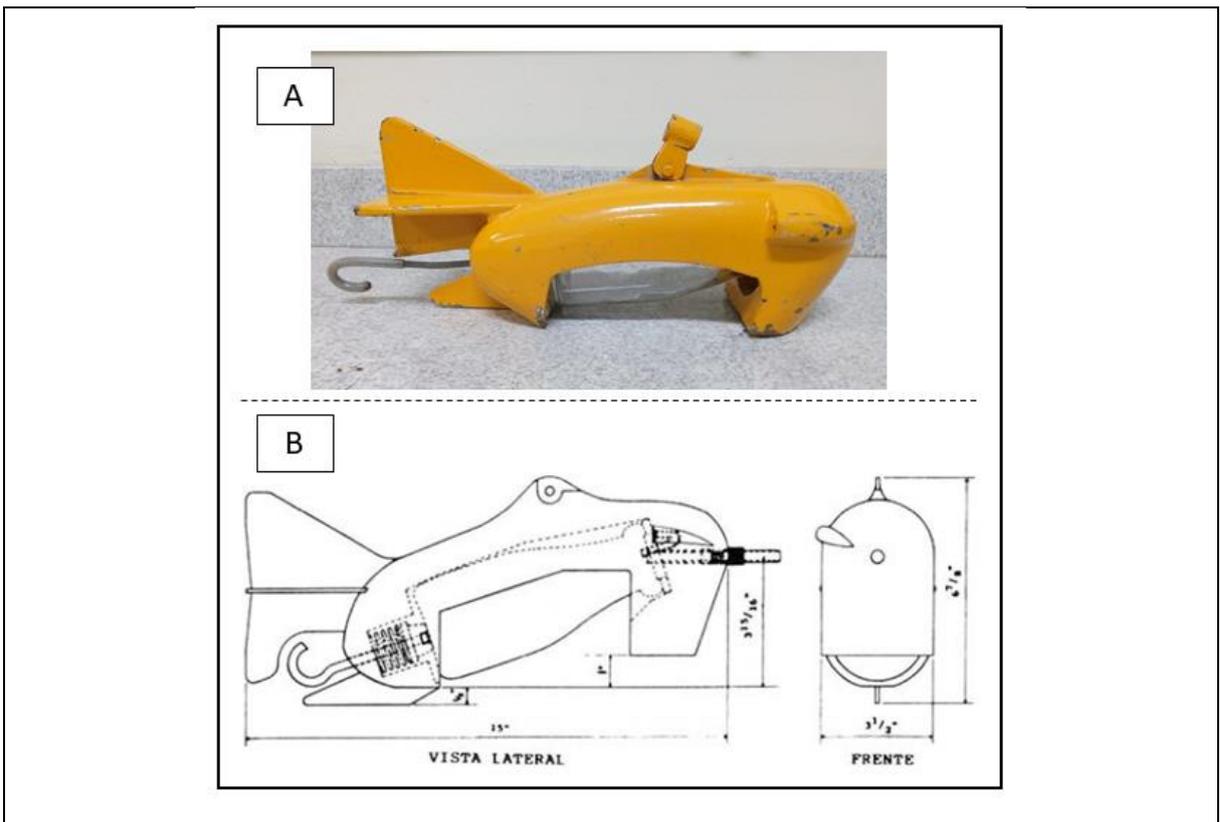


Figura 11-a) Vista lateral de um amostrador DH-59. b) Esquema construtivo de um amostrador DH-59.  
Fonte: a) Próprio autor. b) CARVALHO, 2008.

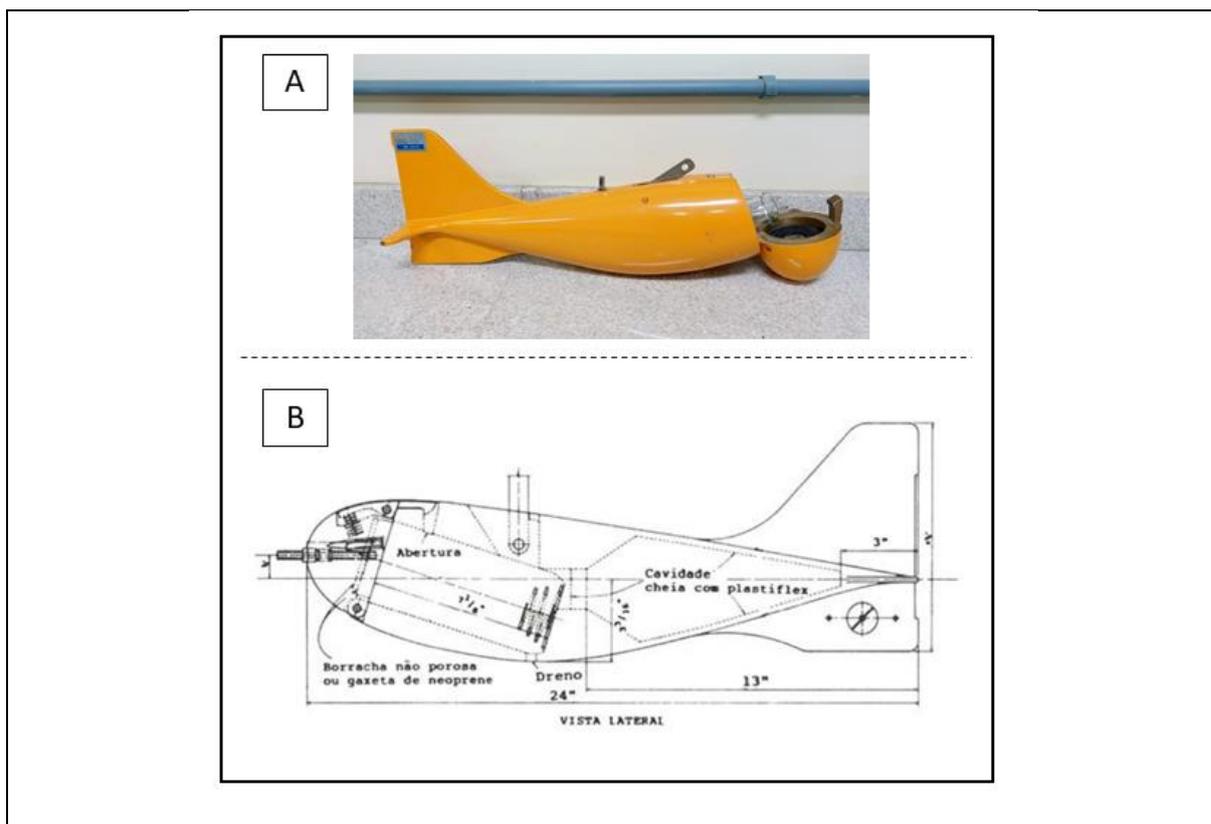


Figura 12 -a) Vista lateral de um amostrador D-49. b) Esquema construtivo de um amostrador D-49. Fonte: a) Próprio autor. b) CARVALHO, 2008.

#### 2.2.4 Determinação da CSS

Existem diferentes metodologias disponíveis a serem aplicadas em amostras de sedimento em suspensão para que seja efetuada a análise dessas. Segundo Carvalho (2008), a escolha do método está diretamente relacionada ao resultado esperado, sendo que para resultados de concentração devem ser aplicados, por exemplo, os métodos de filtragem ou evaporação, para resultados de granulometria utiliza-se o método de pipetagem, ou tubo de retirada pelo fundo.

Conforme já mencionados, existem ainda métodos alternativos para a determinação da CSS de um corpo d'água, como é o caso da utilização de equipamentos acústicos por efeito Doppler e turbidímetros, que são capazes de estimar a CSS e sua granulometria quando corretamente instalados e calibrados para esses locais.

Serão descritos com mais detalhes os métodos de filtragem, e utilização de equipamentos acústicos, em função da aplicabilidade que esses possuem, bem como, suas devidas importâncias para o trabalho em questão.

- Métodos de filtragem: Esse método é o mais utilizado (ARAÚJO *et al.*, 2003; DAVIDE *et al.*, 2003; PAIVA *et al.*, 2001), devido sua simplicidade, rapidez e precisão. Segundo Carvalho (2008), esse método também dispensa a correção para sais dissolvidos, já que esses passam pela membrana filtrante, ou ficam retidos pela umidade.

Segundo DNAEE (1970), no processo de filtragem as amostras coletadas em campo ficam em repouso por pelo menos 24 horas. Logo após são pesadas para determinação da massa bruta da amostra. Após o processo de filtragem deve ser realizada pesagem dos recipientes para determinação da massa tara. O processo de pesagem também ocorre para as membranas filtrantes utilizadas durante o processo de filtragem para determinação das massas bruta e tara.

As membranas filtrantes utilizadas são do tipo Membrana filtrante de fibra de vidro com porosidade igual a 0,6µm (retenção de partícula) com diâmetro de 47mm. Essas membranas são utilizadas no processo de filtragem junto de um cadinho de Gooch (Figura 13). As amostras são despejadas no cadinho, e com o auxílio de uma bomba de vácuo as amostras são filtradas. Em alguns casos, pode-se optar por reduzir as amostras originais.

Logo após, são executados os cálculos necessários para se obter a CSS na unidade desejada (Equação 1), sendo que a CSS é determinada através da relação entre peso seco do sedimento em suspensão retido, e o volume total da amostra (CARVALHO, 1994 e CARVALHO *et al.*, 2000).

$$CSS = \frac{p}{V} \quad (1)$$

Em que:

p = peso seco do sedimento em suspensão retido, em mg;

V = Volume total da mistura água-sedimento, em mg.

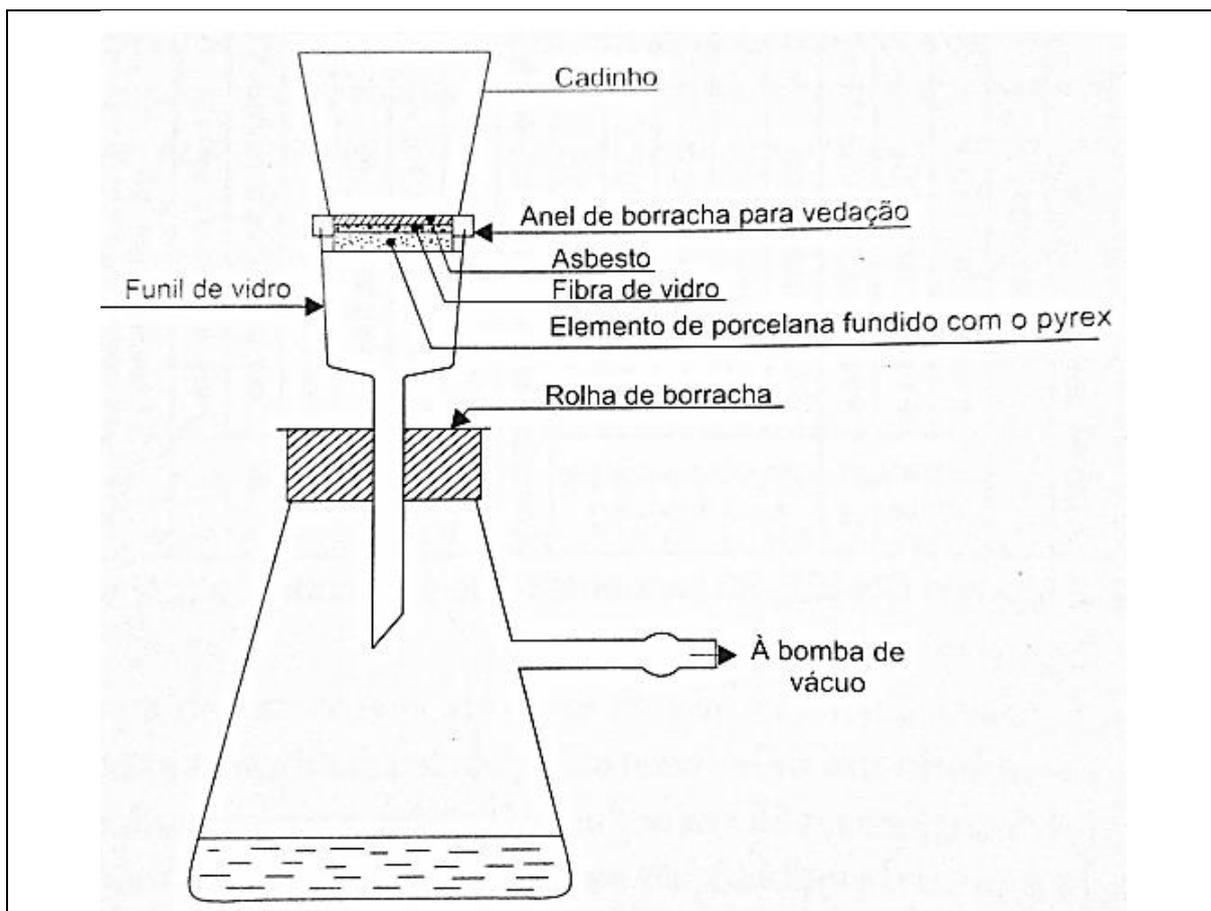


Figura 13 - Cadinho de Gooch.  
 Fonte: DNAEE, 1970.

- Equipamentos acústicos: Estudos iniciados na década de 90, e outros tantos ainda sendo conduzidos e iniciados, deixam claro a capacidade de estimar a concentração de sedimentos através de equipamentos acústicos. Porém, essa técnica ainda é utilizada e aplicada de forma experimental, por profissionais, órgãos e entidades interessadas em pesquisar sobre o tema.

Quando equipamentos acústicos estão presentes na água, esses, segundo Gamaro (2014), emitem energia (som) através do corpo d'água, essa energia interage com a mistura água-sedimento, e o som retorna para a fonte emissora (a mesma fonte que emite também recebe). Entretanto, o som que retorna é apenas uma parcela do total emitido, pois esse processo é dependente de outros fatores, como a temperatura, salinidade, quantidade de particular, e características das partículas.

Ainda de acordo com Gamaro (2014), quando esse som emitido retorna para a fonte emissora, esse necessita ser amplificado para que o emissor possa fazer a correta leitura e interpretação dos dados. Portanto, a perda do sinal, inerente ao processo, é objeto de estudo de cientistas, pois o backscatter pode, com um certo grau de certeza, inferir sobre a quantidade de sedimento presente na água.

Conforme já mencionado, uma das desvantagens na utilização desses métodos é que após calibrados para um determinado local, essa calibração serve apenas para esse local, fazendo disso uma das grandes limitações para comercialização dessas técnicas e ferramentas.

Entretanto, estudos conduzidos de forma experimental com equipamentos acústicos ADCP's do tipo estático, se demonstrando mais capazes de estimar a CSS frente aos tradicionais métodos, como por exemplo, pela construção de uma curva-chave de descarga sólida. Um exemplo da superioridade de ADCP's na estimativa da CSS frente a técnicas tradicionais é apresentado por Wood (2014), que compara para uma mesma seção, o desempenho das variáveis backscatter corrigido (eixo das abcissas superior) e vazão (eixo das abcissas inferior) na estimativa da CSS (eixo das ordenadas). Nesse estudo foram desenvolvidas regressões lineares para análises, resultando em  $R^2 = 0,93$  para a relação backscatter corrigido e CSS, e  $R^2 = 0,55$  para a relação vazão e CSS (Figura 14).

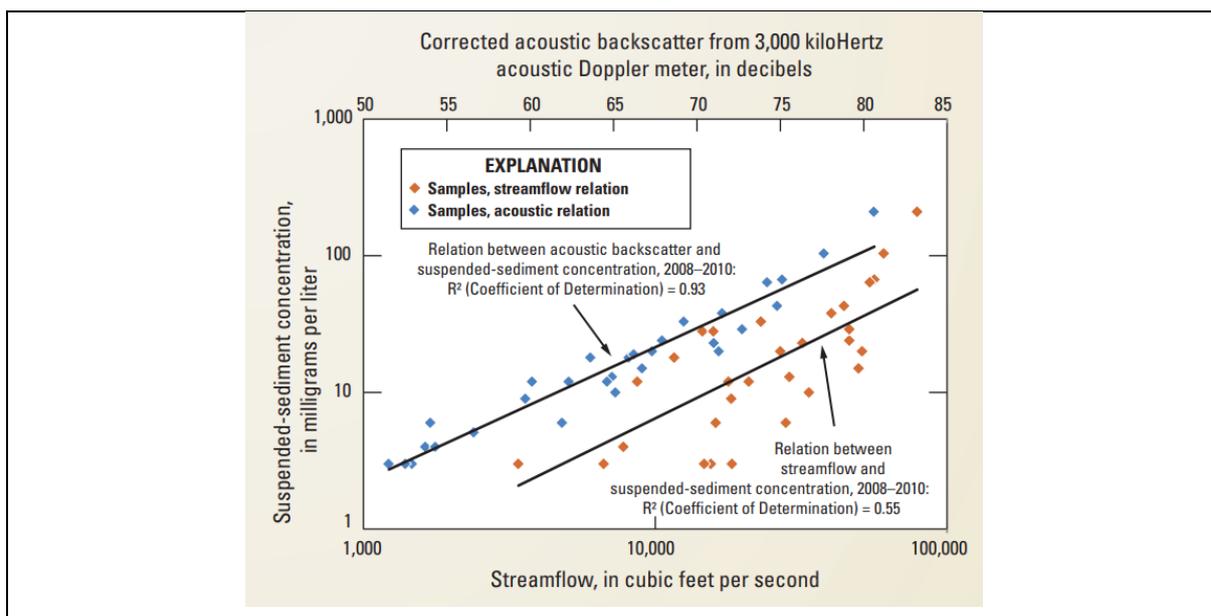


Figura 14: Relação entre CSS e Vazão, CSS e Backscatter a partir de um equipamento acústico, instalado no Rio Clearwater, Spalding – Idaho.  
Fonte: WOOD, 2014.

## 2.3 Equipamentos Acústicos em corpos d'água

A partir das décadas de 70 e 80, iniciaram-se estudos e testes com sonares para aplicações marítimas, principalmente para prospecção geológica. Um efeito indesejado obtido nesses testes, era justamente o efeito Doppler (ANA, 2014).

Ainda na década de 80, dando continuidade aos estudos iniciados durante a Segunda Guerra, dois membros da Universidade da Califórnia fundaram a RD Instruments (RDI), Fran Rowe e Kent Deines, que posteriormente foram os responsáveis por comercializar o primeiro ADCP para uso em águas salgadas.

Fizeram parte também da norte americana RDI, Ramon Cabrera, e Atle Lohrmann. Porém, na década de 90, Ramon e Atle saíram da RDI para fundar a SonTek, sendo essa a responsável por criar o primeiro ADV para medições laboratoriais. Ainda na década de 90, Atle saiu da empresa norte americana SonTek, para fundar a Nortek, norueguesa (ANA, 2014).

Atualmente, essas três empresas (RDI, SonTek, Nortek) são as principais fabricantes de equipamentos acústicos no mundo, assim como, são as responsáveis pelas principais evoluções desses equipamentos desde que esses foram criados.

No Brasil, esse tipo de equipamento passou a ser utilizado apenas a partir da década de 90, no setor de geração de energia para medições de vazão.

Os equipamentos de efeito *Doppler* hoje utilizados são uma evolução dos antigos AVMs (*Acoustic Velocity Meters*), os quais não eram capazes de medir a velocidade do fluxo em diferentes direções, fazendo com que situações de fluxo bidirecional ocorridos em canais, correntes marítimas e oceânicas, situações de oscilação de maré, ficassem sem um método de representação eficaz. Entretanto, atualmente a sigla ADCP é usada de forma genérica para descrever um equipamento acústico, não importando a categoria na qual se insere.

Utilizados para medições de vazão em corpos d'água, os equipamentos acústicos de efeito *Doppler* tem sido utilizado em larga escala em vista dos avanços que esses foram capazes de trazer para o campo da hidrometria, em função da facilidade de uso, nível de detalhamento dos resultados, e principalmente segurança na operação. Por exemplo, para uma tarefa de medição de vazão não é mais necessário a passagem de cabos, equipamentos não precisam ser constantemente "baixados", não se perde tempo parado em uma vertical, ADCPs não necessitam ser

calibrados, e não possuem partes moveis que possam sofrer decomposição (GAMARO, 2012).

Porém, esses equipamentos apresentam como desvantagens o custo ser relativamente alto, e principalmente, a medição ocorrer em apenas uma parte da seção, sendo que o restante é estimado por extrapolação (BACK *et al.*, 2011). Isso ocorre devido a limitações e características existentes em equipamentos do tipo, como o fato dos transdutores serem ao mesmo tempo emissores e receptores, isso acaba por gerar uma região próxima ao equipamento que não pode ser medida devido ao fato do equipamento possuir um tempo mínimo entre emitir um pulso e receber um retorno, esse tempo mínimo gera o chamado *blanking distance*. Outro problema que ocorre é a existência do chamado *side-lobe*, que representa a dispersão do som ao redor da onda sonora, causando uma espécie de forma cônica na onda emitida, sendo que as ondas que retornam do *side-lobe* não são utilizadas para cálculo, gerando por isso uma faixa não amostrada próxima ao leito e das margens (Figura 15).

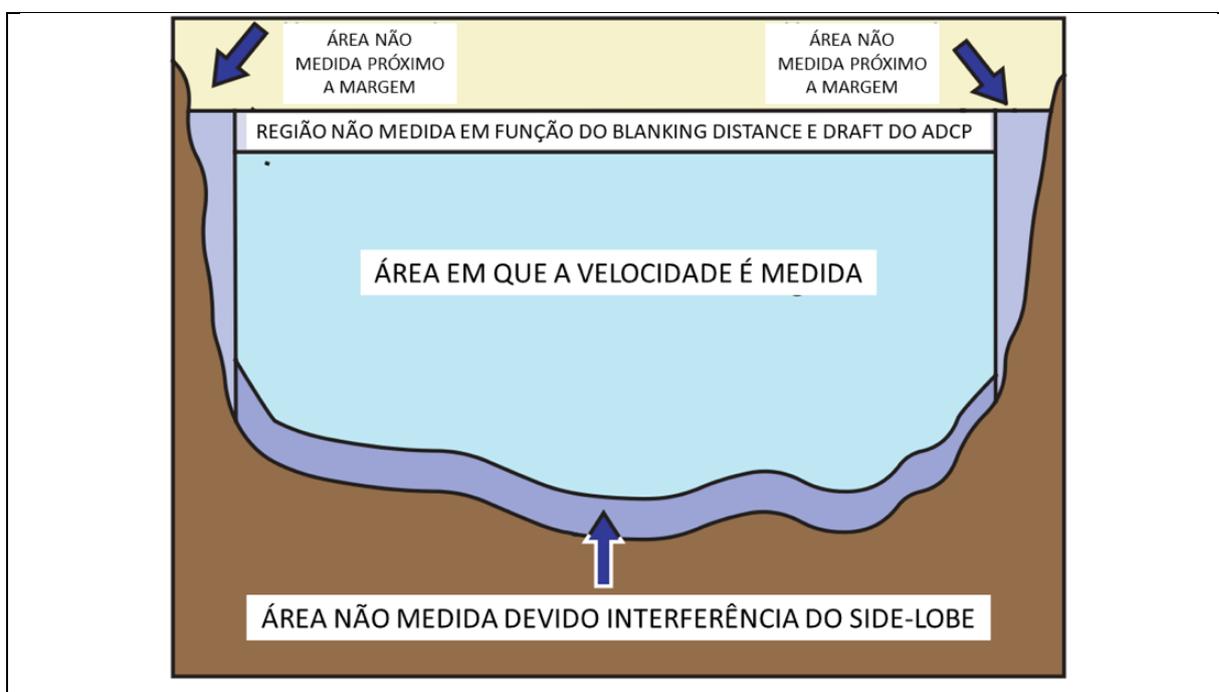


Figura 15 – Representação das áreas medidas e extrapoladas utilizando-se um ADCP móvel.  
Fonte: Modificado de SIMPSON, 2001.

No entanto, Gamaro (2012) salienta a necessidade de regulamentação e padronização da técnica de medição de descarga a partir desses métodos, pois

conforme a técnica utilizada, essa pode gerar distorções imperceptíveis, causando erros e dados distorcidos. Esse mesmo autor vai além e sugere que os conceitos de hidrometria sejam revistos e adaptados, para que incluam a discussão dessas técnicas, permitindo a atualização do profissional de hidrometria, em vista da difusão que os ADCP's possuem hoje, tanto para medidas de descarga líquida como estudos para medição de descarga sólida.

### **2.3.1 Princípio de funcionamento**

Descoberto pelo matemático e físico austríaco Christian Johann Doppler em 1842, em Praga, Tchecoslováquia, o *efeito Doppler* é a percepção, entre a fonte e um observador qualquer, da alteração de frequência de uma determinada onda acústica. Entretanto, dois termos fundamentais são necessários para que se possa compreender a maneira com a qual equipamentos acústicos interagem com a água, esses são:

- A) Comprimento de onda: distância existente entre dois picos de mesma onda.
- B) Frequência: Contagem de picos de onda que passam por um observador, em um determinado intervalo de tempo, que quando considerada a unidade de medida Hz (Hertz) equivale ao intervalo de um segundo medido.

Segundo Gamaro (2012), a frequência emitida por uma fonte (som ou luz) até um observador, é diretamente proporcional à velocidade com que a distância, entre o emissor e o observador, se altera aumentando ou diminuindo. Assim como, mudanças que ocorram na frequência da onda emitida e refletida de volta pelas partículas presentes na água, é proporcionalmente relacionada a velocidade com a qual a distância entre emissor e receptor aumenta ou diminui. A frequência se mantém inalterada quando não há variação da distância percebida pelo emissor ou objeto (Figura 16a). Em contrapartida, quando existe percepção, por parte do emissor ou objeto, da variação da distância, isso causa um “apertamento” da onda (menos comprimento de onda e maior frequência), ou “alongamento” da onda (maior comprimento de onda e menor frequência) (Figura 16b).

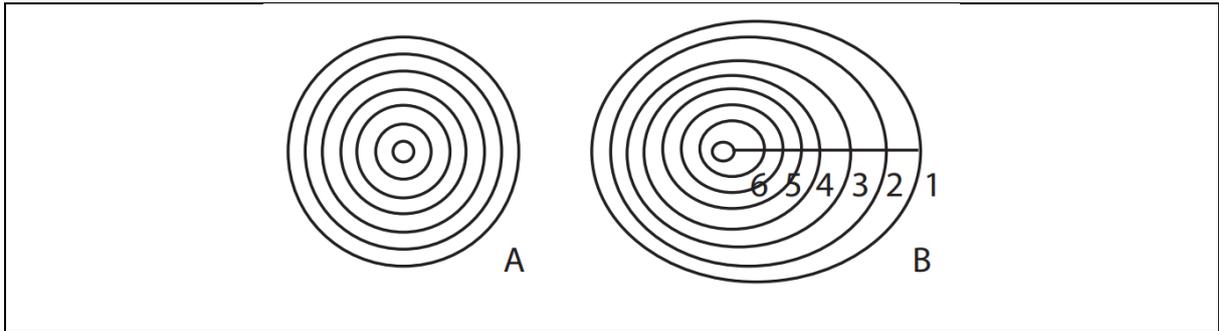


Figura 16 – Frequência a) constante quando não há movimento percebido entre emissor e receptor, e b) alterada quando há movimento, por exemplo, da esquerda para a direita por parte do emissor. Fonte: ANA, 2014.

Exemplificando: um carro de corrida passa por um observador fixo na reta principal de um autódromo, e, à medida que se aproxima do observador, o som do motor fica mais agudo e passa para mais grave à medida que se afasta, dando continuidade a seu trajeto (ANA, 2014, p. 63).

Ou seja, o som emitido pelo equipamento acústico se choca com as partículas (Figura 17) presentes na água, material orgânico, bolhas de ar, fazendo com que o pulso emitido possa ser desviado, absorvido (parcial ou totalmente), ou refletido para a fonte emissora. As partículas que estão presentes na água estão por sua vez em movimento constante, sendo que a velocidade do movimento das partículas, segundo Santos *et al.* (2001), é a mesma velocidade da água. Portanto, identificando a velocidade de deslocamento das partículas, o equipamento acústico é capaz de estimar a velocidade da água.

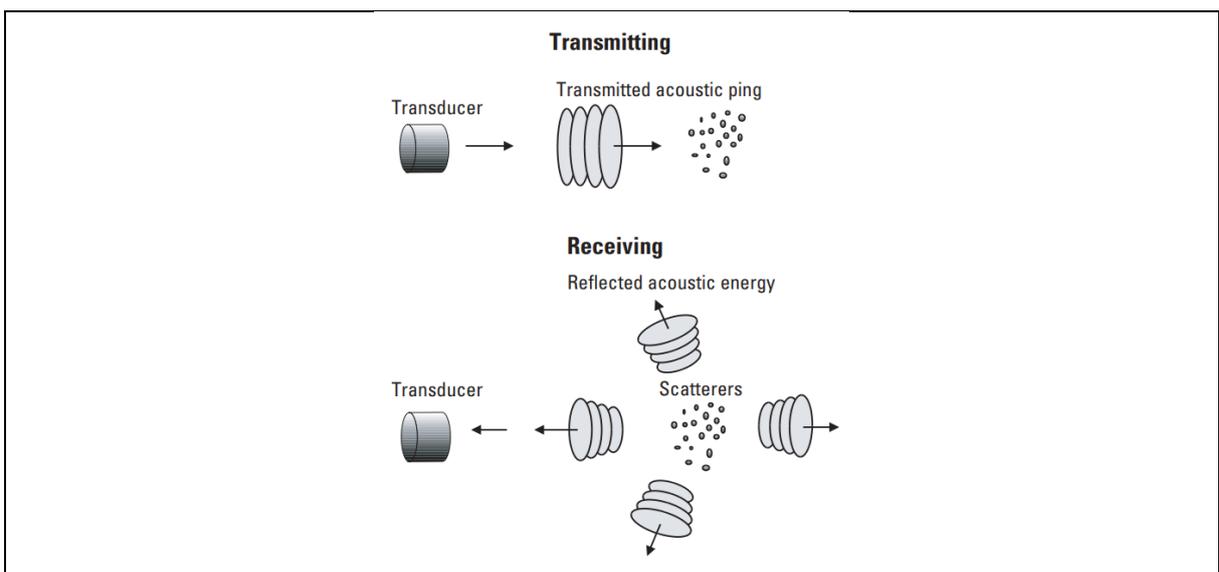


Figura 17 – Forma com que as partículas na água reagem à pulsos sonoros emitidos. Fonte: SIMPSON, 2001.

Fica claro também pelo princípio de interação entre equipamentos acústicos e partículas presentes que, assim como esses equipamentos possuem aptidão para “sedimentometria” os sedimentos, também possuem restrições quanto a falta desses, possuindo sua operação restringida para águas muito cristalinas ou sem presença de material em suspensão, justamente pela falta de “objetos” para a onda acústica interagir.

Segundo Simpson (2001), se tentarmos comparar a utilização de ADCP's com métodos tradicionais para a medição de velocidade em cursos d'água, por exemplo, molinetes hidrométricos e outros velocímetros mecânicos, é como se realizássemos a submersão de vários desses em uma linha vertical. Dessa forma teríamos várias medidas pontuais de velocidade, de forma simultânea, claro que, essa seria uma tarefa quase que impossível pela viabilidade de execução. Entretanto, quando observamos uma seção obtida por um ADCP móvel (Figura 18), cada célula representa a velocidade média ponderada de toda a célula, sendo que ADCP's não se limitam a realizar a medida apenas no centro da célula, mas sim o equipamento está fazendo uma “varredura” da vertical, e conseqüentemente da seção.

Entretanto, um cuidado a ser considerado na utilização desses equipamentos é a presença ou não de fundo móvel na seção a ser monitorada. A presença de fundo móvel gera um “falso” deslocamento do barco (no sentido a montante da seção) (Figura 19), resultando em valores de velocidade inferiores aos reais, gerando erros na medida de vazão.

Fundo móvel: ADCP's são capazes de medir a velocidade do barco através da técnica de *bottom tracking*, à qual identifica e calcula as variações doppler do pulso emitido que reflete no leito. Essa técnica assume que o leito do curso d'água é estacionário; entretanto, transporte de sedimentos próximo do leito pode afetar essa variação doppler, afetando o *bottom tracking*. Em alguns casos, leituras de *bottom tracking* de leitos com elevadas concentrações de material transportado próximo ao leito, podem contaminar os dados de leitura do mesmo. Esses sedimentos normalmente estão sendo transportados na direção do fluxo. Se o *bottom tracking* for afetado pelo transporte de sedimentos, a medida de velocidade do barco sofrerá tendência na direção oposta do fluxo de sedimento. Um barco que esteja parado em um curso d'água pareceria estar se movendo na direção de montante. Essa tendência na velocidade do barco resultaria em medidas de velocidade da água e descarga líquida inferiores as reais, viés negativo. (Mueller *et. al.*, 2013, p. 25, tradução nossa).

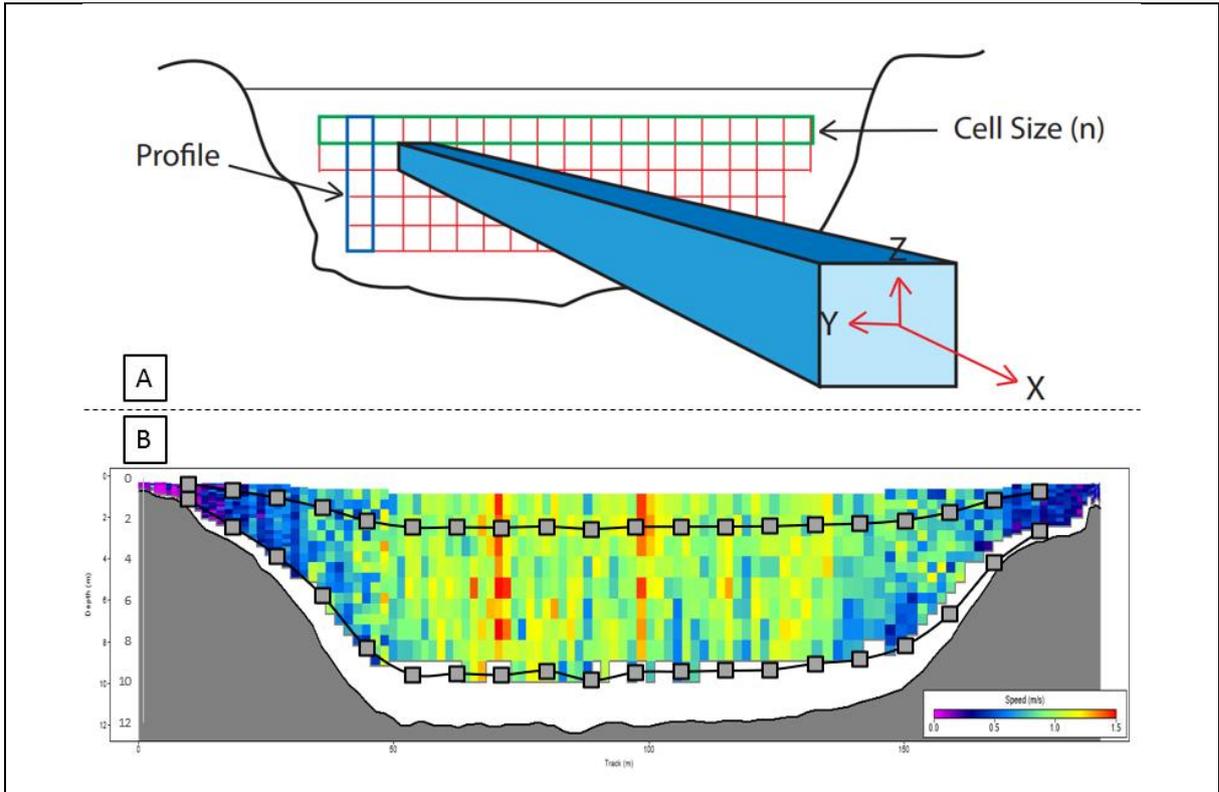


Figura 18 – Seção discretizada em células com vetores velocidade a) em diferentes direções, b) adicionados (cinza) locais de medida de um molinete hidrométrico.  
 Fonte: a) ANA, 2014. b) Próprio autor.

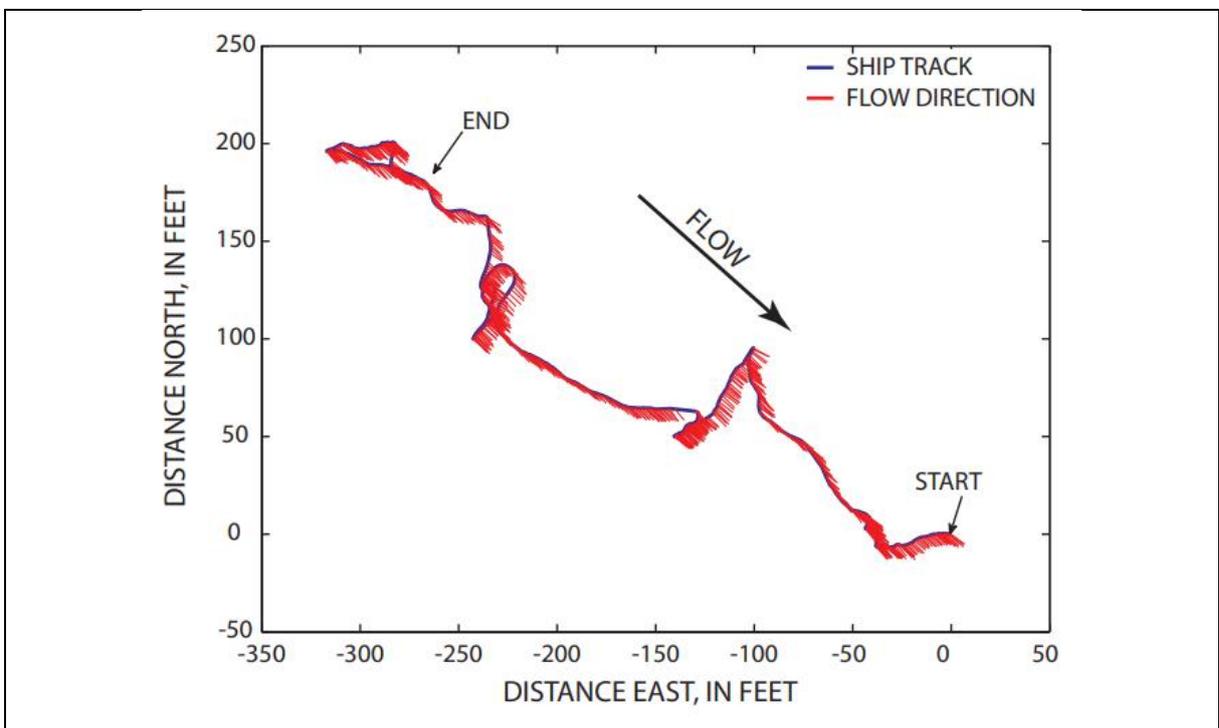


Figura 19 – Presença de fundo móvel causando “falso” movimento do barco no sentido montante do local de medição.  
 Fonte: MUELLER *et al.* (2013).

### 2.3.2 Medidores estáticos e dinâmicos

Embora todos os medidores acústicos se façam valer do efeito Doppler como princípio de funcionamento, esses possuem subdivisões que os categorizam. Gamaro (2012) sugere que os equipamentos acústicos sejam divididos quanto a:

- A) Instalação: estáticos ou dinâmicos;
- B) Frequência: para rios vão de 150kHz até 5,0MHz;
- C) Tipos de medição: estáticos, dinâmicos, pontuais;
- D) Orientação: Vertical, horizontal ou inclinado.

ADCP's do tipo dinâmico (Figura 20), quanto a instalação e tipo de medição, se refere a equipamentos que podem ser instalados e utilizados em barcos, catamarãs, caiaques, de forma manual, e mais recentemente de forma automatizada, fazendo-se uso de embarcações com controle remoto e rotas pré-configuradas. São capazes de realizar medidas de vazão, incluindo velocidade e batimetria. São os equipamentos mais comuns no Brasil devido a versatilidade desses, capazes de operar de águas rasas a profundas. Uma característica desses equipamentos é possuir diferentes frequências, sendo na maioria dos casos, uma reservada para velocidades em águas rasa, uma reservada para velocidades em águas mais profundas, e uma terceira reservada para a batimetria do leito.

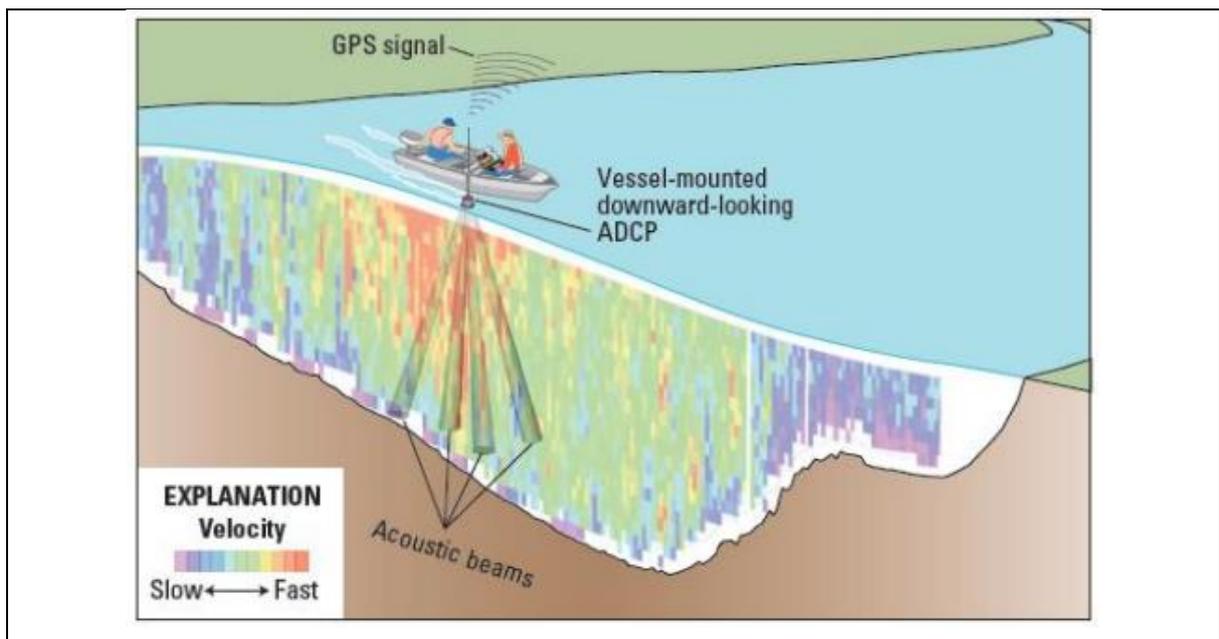


Figura 20 – Ilustração de uma medição de vazão com barco em movimento utilizando ADCP's.  
Fonte: GOTVALD E OBERG, 2008.

ADCP's do tipo estático (Figura 21), quanto a instalação e tipo de medição, refere-se a equipamentos instalados em margens, boias, no leito de canais, rios ou baías. Esses são capazes de medir o perfil na qual estão instalados, medindo a velocidade em um plano, apenas em um ponto, ou perfilando a seção inteira, conforme características e número de transdutores.

Na maioria dos casos, utilizam apenas de uma frequência, possuem sensores de nível (para quando instalados no leito ou no sentido horizontal, permitindo obtenção de cota através desses), e são capazes de discretizar a seção ou perfil em células de tamanho fixo.

Semelhantes aos ADCP's dinâmicos, os estáticos possuem também uma zona *blanking distance*<sup>3</sup>. Isso ocorre pois o equipamento funciona como emissor e receptor, necessitando de um período entre emitir um sinal e estar apto a receber. Simpson (2001), explica esse que a membrana responsável por emitir o pulso recebe um estímulo eletromagnético que a faz vibrar, gerando o pulso sonoro, o tempo necessário para o emissor estar apto a receber é o tempo da membrana parar de vibrar. Se convertido esse "tempo" em "distância", utilizando a velocidade de deslocamento da onda emitida, tempo o *blanking distance*. Vale lembrar que esse valor de *blanking distance* pode ser configurado pelo usuário, a partir de um valor mínimo.

Medidores do tipo estático ainda são pouco comuns no Brasil, embora nos Estados Unidos, esses sejam utilizados em larga escala (GAMARO, 2012), sendo inclusive utilizados para substituição de alguns linígrafos (equipamentos para medição de nível d'água). ADCP's estáticos são também utilizados nas melhorias e adequações de curvas chave, pois após instalados, esses coletam de forma contínua dados de nível e velocidade, conforme intervalo configurado, permitindo a fácil constituição de uma série de vazões com pequeno intervalo entre amostragens. Ainda segundo o autor, equipamentos desse tipo são comumente encontrados entre as frequências 150kHz e 5,0MHz, sendo os mais comuns 300, 600, 1.000, 1.200, 1.500 e 3.000kHz de frequência.

---

<sup>3</sup> Distância próxima ao ADCP em que o equipamento não realiza leitura, gerando uma "zona branca".

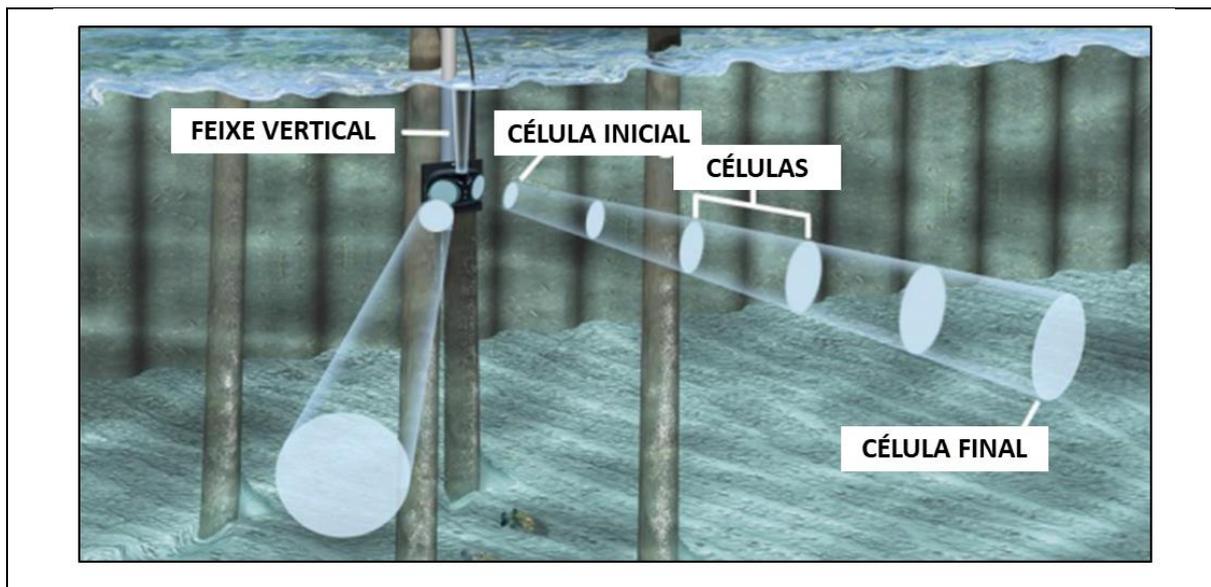


Figura 21 – ADCP do tipo estático instalado de forma que profile a horizontal e colete valores de nível. Possui discretização por tamanho de células fixas (cells).  
Fonte: Modificado de SONTEK, 2014a.

### 2.3.3 Estimativa da CSS

Diante das já citadas dificuldades existentes nas atividades de amostragem de sedimentos, profissionais e pesquisadores da área de hidrossedimentologia buscam formas de estimar a quantidade de sedimentos presentes em cursos d'água de forma mais segura, com igual confiabilidade ou superior, menos dispendiosas de tempo e recursos, e com possibilidade de monitoramento contínuo.

Com isso, surge a necessidade de identificar variáveis hidráulicas, de fácil obtenção, que possam inferir sobre a carga sólida presente.

Conforme visto, os ADCP's são equipamentos amplamente difundidos nos campos da hidrometria e hidrologia, para a medida de velocidades e vazões de cursos d'água. Segundo Gamaro (2014), ADCP's têm sido utilizados para estimativa de sedimentos, desde que os mesmos passaram a ser utilizados para medições de vazões. Porém, ainda segundo o autor, apenas a partir da década de 90 que resultados com dados de campo passaram a ser desenvolvidos, sendo que Deines (1999), foi o responsável por um dos maiores avanços na área quando propôs a equação do sonar modificada para a estimativa de sedimentos em suspensão, deixando claro as potencialidade de utilização desses equipamentos para esse fim.

Conforme mencionado no item 2.3.1 (Princípio de funcionamento), os ADCP's emitem sons na coluna d'água, onde esses por sua vez, se chocam com as partículas presentes, material orgânico, e bolhas de ar. Como consequência desse choque, o pulso acústico emitido perde energia ao longo de seu percurso, até que esse sinal se torne mais fraco que o ruído. Essa perda de energia é representada pelo *backscatter* (quantidade de retorno do eco), e possui diferentes causas, como o espalhamento e/ou absorção do sinal pelas partículas presentes, e absorção do sinal pelo meio aquoso. O primeiro fator tem ligação direta com a quantidade e diâmetro das partículas presentes na água, já o segundo é consequência direta de variáveis como a temperatura e salinidade da água.

Com isso, o pulso original emitido pelo equipamento sofre perdas inerentes em seu percurso pela presença de material, portanto, a energia necessária para amplificar o pulso para sua frequência original é a medida de perda do sinal, bem como, inversamente proporcional ao *backscatter*. Dessa forma, cientistas e profissionais da área de sedimentos estudam a utilização dessa variável na estimativa da concentração de sedimentos presentes na água.

Porém, para que as estimativas sejam realizadas de forma correta, é necessário levar em consideração todas as perdas que o sinal emitido e recebido pelo ADCP sofre, como as perdas causadas pelo sedimento, e as perdas causadas pela água.

De forma geral, a equação utilizada para correção do pulso é derivada da equação do sonar simplificada (Equação 2) proposta por Urick (1975).

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

Em que:

RL = nível de reverberação (eco)

SL = nível da fonte

2TL = perda de transmissão nos dois sentidos

TS = força do eco no local analisado (célula)

Todos medidos em unidades logarítmicas de decibel (dB)

Para discretização dos termos que causam (meio aquoso e presença de sedimentos) as perdas inerentes ao processo, a equação acima pode ser convertida na Equação 3, para definição do backscatter corrigido (SCB - quantidade de retorno do eco corrido para perdas) em dB.

$$SCB = MB + 20\text{Log}_{10}(\psi r) + 2r\alpha_w + 2r\alpha_s \quad (3)$$

The diagram illustrates the equation  $SCB = MB + 20\text{Log}_{10}(\psi r) + 2r\alpha_w + 2r\alpha_s$  with four terms labeled I, II, III, and IV. Term I is MB. Term II is  $20\text{Log}_{10}(\psi r)$ . Term III is  $2r\alpha_w$ . Term IV is  $2r\alpha_s$ . A bracket groups terms II, III, and IV, with a label WCB pointing to it.

Em que:

I – backscatter medido pelo equipamento (dB)

II – correção para a dispersão do pulso (m)

III – correção para atenuação causada pelas propriedades da água (dB/m)

IV – correção para atenuação causada pelas propriedades dos sedimentos (dB/m)

$r$  = distância inclinada do transdutor à célula a ser medida (m)

$\psi$  = correção para o campo próximo

MB = backscatter medido pelo equipamento (dB)

WCB = backscatter corrigido para atenuações causadas pela água e pela dispersão do pulso

SCB = backscatter normalizado/corrigido (dB)

$\alpha_w$  = coeficiente de absorção da água (dB/m)

$\alpha_s$  = coeficiente de absorção do sedimento (dB/m)

A correção em função da dispersão do pulso (trecho 2 da Equação 3) é necessária devido ao comportamento físico da onda emitida, sendo que essa aumenta seu diâmetro em função da distância percorrida a partir da fonte, possuindo atenuação apenas pelo fato de deslocar-se.

A adição da distância inclinada do transdutor até a célula medida ( $r$  – presente nos trechos 2, 3, e 4), nada mais é do que considerar todas as perdas ao longo do

incremento da distância horizontal, assim como, a multiplicação pela constante dois, faz com que as perdas sejam consideradas nos dois sentidos a partir do emissor, ida e volta do pulso.

A correção para o campo próximo ( $\psi$ ) é necessária pois a dispersão do pulso acústico próximo da fonte emissora, tem como característica ser não esférico. Para que não seja necessária essa correção, basta que o operador configure o ADCP para que opere com um *blanking distance* (distância necessária para que o transdutor emissor/receptor pare de vibrar e possa receber pulsos) superior ao campo próximo (Figura 22).

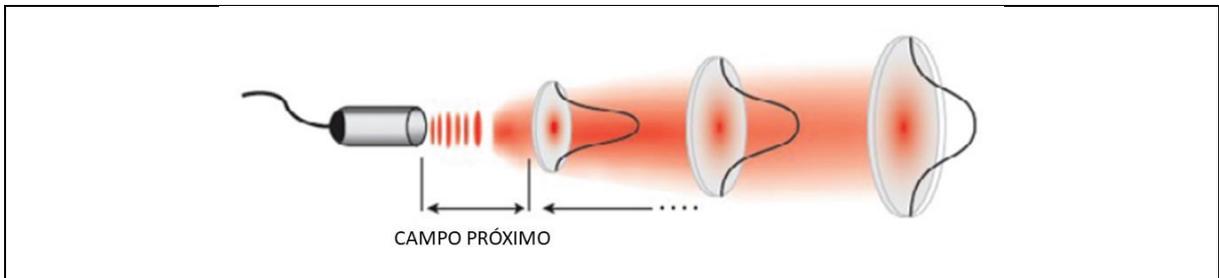


Figura 22 – Dispersão de forma esférica da energia acústica na água no campo próximo e além desse, a partir de um emissor.  
Fonte: Modificado de LANDERS *et al.* (2016).

Para a determinação das correções para o campo próximo, utiliza-se a Equação 4 descrita a seguir.

$$\psi = 1 + \frac{1}{\frac{1,35r}{r_n} + \frac{2,5r}{r_n^{3,2}}} \quad (4)$$

Em que:

$r_n$ = raio crítico

$$r_n = \frac{A}{c/f} \quad (5)$$

Em que:

$A$  = área efetiva do transdutor ( $m^2$ )

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

$f$  = frequência acústica (Hz)

(6)

$$c = 1,402385 \times 10^3 + 5,038813 T - 5,799136 \times 10^{-6} T^2 + 3,287156 \times 10^{-4} T^3 - 1,398845 \times 10^{-6} T^4 + 2,787860 \times 10^{-9} T^5$$

Em que:

T = temperatura (°C)

Se:

$r > r_n$ , então  $\psi = 1$ , e não é necessário correção para o campo próximo.

Para águas doces (rios, lagos e canais), considerar as Equações 7, 8, e 9 para determinação das perdas por atenuação causadas pela água ( $\alpha_w$  – trecho 3 da equação 3).

$$\alpha_w = 8,69 \frac{B_w f^2}{f_T} \quad (7)$$

$$f_T = 21,9 \times 10^{[6-1520/(T+273)]} \quad (8)$$

$$B_w = 3,38 \times 10^{-6} \quad (9)$$

Em que:

$f_T$  = frequência de relaxamento

$B_w$  = constante de mecanismo de viscosidade da água pura

f = frequência da fonte (kHz)

T = Temperatura (°C)

Para que seja feita a correção do coeficiente de absorção do sedimento ( $\alpha_s$  – trecho 4 da equação 3), de acordo com Wood e Teasdale (2013), Straub *et al.* (2018), essa pode ser realizada a partir da Equação 10, considerando que o *backscatter* normalizado (SCB) seja constante para todo o feixe vertical.

$$\alpha_s = \frac{1}{2} \times \frac{d}{dr} (WCB) \quad (10)$$

Em que:

$\alpha_s$  = coeficiente de absorção do sedimento

$\frac{d}{dr}(WCB)$  = derivada do backscatter corrigido para atenuações causadas pela água e pela dispersão do pulso (WCB)

Podendo ser reescrita de forma simplificada, conforme Equação 11.

$$\alpha_s = -0,5 \times (\text{Coeficiente angular da reta WCB}) \quad (11)$$

Em que:

Coeficiente angular da reta representada pelo *backscatter* corrigido para atenuações causadas pela água e pela dispersão do pulso (WCB)

Utilizando as Equações 3 a 11 é possível efetuar a correção do *backscatter* para as atenuações causadas pela água e pelo sedimento. Vale salientar que as correções para atenuações causadas pela água, em rios, são influenciadas pela temperatura da água para uma dada frequência. Já as atenuações causadas pelas partículas são controladas pelas propriedades dos sedimentos para uma dada frequência.

A atenuação do pulso emitido, ou seja, a perda de energia, ocorre ao longo do trajeto percorrido, influenciado pelas variáveis já citadas, como a dispersão do pulso, atenuações causadas pelos sedimentos, e pela água. Na Figura 23, é possível visualizar a influência que essas variáveis causam na atenuação da onda ao longo do trajeto, bem como é possível ver a resposta da onda após as correções. A curva azul representa o *backscatter* medido pelo equipamento. A curva vermelha representa o *backscatter* medido, porém, corrigido para as dispersões da onda acústica, e atenuação causada pela água. A curva verde representa o *backscatter* medido, porém, corrigido para atenuações causadas pela onda acústica, pela água, e pelo sedimento.

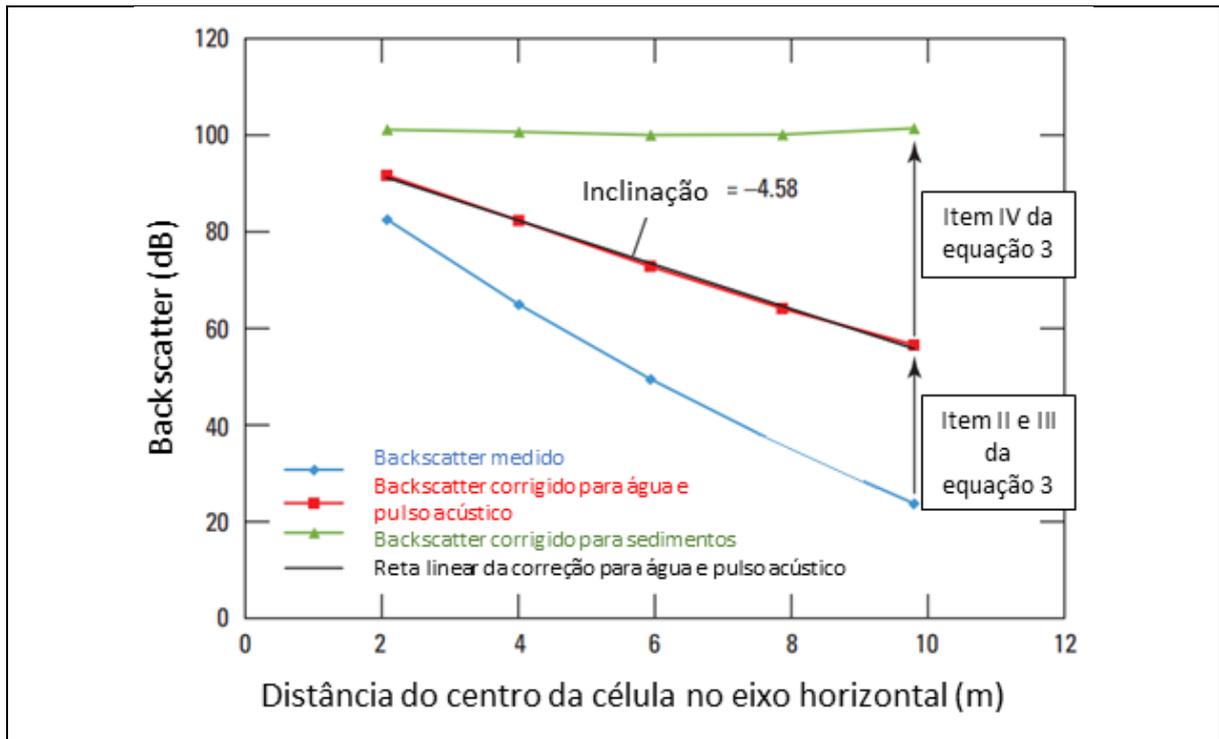


Figura 23 – Atenuação da onda influenciada pela água, sedimento, e dispersão da própria onda.  
 Fonte: Modificado de LANDER *et al.* (2016).

### **3 Material e Métodos**

Neste tópico será apresentado o local na qual este estudo foi conduzido, bem como uma breve contextualização da região e sua importância. Também estão descritos os principais equipamentos utilizados, com suas características e princípios de funcionamento. Por fim, estão descritos os passos realizados para a obtenção dos resultados deste trabalho.

#### **3.1 Local de estudo**

O estudo foi conduzido na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (Figura 24), com característica de bacia transfronteiriça, englobando Brasil e Uruguai, localizada na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 31°30' e 34°35' de latitude sul, e entre as coordenadas 52°10' e 55° 15' de longitude Oeste. Possuidora de uma área total de cerca de 62.000Km<sup>2</sup>, sendo que desses, 47%, ou seja, cerca de 29.000Km<sup>2</sup> encontra-se localizado no território brasileiro, os outros 53%, ou sejam, cerca de 33.000Km<sup>2</sup> estão localizados em território uruguaio. A relação entre os dois países para o uso compartilhado das águas da bacia é regida pelo Tratado de Limites, assinado em 1909, e pelo Tratado da Lagoa Mirim, assinado em 1977.

De acordo com Peel *et al.* (2007), a região da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo é classificado como temperado úmido com verões quentes, que segundo a classificação de Köppen é classificado como do tipo "Cfa".

A normais climatológicas de 1971-2000 obtidas pela estação agrometeorológica situada no município de Capão do Leão-RS (dentro da área da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo), apresentam médias anuais de temperatura, precipitação, e umidade relativa do ar, de 17,8°C, 1.366,9mm, 80,7%, respectivamente.

A bacia Mirim-São Gonçalo engloba as regiões geomorfológicas da Planície Costeira e Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense, escudo esse formado por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Para Tomazelli e Villwock (2003), essas regiões se diferem pela maneira com que se formaram, sendo que a região da planície é originária de um processo de sucessivos eventos de avanço e regressão

do oceano, resultando em quatro sistemas deposicionais do tipo Laguna/Barreira. Ainda segundo o autor, a região do escudo possui sua formação gerida pelos processos de intemperismo, restando paisagens como morros e colinas (formas residuais).

De acordo com Dellazoppa (2010), a bacia Mirim-São Gonçalo funciona como um enorme reservatório, capaz de amortecer a chegada de seus contribuintes, retardando o escoamento em direção ao Canal São Gonçalo. Trata-se também, de uma região com grande importância ambiental, em vista que abriga uma vasta fauna e flora, e é tida como região de pouso de aves migratórias em direção ao norte.

O Canal São Gonçalo possui extrema importância para a região que se insere, pois é utilizado para recreação, lazer, abastecimento, pesca de subsistência, além de ser uma importante via de transporte fluvial (MEDRONHA *et al.*, 2013; SOUZA, 2015). Também característico do local, possui frequente e considerável número de embarcações (caíques de pesca, iates e lanchas) transitando em suas águas límnicas e pré-límnicas, inseridas na Laguna dos Patos e Lagoa Mirim (CAPITOLI, BENVENUTI e GIANUCA, 1977).

O canal atua como único elo de ligação entre a Lagoa Mirim e a Laguna dos Patos, sendo responsável por escoar a totalidade do deflúvio advindo da bacia. Esse canal funciona como um balizador do nível de ambas as lagoas, possuindo fluxo predominante (70% do tempo), no sentido Mirim-Patos (MEDRONHA *et al.*, 2013). Entretanto, como já mencionado por Lima (2016), e Noschang (2018), o canal possui suas características hidráulicas influenciadas pelo vento, e pluviosidade que ocorrem na bacia, podendo isso causar condições de fluxo bidirecional (sentido contrário ao predominante).

De acordo com Burns (2010, *Apud* CLM, 1970), o Canal São Gonçalo possui vazões médias anuais de  $700\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , e velocidade média de  $0.6\text{m}.\text{s}^{-1}$ , podendo chegar a vazões de  $3.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  em períodos de cheia. O autor ainda classifica o canal como natural, sinuoso, possuindo larguras que variam de 200 a 300m, e profundidade média de 10m. De acordo com Bonczynski (2018), o canal possui em sua extensão da ordem de 76km e declividade média de 0,004%, caracterizado por baixa declividade.

Também inserida no Canal São Gonçalo está a Barragem Eclusa do Canal São Gonçalo, a qual opera desde 1977. Sob gerencia da Agência de

Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (ALM), esta obra se localiza a cerca de 15km da foz do canal na Laguna dos Patos, e 5km da seção 1 de monitoramento deste trabalho, próxima ao Porto de Pelotas, RS. A obra possui objetivo de impedir a intrusão salina no sul da bacia, fato que pode ocorrer em épocas de estiagem, ou em épocas com vento de direção Nordeste.

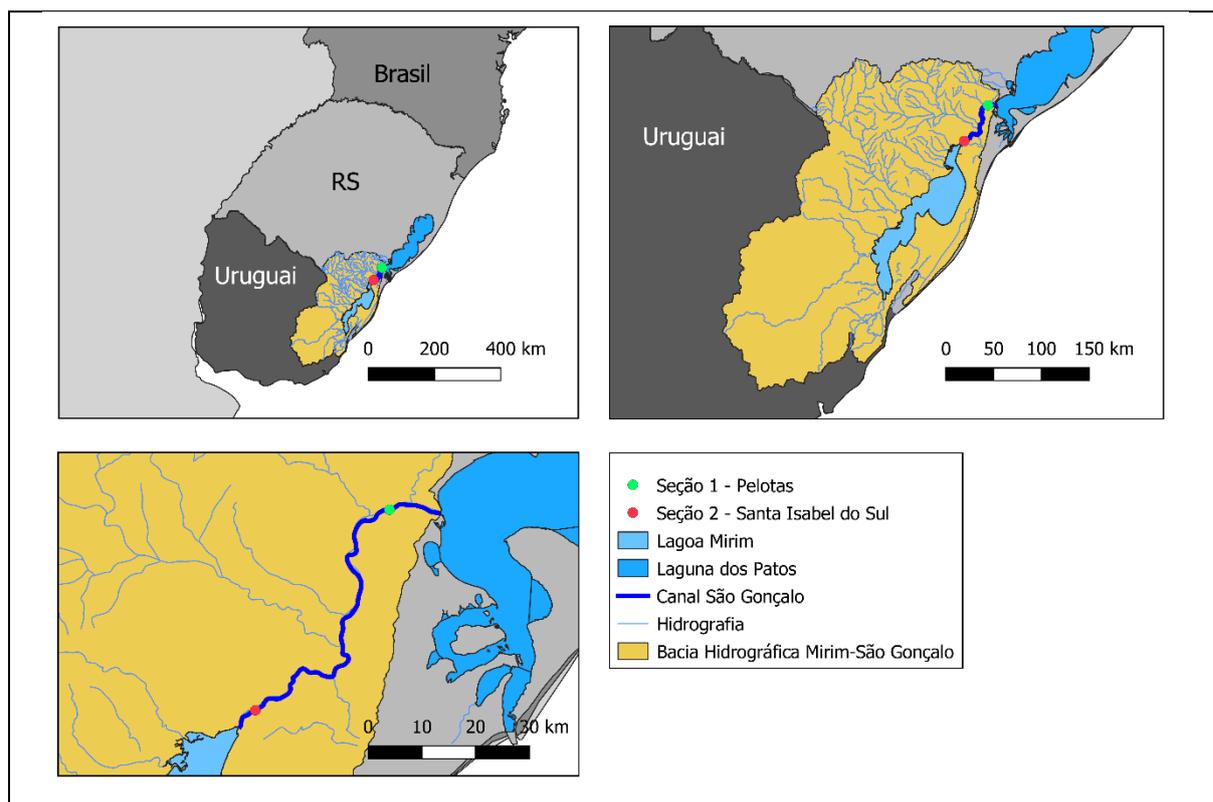


Figura 24 – Mapas da região na qual se insere a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo, o Canal São Gonçalo, e as seções de monitoramento utilizadas neste trabalho.  
Fonte: Próprio autor.

### 3.2 Seções monitoradas

Foram objetos de estudo, duas seções no Canal São Gonçalo (Figura 25). A primeira seção localizada em Pelotas, entre as coordenadas UTM Norte 6482925,60 e Leste 374730,28 na margem esquerda, e Norte 6482695,57 e Leste 374752,81 na margem direita, possuindo largura média de 230 metros. A segunda seção localizada na localidade de Santa Isabel do Sul, município de Arroio Grande, RS, disposta entre as coordenadas UTM Norte 6445306,32 e Leste 349704,71 na margem esquerda, e Norte 6445117,21 e Leste 349769,61 na margem direita,

possuindo largura média de 175 metros. Essas seções estão distantes de 70km entre si.

A Seção 1, localizada em Pelotas (Figura 25a) fica às margens do Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas. Essa seção foi escolhida em função da facilidade de acesso ao local, proximidade com o Porto de Pelotas e de dispor de monitoramento permanente através de um ADCP do tipo estático, modelo SL-500 da marca *Sontek*, desde outubro de 2015, além de estar próximo da foz do canal (cerca de 10 km à montante).

A Seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul (Figura 25b), fica às margens de um posto de monitoramento do Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Hidrometria e Sedimentologia para o Manejo de Bacias Hidrográficas – NEPE HIDROSEDI e da Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (ALM). Nesse local existe o monitoramento de diversas variáveis climáticas e hidrológicas, como precipitação, umidade do ar, velocidade e direção do vento, nível d'água. A escolha dessa seção foi em função da facilidade de acesso ao local, existir monitoramento constante através de um ADCP do tipo estático SL-500 *Sontek*, e estar próximo da foz da Lagoa Mirim (cerca de 5 km à jusante).

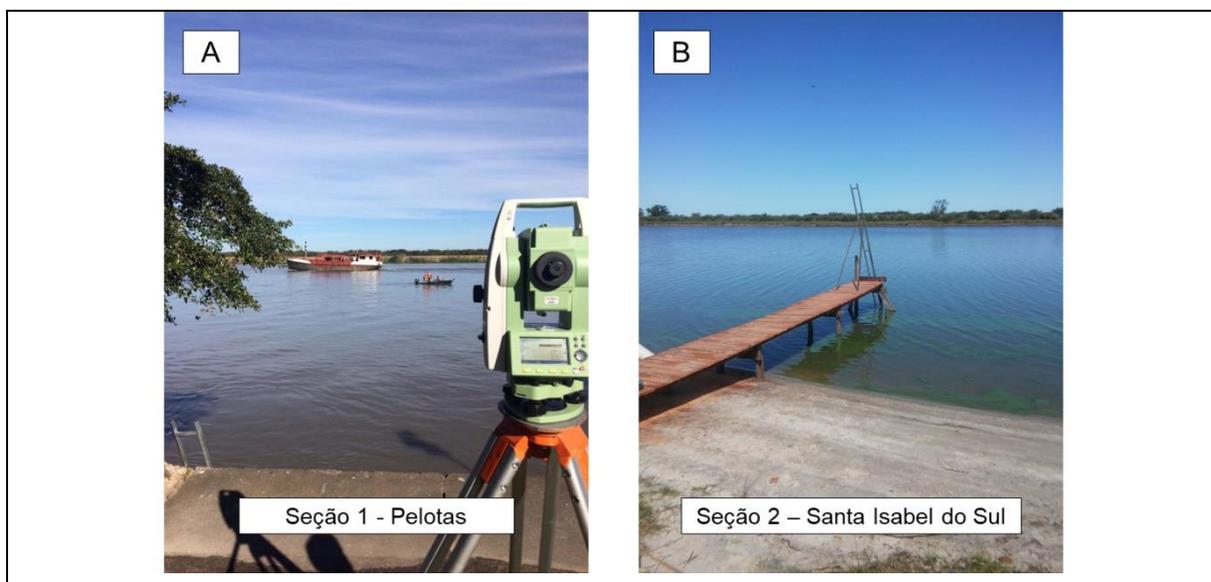


Figura 25 – a) Seção 1 (Pelotas, Campus Anglo – UFPel), e b) Seção 2 (Santa Isabel do Sul).  
Fonte: Próprio autor.

Durante as atividades de campo conduzidas ao longo deste trabalho, nas duas seções monitoradas, foram efetuadas 21 medições de vazão e amostragens de

sedimentos em suspensão. Na seção 1, as campanhas foram conduzidas durante o período de 13/03/2019 até 20/11/2019, períodos de vazões médias e altas vazões, sendo a mínima observada de  $220,5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e máxima de  $2.075,3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na seção 2, as campanhas foram conduzidas durante o período de 26/06/2019 até 06/11/2019, sendo esse o período de vazante do canal, sendo observadas vazão mínima de  $722,5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e vazão máxima de  $1.361,7\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , essa registrada em 11 de novembro de 2019 (Figura 26b).

Durante as campanhas de monitoramento ocorreu considerável variação de nível e vazão, sendo a segunda uma variável hidráulica fortemente relacionada com a carga de sedimentos transportada.



Figura 26 – Seção 2 localizada em Santa Isabel do Sul a) com vazões médias e b) com vazões máximas. Em destaque aparece o Data Logger e painel solar do LS-500 lá instalados (06/11/2019)  
Fonte: Próprio autor.

Ambas as seções monitoradas contam com um ADCP do tipo estático, modelo SL-500 da marca *Sontek*. O ADCP possui dois transdutores horizontais de 500 kHz cada angulados  $25^\circ$  entre si, um transdutor vertical, um sensor de pressão, e um sensor de temperatura (Figura 27). Os transdutores presentes no equipamento funcionam como emissores e receptores, sendo que, após emitirem o sinal, passam a receber o retorno do pulso.

Esse equipamento não é capaz de “perfilar” a seção em sua totalidade, com alcance máximo de 120 metros. As seções monitoradas possuem largura próxima a 230 metros (seção 1), e 175 metros (seção 2). Portanto, o ADCP em ambos os casos, efetua uma extrapolação do perfil para que seja capaz de cobrir a seção por inteiro.

Mais detalhes sobre o ADCP SL-500 (*Side-Looker 500*) podem ser obtidos através do endereço eletrônico: <https://www.sontek.com/sontek-sl-series>.

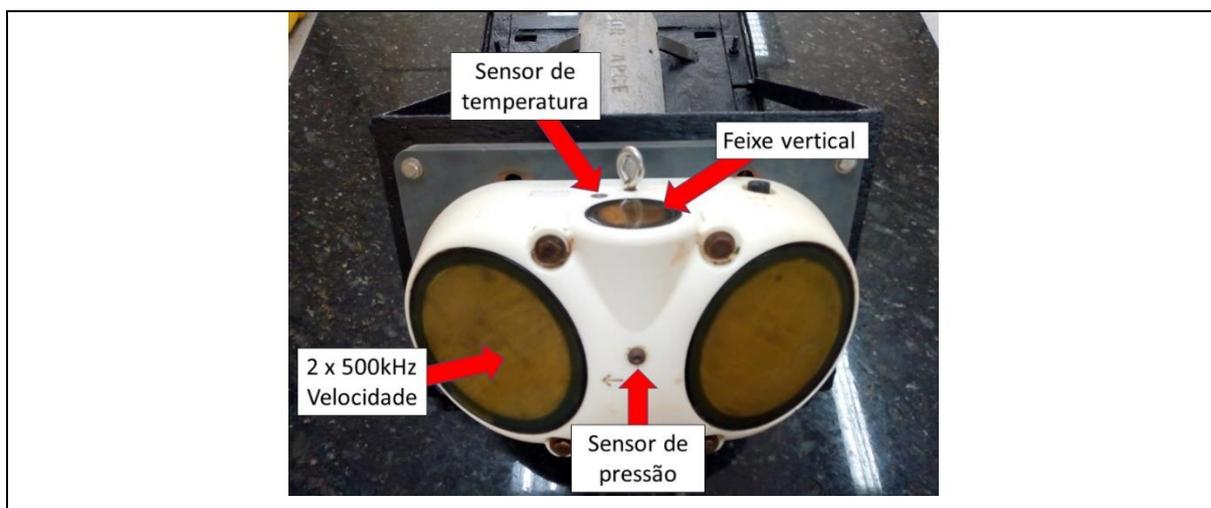


Figura 27 – ADCP do tipo estático, modelo SL-500 da marca Sontek.  
Fonte: Próprio autor.

As características de instalação e configuração são diferentes para cada seção, estando descritas na Tabela 1, assim como, a representação gráfica, apresentada de forma esquemática na Figura 28.

Tabela 1 – Características de instalação dos ADCP's estáticos.

Característica	Seção 1 - Pelotas	Seção 2 – Santa Isabel do Sul
Distância inicial não amostrada ( <i>blanking distance</i> ) [m]	10	4
Tamanho de célula [m]	10	10
Período de amostragem [s]	300	300
Intervalo amostrado [s]	900	900
Início da célula [m]	2	2
Fim da célula [m]	120	100
Número de células	10	10

As diferenças de instalação e configuração se dão em função das características morfométricas de cada seção (profundidade, velocidade, e principalmente largura da seção), sendo que para configuração dos equipamentos se observou as indicações propostas por Levesque e Oberg (2012). Vale ressaltar que os valores de *blanking distance*, em ambas as seções, superam os valores de raio crítico (descrito no item 2.3.3), não necessitando posteriores correções para o campo próximo.

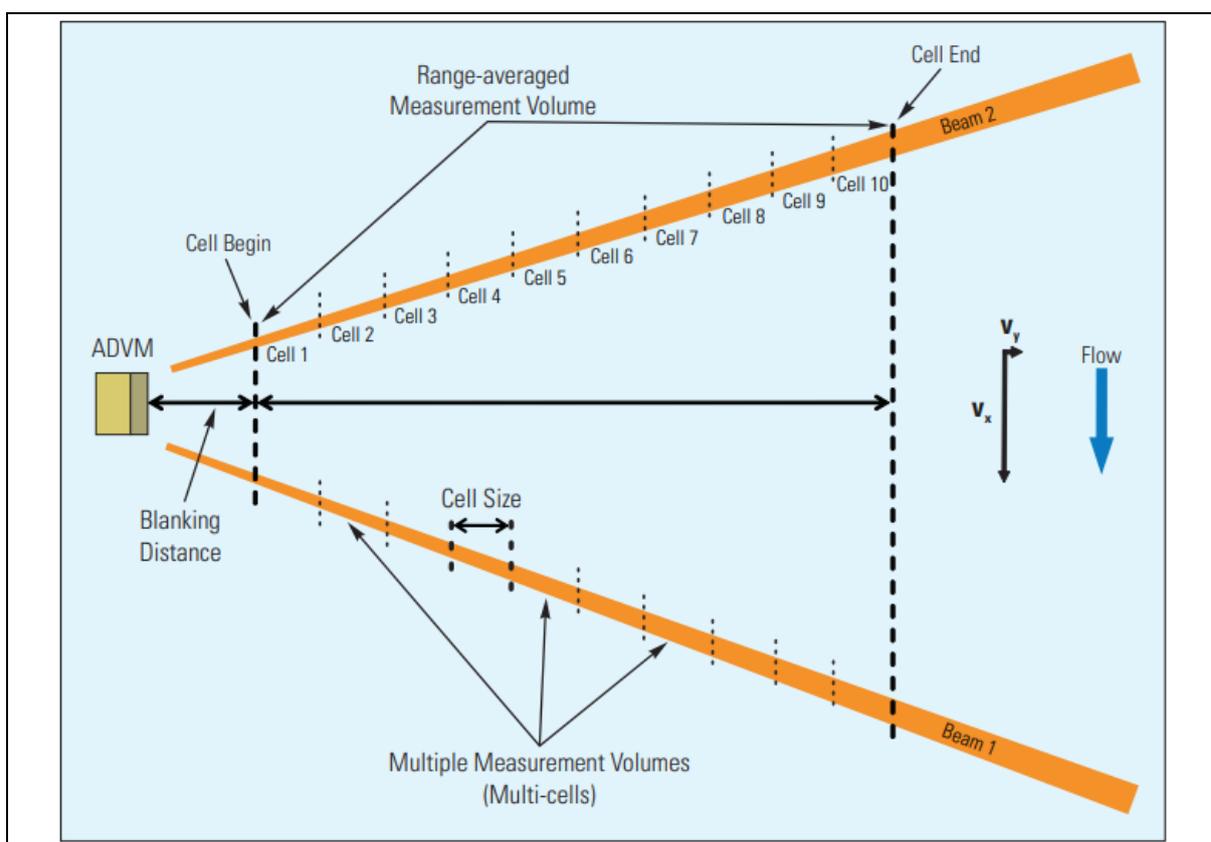


Figura 28 -Esquema ilustrativo apresentando as principais características configuráveis de um ADCP estático.  
Fonte: LEVESQUE e OBERG, 2012.

Os ADCPs estáticos utilizados realizam, de forma contínua, o monitoramento de variáveis como nível d'água, temperatura, vazão, velocidade no eixo x (perpendicular à seção transversal), velocidade no eixo Y (paralelo à seção transversal), SNR (Signal to Noise Ratio – Relação sinal-ruído), e amplitude (energia necessária para ampliar o sinal de retorno, valor inversamente proporcional ao backscatter). A não ser pelos parâmetros nível d'água e temperatura, todos os demais são medidos nos dois feixes para cada uma das 10 células, de forma

independente, com intervalo de 900 segundos entre amostragens. Para este trabalho, serão utilizados os valores de backscatter para construção dos modelos e posterior estimativa da CSS.

Durante o período deste estudo, foi realizado periodicamente o *download* dos dados armazenados nos ADCPs estáticos, a fim de se construir as relações entre as variáveis monitoradas e a carga sólida em suspensão observada na seção.

### 3.2.1 Medição de vazão

Conforme já descrito por Santos (2003) e Carvalho (2008a), toda amostragem de sedimentos em suspensão deve ser precedida de uma medida de vazão na seção transversal de interesse. Seguindo essa indicação, a priori de cada uma das amostragens de sedimentos, em ambas as seções, realizou-se uma medida de vazão.

Para tanto foi empregado um ADCP do tipo dinâmico *RiverSurveyor*<sup>®</sup> M9, *Sontek*. Esse equipamento é dotado de nove transdutores para aplicação em medições de vazão e de correntes em cursos d'água rasos e profundos, e pode ser classificado como ADCP do tipo dinâmico.

Dentre os transdutores presentes nesse ADCP, quatro possuem 3MHz de frequência, outros quatro possuem 1MHz de frequência. A combinação dos oito transdutores permite perfilar a seção, medindo as velocidades em diferentes direções. O nono transdutor possui 0,5MHz de frequência, sendo esse responsável pela batimetria da seção (profundidade no eixo vertical). Ainda existe um sensor de temperatura acoplado ao corpo do ADCP, utilizado para a correção da velocidade do som transmitido na água.

Mais detalhes sobre o ADCP dinâmico *RiverSurveyor*<sup>®</sup> M9 podem ser obtidos através do endereço eletrônico: <https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>.

Esse equipamento é capaz de realizar medidas de vazão, velocidade, e estimativa das profundidades da seção de forma rápida, e com alta resolução (Figura 29).

Todas as condutas para medição, configuração do equipamento, e avaliação das medidas foram realizadas conforme descritas por Mueller et al. (2013). Duas formas de operação do ADCP M9 foram utilizadas (Figura 30), instalado em uma

superfície flutuante, estando essa presa à embarcação e, a comunicação realizada através de cabos, ou, fixo em uma estrutura metálica junto da embarcação e a comunicação realizada através de sinal de rádio a partir da margem.

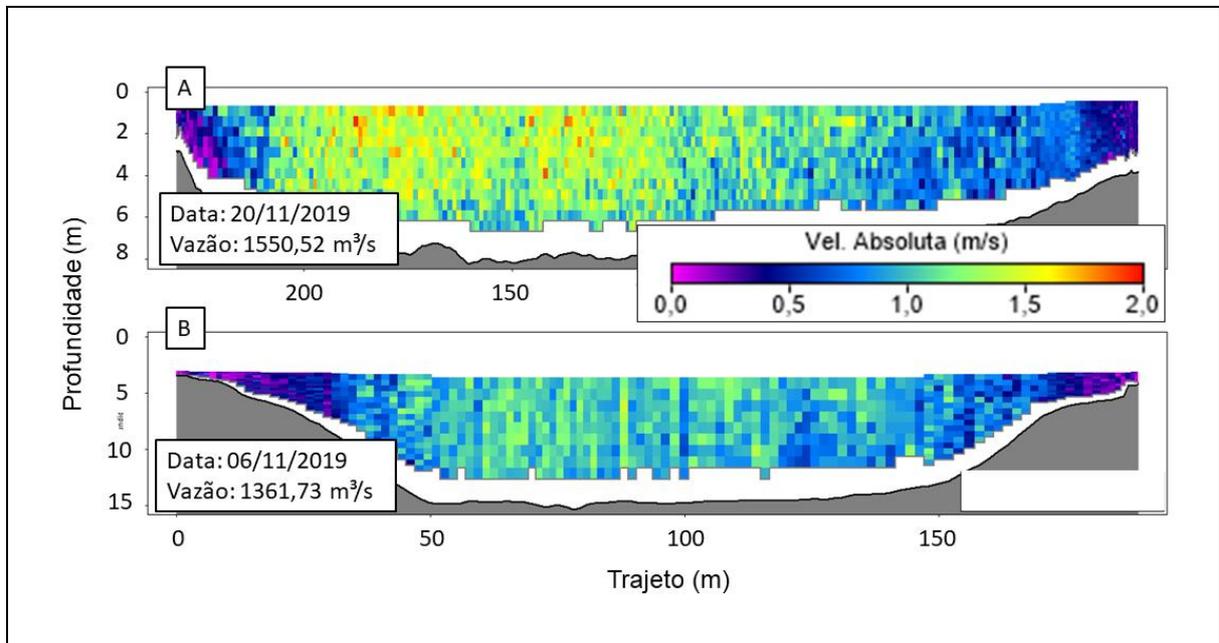


Figura 29 – Exemplo de medição utilizando o ADCP dinâmico M9 na a) Seção 1, e b) seção 2.  
Fonte: Próprio autor.

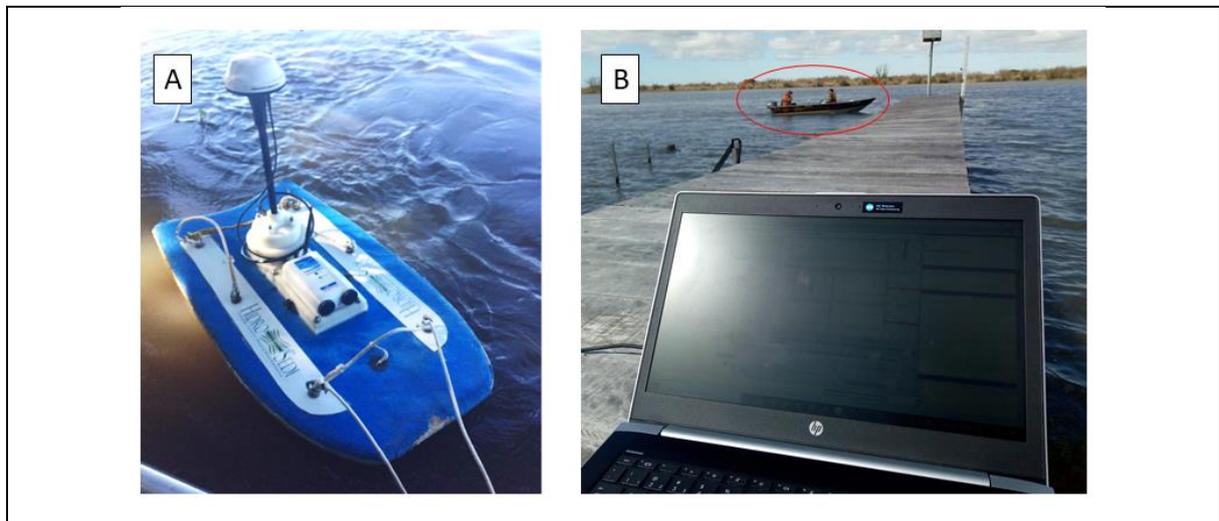


Figura 30 – Formas de utilização do ADCP dinâmico RiverSurveyor M9 a) superfície flutuante com comunicação por cabos, b) estrutura fixa e operado por rádio.  
Fonte: Próprio autor.

As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo das medições, data e local de cada uma das medidas de vazões realizadas.

Tabela 2 – Medidas de vazão realizadas na seção 1 – Pelotas.

Data	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Velocidade Média (m.s <sup>-1</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )
13/03/2019	807,24	0,54	1502,08
11/04/2019	540,19	0,33	1643,55
11/06/2019	220,50	0,15	1498,10
24/06/2019	661,02	0,42	1558,52
25/07/2019	591,96	0,42	1410,14
31/07/2019	995,83	0,70	1417,85
21/08/2019	1156,03	0,82	1414,72
27/08/2019	1104,45	0,81	1368,09
17/09/2019	1501,60	1,05	1431,51
08/10/2019	1377,57	0,99	1395,79
14/10/2019	1334,26	0,93	1432,78
05/11/2019	2075,28	1,35	1534,82
20/11/2019	1550,52	0,99	1559,96

Tabela 3 – Medidas de vazão realizadas na seção 2 – Santa Isabel do Sul.

Data	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Velocidade Média (m.s <sup>-1</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )
26/06/2019	797,34	0,64	1240,30
03/07/2019	1073,71	0,80	1338,10
09/07/2019	722,46	0,57	1271,50
02/08/2019	894,67	0,66	1362,90
03/09/2019	1058,24	0,76	1399,40
10/09/2019	875,56	0,63	1389,00
16/10/2019	1107,98	0,74	1504,40
06/11/2019	1361,73	0,84	1630,63

Durante as campanhas, realizou-se também o *Teste de Fundo Móvel*, atividade que visa identificar a existência, ou não, de fundo móvel na seção de medição de vazão com o ADCP do tipo dinâmico. A existência de fundo móvel em uma seção pode influenciar na medição de vazão, ocorrendo erros grosseiros e consideráveis, quando não são realizadas as devidas correções. Durante os testes realizados não foi identificado presença de fundo móvel nas seções 1 e 2, conforme já apontado por Lima (2016), e Noschang (2018).

### 3.2.2 Amostragem de sedimentos

Durante o monitoramento, dentre as 21 campanhas realizadas, 13 amostragens foram realizadas na seção 1- Pelotas, e 8 amostragens na seção 2 -

Santa Isabel do Sul. Para a amostragem de sedimentos em suspensão foi escolhido o método de Igual Incremento de Descarga - IID, com 6 verticais amostradas, sendo que foram coletadas 2 amostras por vertical para melhor representatividade. O amostrador empregado variou conforme velocidade do fluxo, para velocidades mais baixas foi utilizado o DH-59 e para velocidades mais elevadas foi utilizado o D-49. Em todos os casos optou-se por utilizar o bico 1/8" para as amostragens, bem como, a garrafa coletora foi a mesma para ambos os amostradores (1 pint = 470 ml).

Por limitação dos amostradores, para todas as verticais amostrou-se em profundidade máxima de 4,6 metros através do método de integração da vertical. Portanto, amostrou-se da superfície até a profundidade de 4,6m, de forma constante na descida e na subida, para que se constituísse uma amostra coletada.

Para cálculo do tempo de amostragem e das distâncias para cada uma das seis verticais, foi utilizado o software HidroSedimentos<sup>®</sup>. Mais detalhes sobre o software HidroSedimentos<sup>®</sup> podem ser obtidas em Back *et al.* (2011), ou através do endereço eletrônico:[http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo\\_sophia=61692](http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo_sophia=61692).

Para realizar o correto balizamento do barco (alinhamento da seção e distâncias da margem) durante as amostragens de sedimento foi utilizada uma estação total (Figura 31).

Todas as amostras coletadas (duas amostras por vertical) foram individualmente armazenadas em frascos de vidro, com capacidade para 500ml cada, e conduzidos para o laboratório do NEPE HidroSedi, no Campus Anglo – UFPel, para os procedimentos laboratoriais necessários para a determinação da CSS.

Para realização de todo o processo em campo, seguindo metodologias propostas, são necessárias cerca de quatro horas, a depender das condições climáticas, condições do curso d'água e experiência dos operadores.



Figura 31 – Balizamento da embarcação durante processo de amostragem de sedimentos (Local: Seção 1).

Fonte: Próprio autor.

### 3.2.3 Determinação da CSS em laboratório

As amostras coletadas em campo (mistura água-sedimento) foram levadas ao laboratório NEPE HidroSedi–UFPel, onde foram tratadas e analisadas para a determinação da CSS, conforme DNAEE (1970).

Inicialmente, os frascos contendo as amostras ficaram em repouso por período mínimo de 24 horas. Após esse período, os recipientes que armazenavam as amostras foram pesados para obtenção do valor de massa bruta (peso do volume da mistura água-sedimento). Após processo de filtragem (Figura 32), os frascos foram pesados novamente para se obter os valores de massa tara (peso do recipiente sem presença da amostra).

Efetuuou-se processo semelhante com as membranas filtrantes (descritas no item 2.2.3) (Figura 33), às quais foram secas em estufa a 105°C por período superior a 1 hora, colocadas em repouso no dessecador por período mínimo de 12 horas, e então pesadas para determinação dos valores de massa tara (sem presença de sedimento). Após o processo de filtragem, as membranas com sedimento foram levadas à estufa, para então serem pesadas novamente se obtendo os valores de massa bruta (membrana com a presença de sedimento). A Figura 34 apresenta o fluxograma do processo de preparo e processamento das amostras.



Figura 32 – Sistema montado para execução do método de filtração das amostras, contendo cada peça um cadinho de Gooch (1), uma membrana filtrante (2) e um Erlenmeyer (3).  
Fonte: Próprio autor.



Figura 33 – Membranas filtrantes após processo de filtragem.  
Fonte: Próprio autor.

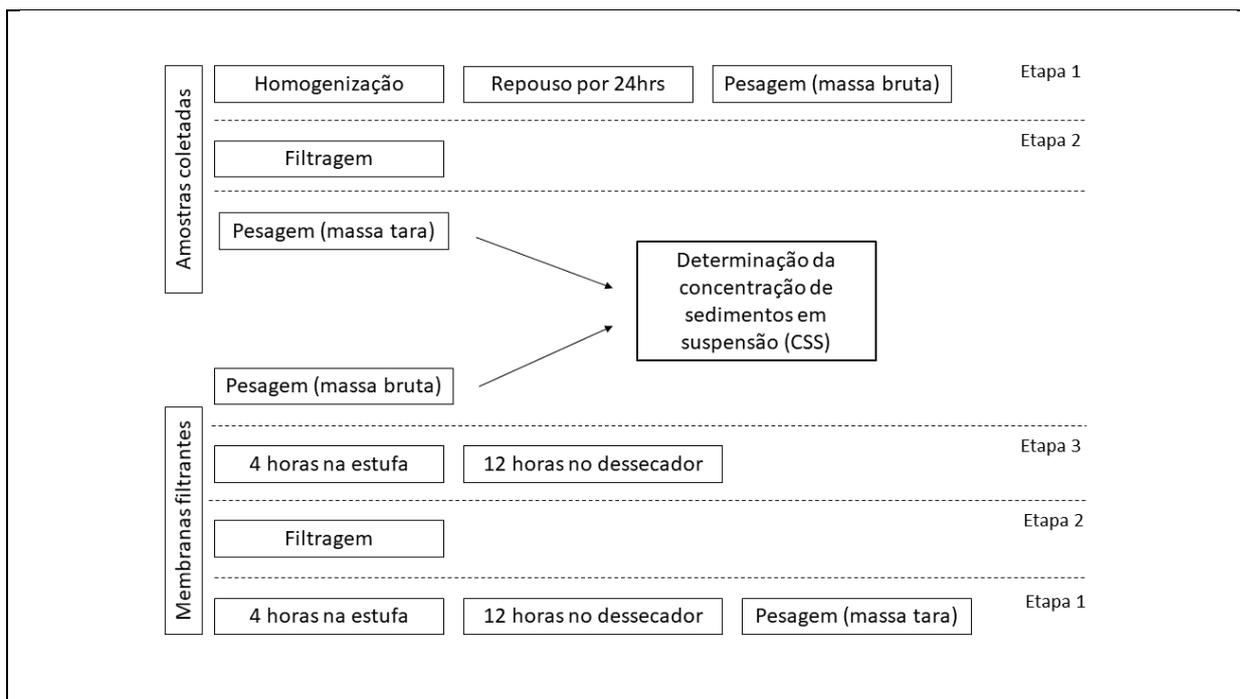


Figura 34 – Fluxograma do processo de preparação das amostra água-sedimento para filtragem.  
Fonte: Próprio autor.

Após esse processo, aplicando-se a Equação 11 é possível ser determinado a CSS discretizada por vertical, e a CSS média da seção.

$$CSS = \frac{m_{SB} - m_{ST}}{\sum_{i=1}^n (m_{ABi} - m_{ATi})} \times 10^6 \times F_c + C_p \quad (11)$$

Em que:

Css = Concentração de sedimentos em suspensão – mg.L<sup>-1</sup>

m<sub>SB</sub>= Massa bruta do sedimento filtrado (membrana) – gramas

m<sub>ST</sub>= Massa tara da membrana – gramas

m<sub>ABi</sub> = Massa bruta da i-ésima sub-amostra – gramas

m<sub>ATi</sub>= Massa tara da i-ésima sub-amostra – gramas

10<sup>6</sup> = Fator de conversão de g.g<sup>-1</sup> para mg.kg<sup>-1</sup> – (mg.kg<sup>-1</sup>) / (g.g<sup>-1</sup>)

F<sub>c</sub> = Fator de conversão de CSS de mg.kg<sup>-1</sup> para mg.L<sup>-1</sup> – (mg.L<sup>-1</sup>) / (mg.kg<sup>-1</sup>)

C<sub>p</sub> = Correção nula de precisão intermediária do procedimento analítico

Para realização de todo o processo conforme metodologia descrita por DNAEE (1970), considerados os tempos necessários para preparo dos materiais e amostras, são empregados aproximadamente dois dias.

### 3.2.4 Correção do backscatter

Utilizando do software *Surrogate Analysis and Index Developer Tool* (SAID) (DOMANSKI *et al.*, 2015), desenvolvido e disponibilizado pela USGS realizou-se, de forma automatizada, a correção do backscatter conforme Equação 3, apresentada no item 2.3.3.

O software SAID permite a entrada dos dados brutos coletados pelo ADCP estático SL-500, junto de uma série de dados de CSS (Figura 35). A partir dessas informações é possível corrigir o backscatter e equacionar uma relação entre variáveis conforme escolha do usuário.

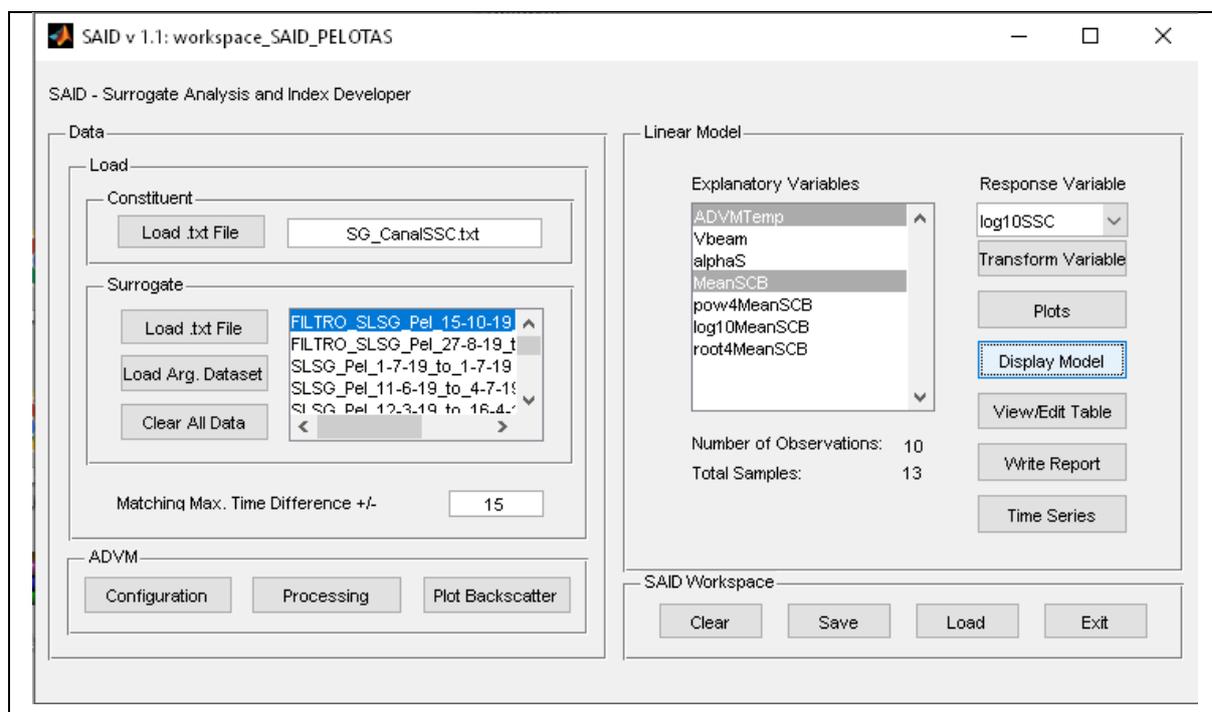


Figura 35 -Tela inicial do software SAID.  
Fonte: Próprio autor.

O cálculo de correção do backscatter leva em consideração parâmetros de configuração e processamento, definidos pelo usuário. Os parâmetros de configuração do ADCP estático, para cada uma das seções, estão descritos na

Tabela 1. Além destes, outras informações relativas às características construtivas do equipamento como, frequência (500 kHz), diâmetro efetivo dos transdutores (0,09m), sentido de orientação dos transdutores (horizontal), ângulo de abertura entre os transdutores (25°), são inseridas no SAID (Figura 36a).

No processamento dos dados brutos a configuração dos parâmetros utilizada foi a mesma em ambas as seções, sendo necessário especificar os transdutores utilizados (média entre os dois transdutores horizontais), medida de backscatter (amplitude), fator de escala de intensidade (0,43 – fator que converte backscatter para decibel, fornecido pelo fabricante), distância mínima do centro da célula (centro da primeira célula), distância máxima do centro da célula (centro da última célula), número mínimo de células a ser considerado (uma célula), nível d'água mínimo registrado pelo feixe vertical (mínimo possível), correção para o campo próximo (sim), correção para o meio aquoso (sim) (Figura 36b).

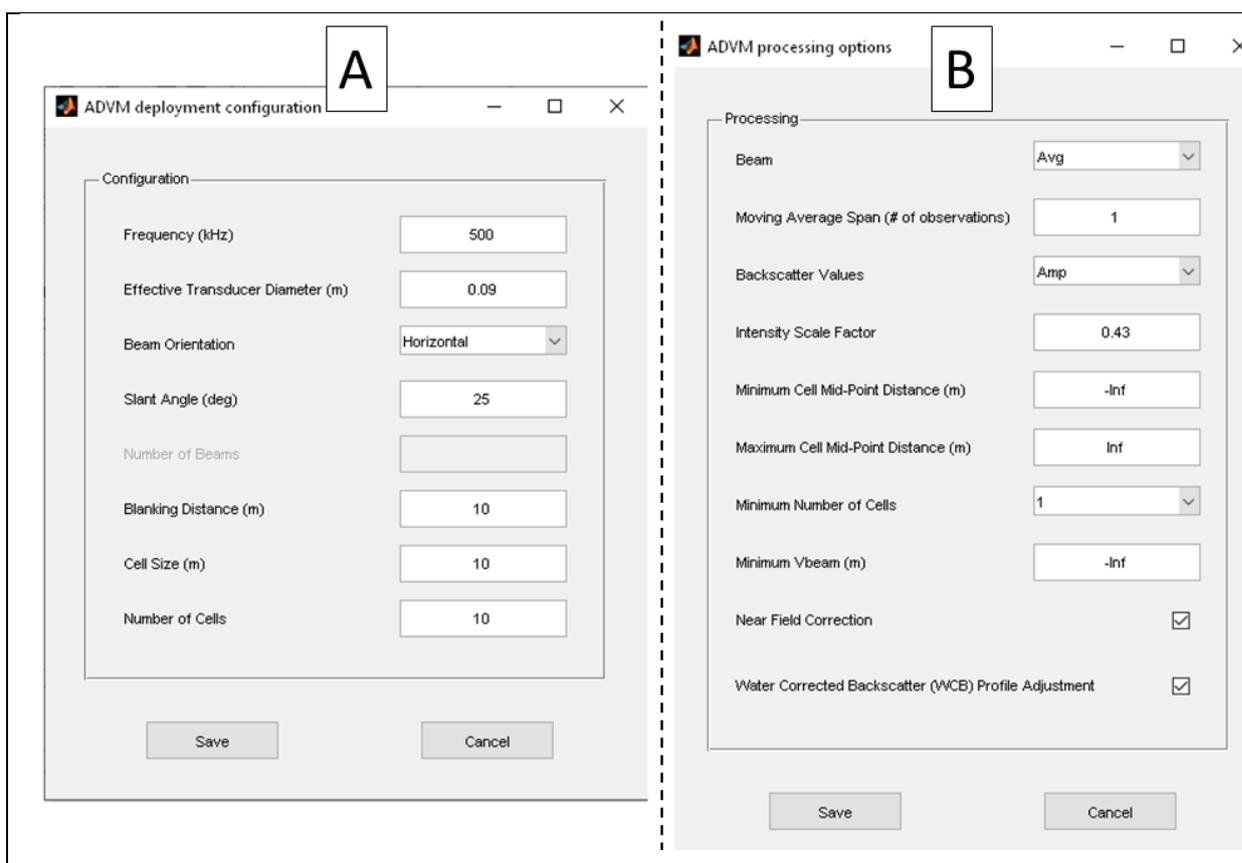


Figura 36 -Telas de a) configuração, e b) opções de processamento no software SAID. Exemplo utilizando parâmetros da seção 1 – Pelotas.  
Fonte: Próprio autor.

Depois de aplicadas as configurações é possível identificar quais valores de  $CSS_{\text{observada}}$  estão contidos dentro da série de dados acústicos inserida. Em caso de falhas ou inexistência de dados coletados pelo ADCP, se existirem valores de  $CSS_{\text{observada}}$  para esses períodos, os valores não serão utilizados para gerar os modelos de regressão para estimativa da CSS. Na seção 1 – Pelotas, em virtude de falhas do ADCP, 3 valores de CSS foram excluídos por não possuírem dados acústicos nas mesmas data e hora. Vale salientar que, para este estudo utilizou-se intervalo de amostragem de 900 segundos (a cada 900 segundo o ADCP estático armazenou uma leitura de todos os parâmetros), portanto, cada valor de  $CSS_{\text{observada}}$  corresponderá a uma única leitura do ADCP.

Depois de aplicadas todas as configurações e inserção dos parâmetros, escolhe-se a(s) variável explanatória para construção do modelo. Para ambas as seções foi utilizado o  $\overline{SCB}$  (média do backscatter corrigido no feixe horizontal).

O  $\overline{SCB}$  é resultado da média dos  $SCB$  para cada uma das 10 células do feixe horizontal, após corrigidas pela Equação 3 para as atenuações causadas tanto pela onda acústica, quanto pelo meio aquoso e sedimentos. Portanto, para cada leitura armazenada pelo ADCP estático (900 segundos de intervalo entre amostragens), essa corresponderá a um valor de  $\overline{SCB}$ . Esse valor de  $\overline{SCB}$  é posteriormente utilizado para construção dos modelos que relacionam o  $\overline{SCB}$  e a  $CSS_{\text{observada}}$ .

O software também permite, com a escolha das variáveis explanatórias e construção do modelo de predição, a visualização da correção do backscatter ao longo do eixo horizontal para a dispersão do pulso acústico, atenuação da onda causada pelas propriedades da água e atenuação causada pelas propriedades dos sedimentos (Figura 37).

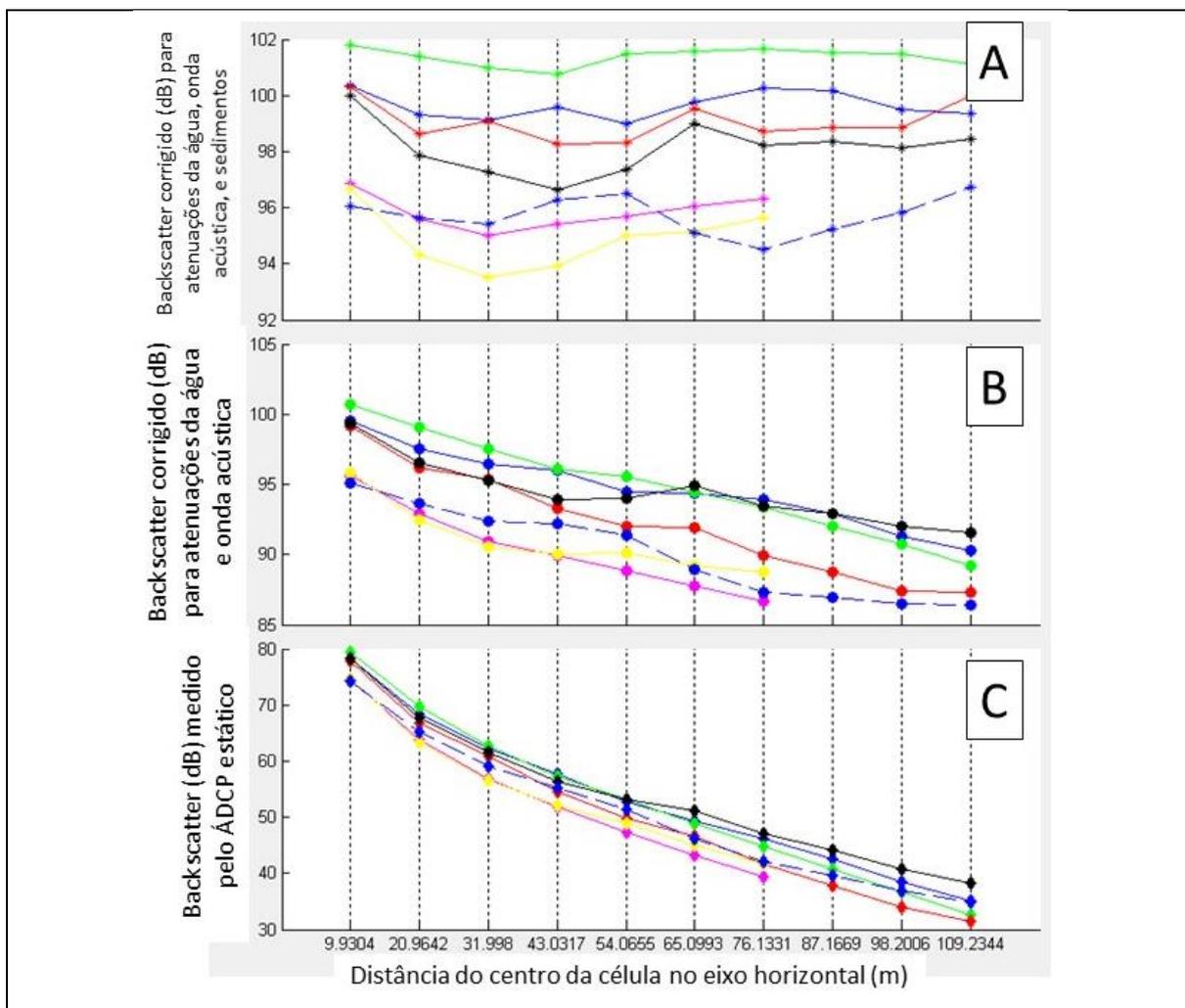


Figura 37 -Telas contendo a) corrigido para atenuações geradas pelo sedimento, b) corrigido para atenuações geradas pela água, c) backscatter medido, para a seção 2 – Santa Isabel do Sul. Fonte: Próprio autor.

### 3.2.5 Avaliação dos modelos

Uma das métricas utilizadas para escolha e avaliação dos modelos de estimativa da CSS, foi o coeficiente de determinação das equações. Segundo Hair *et al.*, (2009), o Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) representa a proporção de variância da variável dependente em torno de sua própria média que é explicada pelas variáveis predictoras. Esse coeficiente varia entre 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior o poder de explicação da equação de regressão, conseqüentemente melhor é a previsão da variável dependente.

Inicialmente, a equação obtida tem como variável dependente o  $\log_{10}CSS$ , e como variável independente o  $\overline{SCB}$ . Entretanto, para retirarmos o  $\log_{10}$  da variável dependente, devemos adicionar o fator BIAS. Segundo Duan(1983), uma variável explanatória pode ser obtida a partir de uma variável preditora transformada para logaritmo neperiano na base 10. Entretanto, ainda segundo o autor, ao transformarmos de volta para que os valores estimados não estejam logaritmizados, por exemplo, a CSS, se deve retirar o viés de tendenciosidade, que representa a tendência do modelo gerado em superestimar ou subestimar valores estimados em relação ao observado. Essa correção pode ser realizada adicionando-se o fator BIAS.

Ainda para medida da acurácia da estimativa feita pelos modelos de regressão linear, utilizou-se o método proposto por Van Rijin (1984), capaz de inferir sobre a taxa de discrepância entre a CSS estimada, e CSS observada, conforme apresentado na Equação 12.

$$r = \frac{CSS_{estimada}}{CSS_{observada}} \quad (12)$$

Em que:

$r$  = fator de taxa de discrepância

$CSS_{estimada}$  = obtida através de regressão linear ( $mg.l^{-1}$ )

$CSS_{observada}$  = obtida *in loco* por amostragem ( $mg.l^{-1}$ )

O fator  $r$  proposto é classificado em faixas de escala (Tabela 4), que indicam quantas vezes a  $CSS_{estimada}$  é superior ou inferior a  $CSS_{observada}$ , assim como, representam a porcentagem de valores de  $CSS_{estimada}$  que resultam dentro de determinada faixa de escala do fator.

Tabela 4 – Faixas do fator  $r$  de discrepância, conforme TERABE (2003).

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

Fonte: Próprio autor.

Neste estudo, foram excluídas a faixa bem abrangente do fator 5 e a faixa bem restritiva do fator 1,25, restando para aplicação as faixas: 1,5; 2,0; e 3,0 como limite.

Utilizando -se da mesma relação 1:1 (relação entre valores observados e estimados de CSS) estabelecida para o enquadramento dos fatores de  $r$ , avaliou-se a acurácia pelo erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio (RMSE), e a porcentagem do viés (PBIAS).

O erro médio (Equação 13) vai indicar a exatidão das estimativas, apontando tendências dos modelos em superestimar (ME positivo), ou subestimar (ME negativo), sendo que quanto mais próximo de 0, melhor a capacidade de estimativa do modelo.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CSS_{estimado} - CSS_{observado}) \quad (13)$$

Onde:

$n$  = Número de observações;

$CSS_{estimado}$  = CSS estimada pelo modelo (mg.L<sup>-1</sup>);

$CSS_{observado}$  = CSS observada por amostragem (mg.L<sup>-1</sup>).

Também foi utilizado a raiz quadrada do erro médio (RMSE), essa indica a quantidade de dispersão entre valores observados e estimados. Quanto maior a proximidade do RMSE for de zero, melhor o desempenho e acurácia do modelo utilizado, conforme Equação 14.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CSS_{estimado} - CSS_{observado})^2} \quad (14)$$

Em que:

$n$  = número de observações;

$CSS_{estimado}$  = CSS estimada pelo modelo (mg.L<sup>-1</sup>);

$CSS_{observado}$  = CSS observada por amostragem (mg.L<sup>-1</sup>).

Por último, utilizou-se o fator de porcentagem do viés (PBIAS), o qual indica a tendência de os valores estimados serem maiores ou menores que os observados, sendo que o valor ideal de PBIAS é zero. Valores positivos indicam uma tendência do modelo em subestimar valores, e quando negativo indica uma tendência em superestimar valores.

O PBIAS pode ser calculado através da Equação 15, e classificado para inferir sobre a eficácia do modelo conforme Tabela 5, sugerida por Moriasi *et al.* (2007) para avaliação de estimativas de sedimento.

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (CSS_{Observado} - CSS_{estimado})}{\sum_{i=1}^n CSS_{Observado}} \quad (15)$$

Em que:

n = número de observações;

$CSS_{estimado}$  = CSS estimada pelo modelo (mg.L<sup>-1</sup>);

$CSS_{observado}$  = CSS observada por amostragem (mg.L<sup>-1</sup>).

Tabela 5 – Faixas de classificação do fator de tendência PBIAS.

<b>Classificação</b>	<b>PBIAS (%)</b>
Muito bom	$PBIAS < \pm 15$
Bom	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$
Satisfatório	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$
Não satisfatório	$PBIAS \geq \pm 55$

Fonte: Moriasi *et al.*, 2007.

## 4 Resultados e discussões

Neste tópico estão apresentados os principais resultados e contribuições com interpretações e discussões para a expressão das conclusões.

### 4.1 Concentração de Sedimentos por amostragem

As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores de CSS observados nas seções 1 e 2, Pelotas e Santa Isabel do Sul, respectivamente. Os valores estão organizados de forma que se possa analisar a CSS composta da seção, a qual representa a CSS média da seção e as concentrações discretizadas por vertical para cada uma das campanhas de amostragem realizadas.

Na seção 1, município de Pelotas, observou-se baixas concentrações de sedimento, em todas as campanhas, sendo que o valor mínimo foi de  $11,27\text{mg.L}^{-1}$  (16/06/2019) e o valor máximo foi de  $57,05\text{mg.L}^{-1}$  (21/08/2019).

Essa pequena amplitude da faixa de concentração de sedimentos remete a uma condição inadequada para a construção das relações entre pulso acústico e concentração de sedimentos. Conforme mencionado por Landers *et al.*, (2016), é importante avaliar a atenuação do pulso acústico com baixas e altas concentrações, para verificar se o ruído existente e produzido pelo meio não é maior que o próprio pulso emitido, principalmente em longas distâncias (próximo das células finais), o que acaba por inserir maiores incertezas na correção do backscatter. Gray e Gartner (2009), ainda mencionam que frequências acústicas de 500kHz (o equipamento utilizado neste trabalho) possui limitação de aplicação para concentrações próximas de  $10\text{mg.L}^{-1}$ .

As limitações supracitadas afetam na correção do pulso acústico, interferindo negativamente na construção da equação de estimativa da CSS.

Entretanto, os valores de CSS média por campanha na seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul apresentaram variação maior, sendo que o valor mínimo de CSS observado foi de  $11,29\text{mg.L}^{-1}$  (06/11/2019) e o valor máximo observado foi de  $129,45\text{mg.L}^{-1}$  (03/07/2019). Essa variação reflete de forma positiva na construção da equação de estimativa da CSS para a seção 2.

Outra observação é a baixa variação da concentração em cada uma das verticais, empregada para a concentração média (obtida por amostras compostas), sugerindo a definição, se possível, de verticais representativas para cada uma das seções monitoradas. Isso permite a continuidade do monitoramento da concentração através de amostragem física, sendo que, com uma única vertical se obtenha o valor de CSS média da seção.

É possível observar na seção 1, falha nos dados da campanha do dia 25 de julho. Isso ocorreu devido a condições climáticas extremas no dia da amostragem, havendo muita chuva, fortes ondas, vento, e raios na região. Por esse motivo a coleta teve de ser interrompida após a segunda vertical amostrada.

Na seção 2, existe também uma falha nos dados, na data de 26 de junho. Essa falha se justifica por erros causados no processamento das amostras para determinação da CSS em laboratório, sendo necessário a exclusão dos valores de CSS das verticais 1 e 6, para esta data.

Tabela 6 – Concentração de sedimento em suspensão para a seção 1, localizada em Pelotas.

<b>Seção 1 - Pelotas: Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/L)</b>													
	Data	Data	Data	Data	Data								
<b>Vertical</b>	<b>13-Mar</b>	<b>11-Apr</b>	<b>16-Jun</b>	<b>24-Jun</b>	<b>25-Jul</b>	<b>31-Jul</b>	<b>21-Aug</b>	<b>27-Aug</b>	<b>17-Sep</b>	<b>8-Oct</b>	<b>14-Oct</b>	<b>5-Nov</b>	<b>20-Nov</b>
<b>1</b>	43,19	24,66	7,51	34,91	40,73	43,40	54,73	54,99	35,40	28,34	37,41	17,34	15,99
<b>2</b>	42,76	24,32	12,57	37,23	41,51	43,83	53,39	51,77	37,35	30,96	40,01	18,08	15,41
<b>3</b>	38,84	24,76	10,25	38,03		50,50	59,37	59,09	41,73	35,82	42,35	18,15	14,86
<b>4</b>	50,79	27,22	8,76	39,17		49,38	60,55	54,99	42,43	34,66	45,50	16,27	16,78
<b>5</b>	53,33	27,96	14,34	47,19		48,14	57,87	58,51	42,42	38,03	52,79	21,00	16,61
<b>6</b>	53,16	32,85	11,31	44,33		46,05	56,15	57,39	43,57	36,92	51,96	25,05	17,34
<b>Composta</b>	46,93	26,66	11,23	39,25	41,20	46,83	57,05	55,97	40,29	33,92	45,06	19,17	16,12
<b>Máximo</b>	53,33	32,85	14,34	47,19	41,51	50,50	60,55	59,09	43,57	38,03	52,79	25,05	17,34
<b>Mínimo</b>	38,84	24,32	7,51	34,91	40,73	43,40	53,39	51,77	35,40	28,34	37,41	16,27	14,86

Tabela 7 – Concentração de sedimento em suspensão para a seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul.

Seção 2- Santa Isabel do Sul: Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/L)								
	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data	Data
Vertical	26-Jun	3-Jul	9-Jul	2-Aug	3-Sep	10-Sep	16-Oct	6-Nov
1		85,51	32,33	89,40	71,44	50,69	22,82	9,48
2	95,49	101,60	38,41	94,13	71,44	49,05	19,98	13,35
3	93,41	119,26	42,99	93,72	71,59	42,75	30,31	11,06
4	104,95	137,63	48,31	95,01	67,09	44,40	53,50	11,51
5	122,07	154,44	47,18	94,31	67,12	41,19	21,34	11,57
6		171,99	47,01	93,50	64,01	38,69	19,70	10,30
Composta	106,87	129,45	43,20	93,44	68,69	44,14	27,09	11,29
Máximo	122,07	171,99	48,31	95,01	71,59	50,69	53,50	13,35
Mínimo	93,41	85,51	32,33	89,40	64,01	38,69	19,70	9,48

#### 4.2 Equações de ajuste

A seguir são apresentadas as equações construídas para estimativa da CSS a partir de regressão linear, conforme descrito no item 3.2.4. As equações apresentadas (Tabelas 8 e 9), foram selecionadas baseadas no Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e relação física entre variáveis dependente e independente, também utilizado em estudos anteriores (MEDALIE *et al.*, 2014; LANDERS *et al.*, 2016). Para ambas as seções foram utilizadas como variável preditora a média do backscatter corrigido no feixe horizontal ( $\overline{SCB}$ ) em dB, ou backscatter normalizado. A variável resposta (dependente) foi definida como o  $\log_{10}CSS$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), ou sua transformada de  $\log_{10}$  para  $CSS$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), adicionado seu respectivo fator de correção da transformada não paramétrica (BIAS).

Para a seção 1 – Pelotas obteve-se o modelo para estimativa de CSS conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelo para estimativa de CSS, seção 1.

Seção 1	
$\log_{10}CSS$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	$\log_{10}CSS = 6,9 - (0,0727 \times \overline{SCB})$
$CSS$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	$CSS = 10^{6,9-(0,0727 \times \overline{SCB})} \times 1,0589$
BIAS	1,0589
$R^2$	0,44

Já para a seção 2 – Santa Isabel do Sul obteve-se o modelo para estimativa de CSS conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelo para estimativa de CSS, seção 2.

	Seção 2
$\log_{10}CSS$ (mg.L <sup>-1</sup> )	$\log_{10}CSS = -8,41 + (0,104 \times \overline{SCB})$
CSS (mg.L <sup>-1</sup> )	$CSS = 10^{-8,41+(0,104 \times \overline{SCB})} \times 1,1707$
BIAS	1,1707
R <sup>2</sup>	0,43

Os valores de coeficientes de determinação obtidos apresentam-se como promissores comparados aos obtidos por autores que utilizaram de metodologia e ou condições semelhantes. Wood e Teasdale (2013) utilizando de um ADCP estático SL-500 e avaliando duas seções, uma em Clearwater, Idaho – EUA e outra em Snake River, Washington – EUA, obtiveram os coeficientes de determinação de 0,007 e 0,33, respectivamente. Ávila, Möller e Andrade (2014) ao realizarem um estudo no estuário da Laguna dos Patos, obtiveram um coeficiente de determinação de 0,75 ao relacionar o logaritmo neperiano na base 10 da CSS, com o backscatter corrigido de um ADCP do tipo dinâmico. Medalie *et al.* (2014) ao utilizarem um ADCP (1,5MHz) no rio Barton, Vermont – EUA, alcançaram um R<sup>2</sup> de 0,77 para a seção estudada, relacionando  $\log_{10}CSS$  e  $\overline{SCB}$ . Landers *et al.* (2016) alcançaram o valor de 0,86 para coeficiente de determinação na regressão linear utilizando um ADCP estático (1,5MHz de frequência) em Spoon River, Illinois. O elevado coeficiente de determinação obtido por Landers *et al.* (2016), pode ser justificada pela quantidade de valores utilizados, sendo que o autor utilizou para o ajuste 96 campanhas de amostragem de CSS em diferentes datas.

### 4.3 Erros e estimativas dos modelos

Após aplicados os modelos apresentados no item 4.2, utilizando os valores de CSS observada por amostragens “in loco” e CSS estimada (Tabelas 10 e 11), obteve-se os resultados para os fatores de discrepância (Fator r) em ambas as seções (Figura 38).

Tabela 10 – Valores de CSS observado e estimado para a Seção 1 - Pelotas.

<b>Seção 1 - Pelotas</b>		
<b>CSS [m/L]</b>		
<b>Campanha</b>	<b>Observado</b>	<b>Estimado</b>
1	46.93	27.93
2	26.66	31.25
3	11.23	85.10
4	39.25	27.01
5	41.20	58.49
6	46.83	52.88
7	57.05	44.77
8	55.97	36.44
12	19.17	30.60
13	16.12	24.17

Tabela 11 – Valores de CSS observado e estimado para a Seção 2 – Santa Isabel do Sul.

<b>Seção 2 - Santa Isabel do Sul</b>		
<b>CSS [m/L]</b>		
<b>Campanha</b>	<b>Observado</b>	<b>Estimado</b>
1	106.87	96.02
2	129.45	145.75
3	43.20	8.13
4	93.44	83.74
5	68.69	39.07
6	44.14	31.00
7	27.09	67.27
8	11.29	37.85

Vale salientar que na Seção 1 – Pelotas, existem valores não estimados para as campanhas 9, 10, e 11. Isto se justifica por falhas no ADCP estático instalado nessa seção, fato melhor explicado no item 4.4.

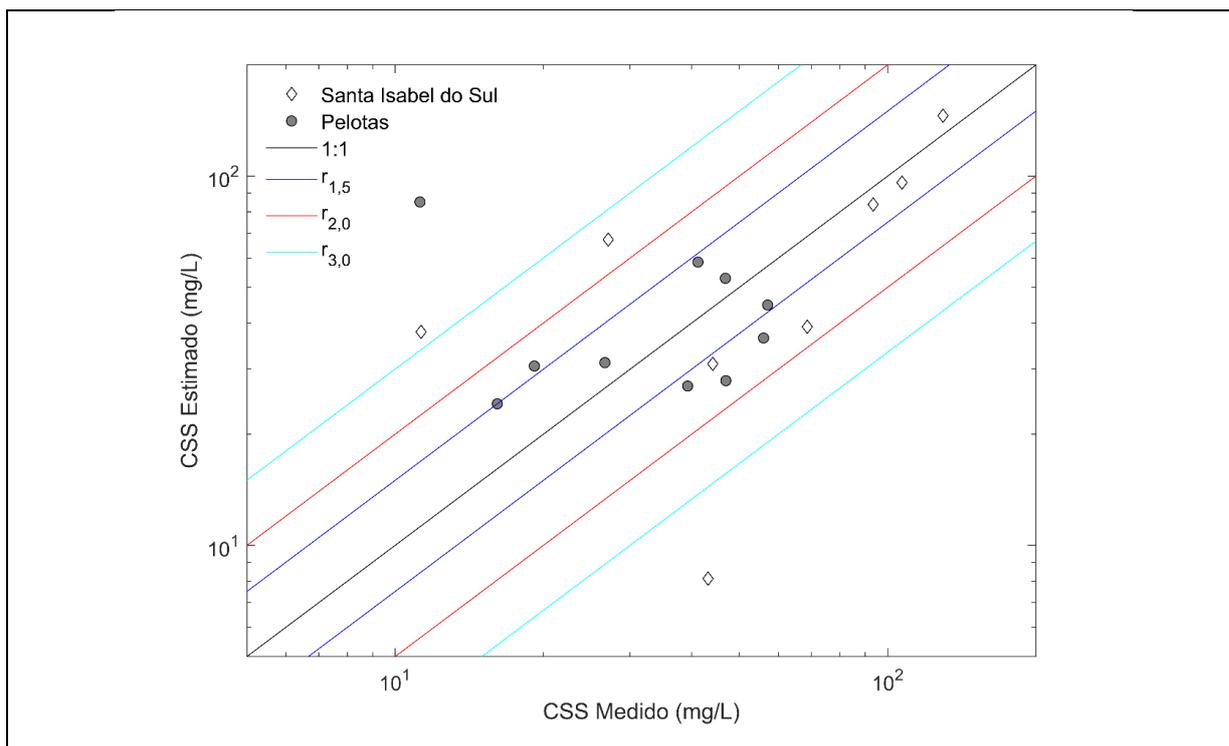


Figura 38 -Fator de discrepância ( $r$ ) para as seções 1 e 2, junto das faixas restritivas 1,5, 2, e 3.  
Fonte: Próprio autor.

Para a seção 1 – Pelotas, o Fator  $r = 2,0$  detém 90% dos valores, assim como, 50% do total se encontram dentro da faixa de restrição do Fator  $r = 1,5$ . Com isso, 90% dos valores estimados na seção, pela equação proposta, não devem superar o dobro, ou ser inferiores que a metade dos valores observados em campo

Para a seção 2 – Santa Isabel do Sul, o Fator  $r = 3,0$  detém 75% dos valores, assim como, 62,5% do total estão dentro da faixa do Fator  $r = 2,0$ . Nesses termos, 62,5% dos valores estimados não devem superar o dobro, ou ser menores que a metade dos valores observados em campo, considerando o Fator 2.

Os resultados obtidos corroboram com resultados já obtidos por outros autores, os quais utilizaram métodos, equipamentos, e locais de estudos semelhantes aos desse estudo. Todos os resultados mencionados e seus respectivos enquadramentos nas faixas restritivas estão apresentados na Figura 39.

Portanto, os resultados observados superam os obtidos por Schuck (2013), que obteve como resultados 76% dos valores dentro do Fator 2, empregando o método proposto por Gartner (2002), para regressão linear entre CSS e intensidade do eco, com testes realizados em laboratório. Assim como, se assemelham aos encontrados por Terabe (2003), o qual obteve 90% dos valores dentro da faixa do Fator 2, utilizando o método proposto por Deines (1999), nos rios Piquiri, Ivaí e

Iguaçu. Dornelles (2009), que desenvolveu seu trabalho no rio Jacuí (RS) utilizou o método proposto por Gartner (2002), obtendo como resultado que 40% das vezes o método foi capaz de estimar a CSS dentro da faixa de Fator 2 ( $r = 1,5$ ).

Presente também na Figura 38 podemos perceber a relação entre CSS observada e estimada (reta 1:1). Dessa relação foram obtidos os valores de ME, RMSE, e PBIAS para as seções 1 e 2, respectivamente (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12 – Estimativa dos erros para a Seção 1 – Pelotas.

ME	-5.8220
RMSE	0,0377
PBIAS	-16,1539

Tabela 13 – Estimativa dos erros para a Seção 2 – Santa Isabel do Sul.

ME	1.9199
RMSE	0,0397
PBIAS	2,9301

A considerar essa situação (análise da capacidade preditiva dos modelos), o resultado obtido na seção 1 apresenta ME = -5,8220, ou seja, elevada tendência do modelo em subestimar valores de CSS para a seção. Valor de RMSE = 0,0377, ou seja, existe baixa dispersão dos dados em torno da reta. PBIAS = -16,1539, valor que contradiz o ME, pois aqui é possível verificar a tendência do modelo em superestimar valores de CSS, o contrário do que foi indicado pelo ME. Seguindo classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), o PBIAS da seção 1 se classifica como “Bom”. Porém, a divergência dos apontamentos feitos pelo ME e pelo PBIAS, atrelados as falhas apresentadas pelo ADCP estático da seção 1, nos faz questionar a qualidade das estimativas obtidas para essa seção.

Os resultados obtidos na seção 2, também apresentam divergências. O ME = 1,9199 indica tendência do modelo em superestimar valores de CSS. O valor de RMSE = 0,0397 aponta para existência de dispersão dos valores em torno da reta 1:1. O valor de PBIAS = 2,9301 indica tendência do modelo em subestimar valores de CSS, o contrário do indicado pelo ME. Seguindo classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), o PBIAS da seção 2 se classifica como “Muito Bom”.

Em ambas as seções, as divergências existentes na tendência do modelo em sub, ou superestimar possuem relação direta com a dispersão dos valores em torno da reta 1:1, estando os valores distribuídos de forma quase igualitária acima e abaixo da reta.

Vale salientar que para a construção da equação na seção 1 – Pelotas, foram utilizados apenas 10 valores de CSS observados. Embora o intervalo de tempo entre o início e o fim das amostragens seja relativamente longo, sua periodicidade é pequena, fator limitante para a capacidade de representação do modelo as reais condições. O mesmo se observa na seção 2 – Santa Isabel do Sul, onde foram utilizadas apenas 8 amostras para construção do modelo de estimativa da CSS. Embora nesse caso o intervalo de tempo não seja longo, a amplitude dos valores amostrados foi satisfatória, conforme apresentado na Tabela 6, concedendo ao modelo construído para a seção 2, maior confiabilidade que para a seção 1.

As equações geradas para estimativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) no Canal São Gonçalo, para as duas seções monitoradas, apresentaram resultados satisfatórios (classificação do PBIAS para Sedimentos, conforme proposto por Moriasi *et al.*, 2007, dentro das faixas “Bom” e “Muito bom”) diante das limitações e dificuldades encontradas no desenvolvimento do estudo. Entretanto, quando se remete as análises entre CSS e backscatter corrigido, sugere-se a utilização de um número maior de amostragens na construção dos modelos, para que a estimativa de CSS possa ser realizada com maiores certezas.

#### **4.4 Série histórica**

Utilizando os modelos propostos no item 4.2, foram construídas séries históricas para o período de amostragem de sedimentos nas respectivas seções. As séries presentes nas Figuras 40, 41, 42 e 43, apresentam valores de nível, vazão, direção da água,  $\overline{SCB}$ , e CSS estimado, sendo que a figura 43 também apresenta valores de descarga sólida em suspensão. Encontram-se também plotados na série de CSS estimado os valores de CSS observados em cada seção. As séries divergem em valores e comportamentos, a seguir descritas:

Seção 1 – Pelotas: As séries possuem inconsistências ocasionadas pelo mau funcionamento do equipamento, prejudicando adequada construção do modelo, amostragens *in loco* e a necessária construção de séries históricas a partir das estimativas. Com isso, os resultados obtidos para este local apresentam maiores incertezas e inconsistências quando comparado a outros autores, ou até mesmo, aos valores obtidos para a seção 2. O valor máximo estimado foi de 98365,22mg.L<sup>-1</sup>, o valor mínimo estimado foi de 0,0133mg.L<sup>-1</sup>, e o valor médio estimado foi de 112,27mg.L<sup>-1</sup>.

Durante o período de realização deste trabalho, o ADCP estático instalado na seção 1 teve problemas de fixação na estrutura que o suporta, às margens do canal, fazendo com que o equipamento se movesse de sua posição original (90°). Essa situação afetou outras informações, como velocidade e SNR, diretamente ligado a variável backscatter, conforme Figura 39, onde é possível notar o momento em que o equipamento se desprende da estrutura, tendo sua direção drasticamente modificada (sinalizado em verde na Figura 39). O efeito disso pode ser visto nas variáveis velocidade (Figura 39a) e SNR (Figura 39b).

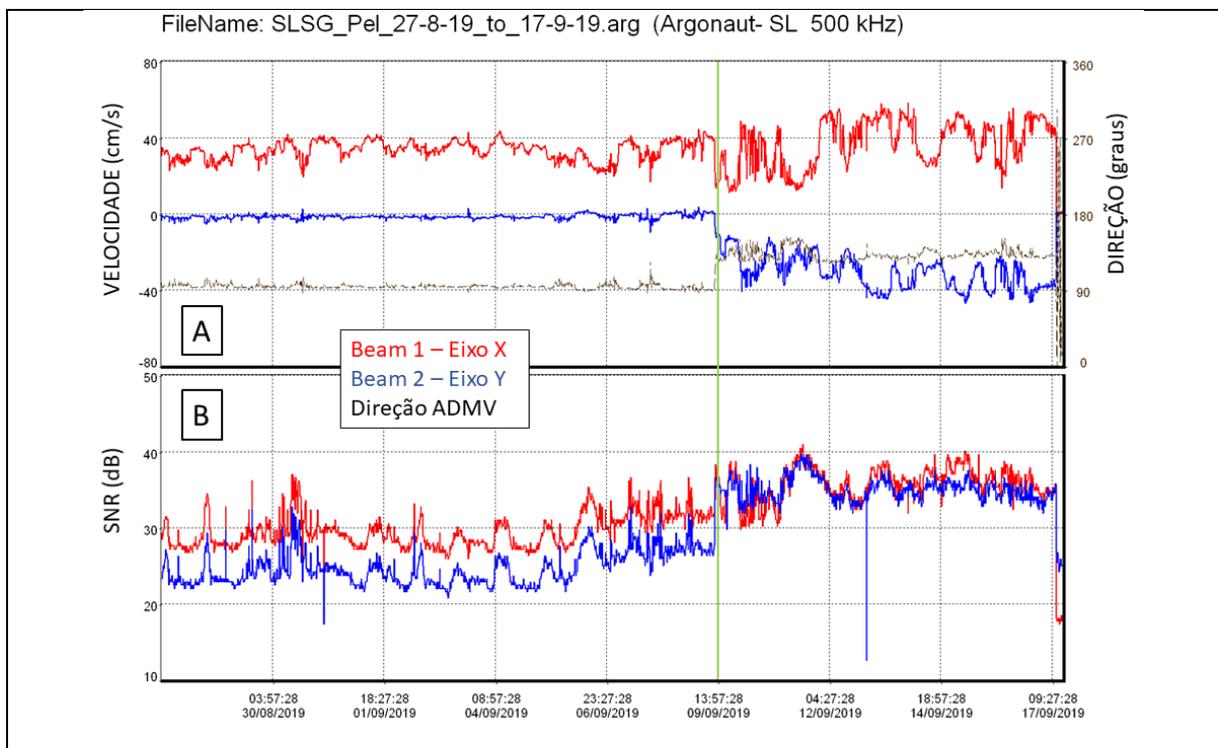


Figura 39 -Dados extraídos do ADCP estático na seção 1 – Pelotas, onde a) velocidade nas direções X e Y (eixo principal), e direção do equipamento em relação ao eixo X (eixo secundário), b) SNR (dB) nos eixos X e Y.

Fonte: Próprio autor.

Gamaro (2014), afirma que a medida em decibéis indica a intensidade de uma pressão sonora comparada a um nível de referência, sendo esses em escala logarítmica, fazendo com que uma diferença de 3dB na medição do backscatter resulte em um erro de 100% na CSS estimada.

Esses problemas foram constantes durante todo o intervalo de tempo do desenvolvimento deste estudo na seção 1 (Figura 40c) na qual por longos períodos é possível notar grandes oscilações na direção do equipamento, sendo necessário a exclusão de dados que apresentaram essa inconsistência, ou seja, apontasse que o equipamento havia se deslocado. Com isso três amostragens de sedimentos, nas datas 17/09, 8/10, e 14/14 de 2019, foram excluídas, pois foram realizadas quando o ADCP estava deslocado da sua posição original.

Seção 2 – Santa Isabel do Sul: Os dados coletados nessa seção apresentaram-se consistentes, sem falhas e englobando todo o período de amostragens de sedimentos. Interessante observar (Figura 42c) que as variações de direção identificadas foram pontuais e, logo retornando à direção predominante. Isso pode ser atribuído a possíveis fluxos no sentido inverso, visto que essa seção está sob condições de inversão de fluxos. Esse fato também é corroborado com a repentina diminuição da vazão quando ocorre inversão da direção predominante do fluxo, chegando a valores negativos, observado nos dados extraídos do ADCP estático.

A estimativa da CSS foi consistente, sem falhas de dados, e todos os valores observados de CSS pelas amostras *in loco* estão compreendidos no intervalo estimado pelo modelo. O valor máximo estimado foi de 1914,28mg.L<sup>-1</sup>, o valor mínimo estimado foi de 0,86mg.L<sup>-1</sup>, e o valor médio estimado foi de 31,22mg.L<sup>-1</sup>.

Já para os valores de descarga sólida em suspensão, o valor máximo estimado foi de 150054,8ton.dia<sup>-1</sup>, o valor mínimo positivo estimado foi de 0,25ton.dia<sup>-1</sup>, e o valor médio estimado foi de 2251,6ton.dia<sup>-1</sup>.

Com isso, a seção 2 apresentou melhores resultados para estimativa da CSS após correção do backscatter, aproximando-se de resultados obtidos por outros autores que se utilizaram de metodologia semelhante, ou que efetuaram seus estudos na região da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

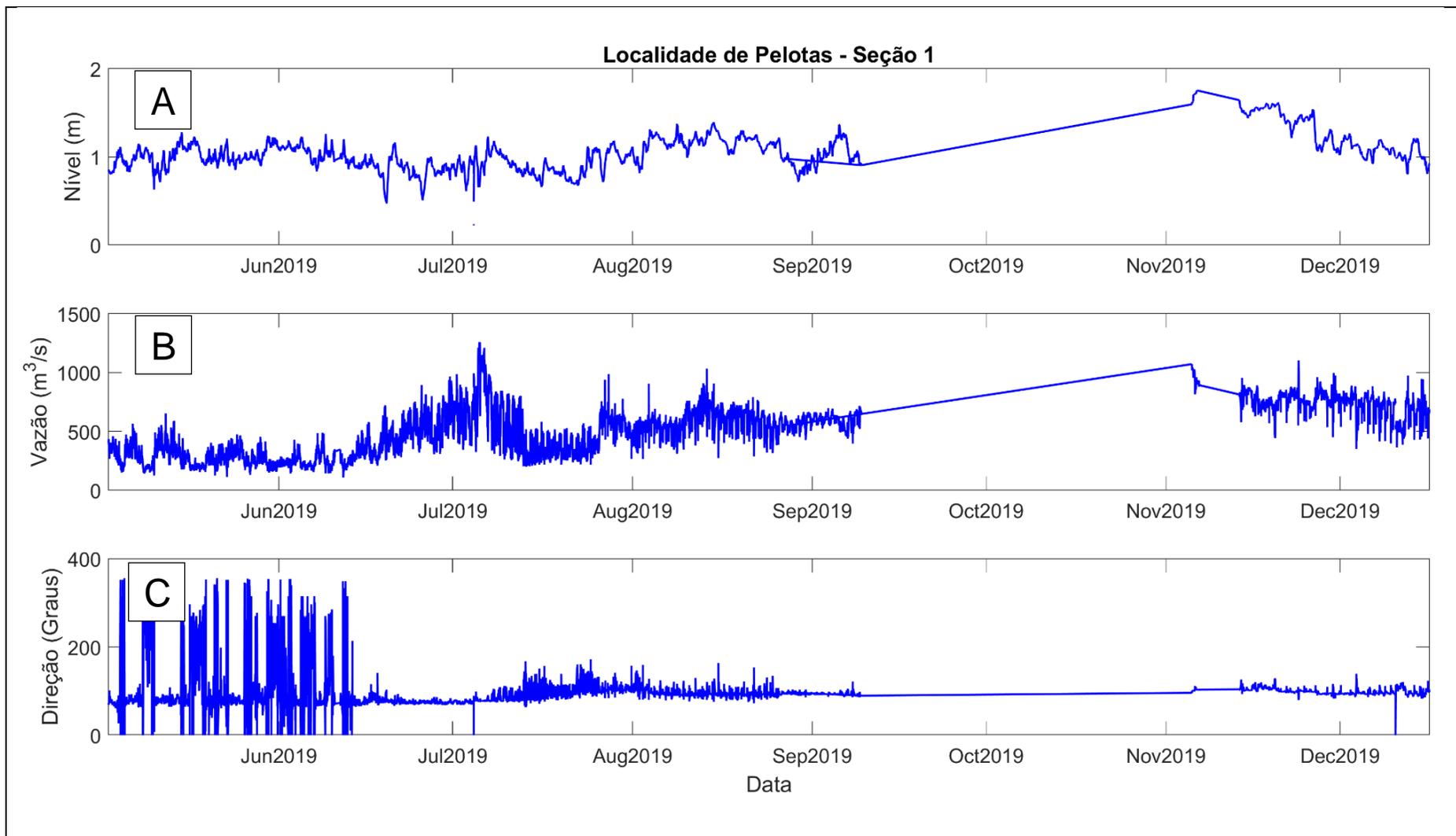


Figura 40 – Seção 1, Pelotas. Séries históricas a) nível, b) vazão, c) direção do equipamento em relação a transversal.  
Fonte: Próprio autor.

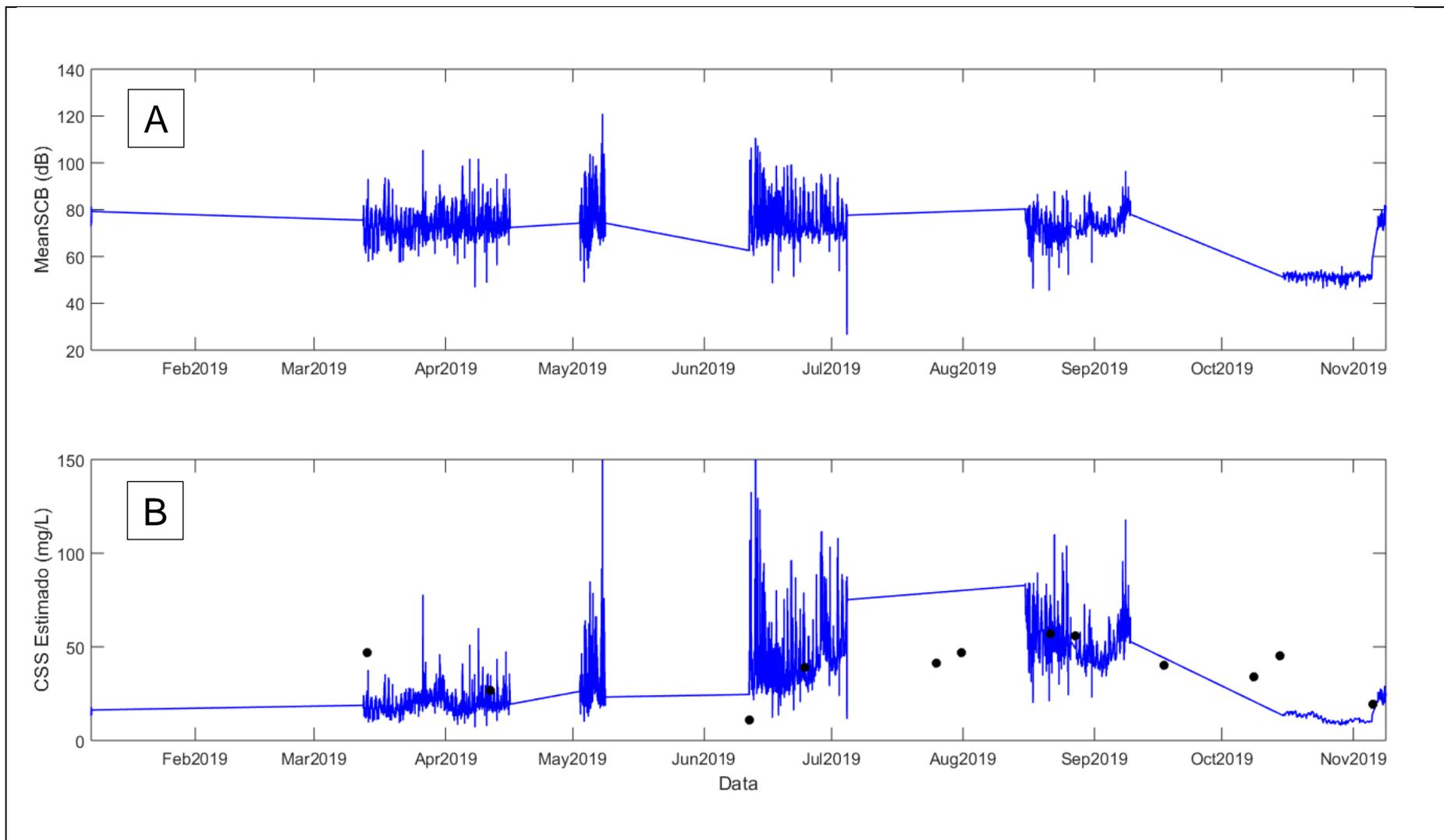


Figura 41 – Seção 1, Pelotas. Séries históricas a) temperatura, b)  $\overline{SCB}$ , c) CSS estimada.  
 Fonte: Próprio autor.

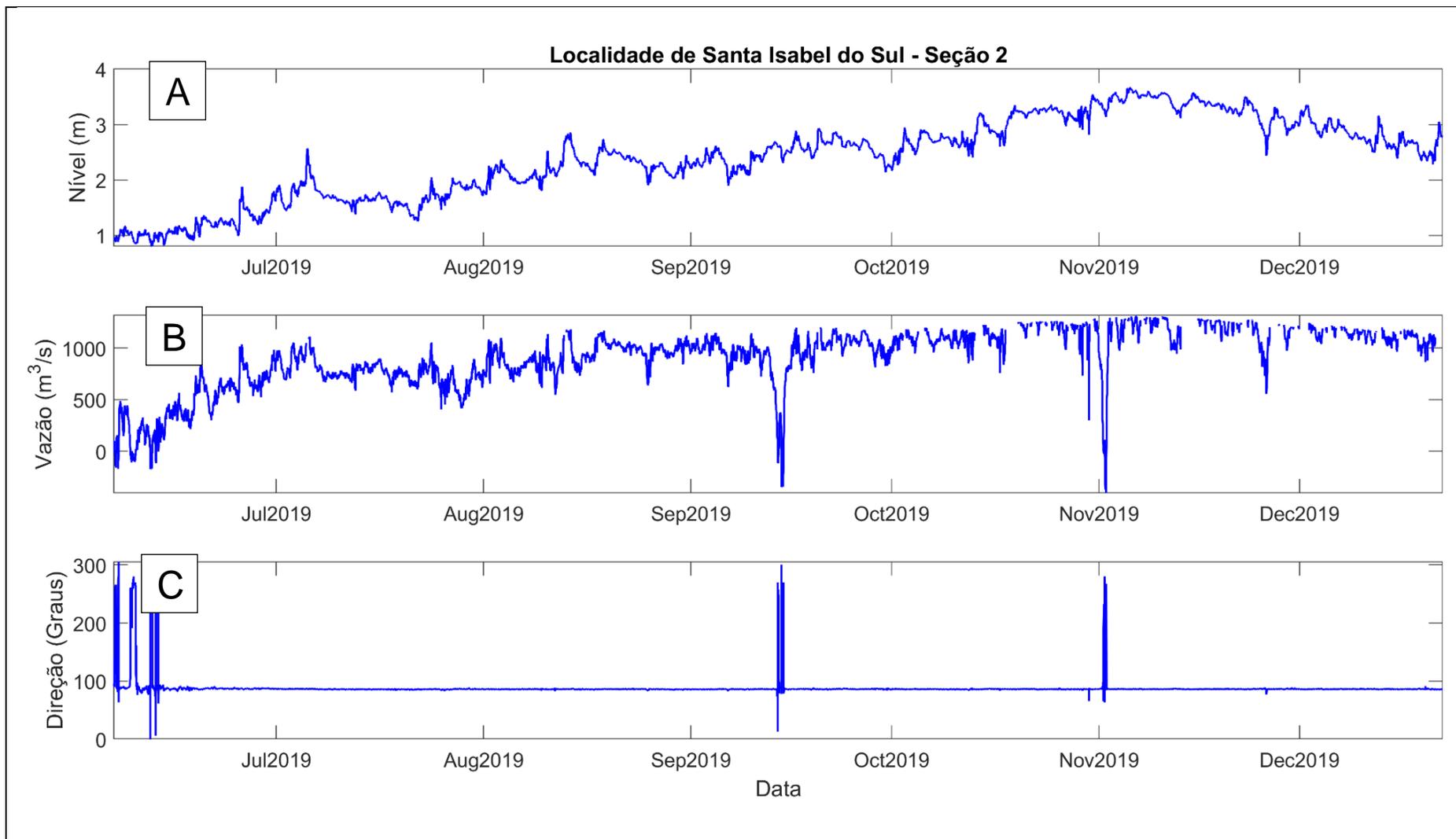


Figura 42 – Seção 2, Santa Isabel do Sul. Séries históricas a) nível, b) vazão, c) direção do equipamento em relação a transversal.  
Fonte: Próprio autor.

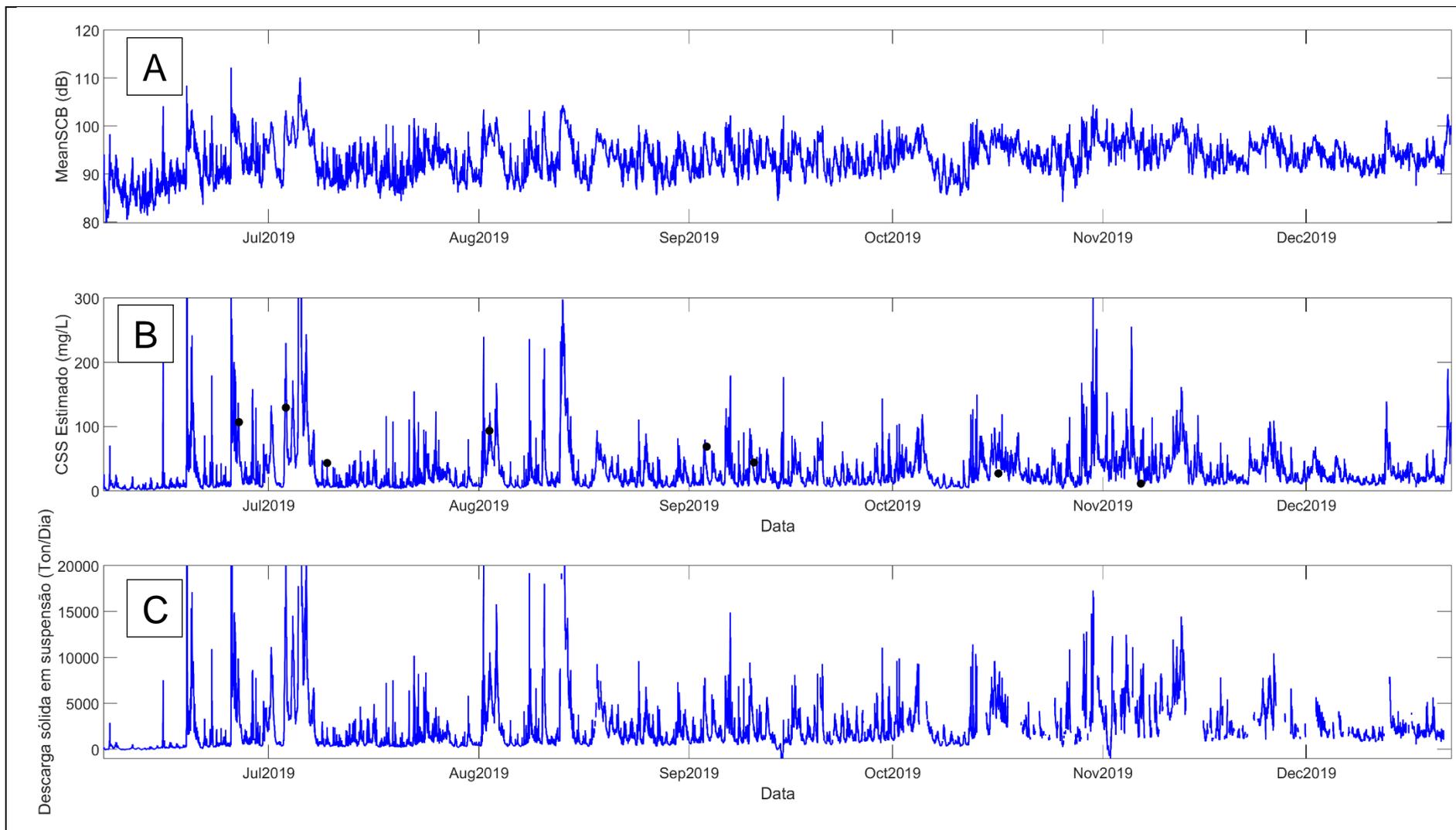


Figura 43 – Seção 2, Santa Isabel do Sul. Séries históricas a)  $\overline{SCB}$ , b) CSS estimada, c) Descarga sólida em suspensão.  
 Fonte: Próprio autor.

## 5 Conclusões, considerações finais e sugestões

Neste tópico estão apresentadas as principais conclusões obtidas ao término desse estudo, bem como sugestões para a sequência de atividades de monitoramento e estimativa de sedimentos em suspensão empregando equipamentos acústicos estáticos na região estudada.

### 5.1 Conclusão

Ao avaliarmos a CSS observada no Canal São Gonçalo, considerando a relação existente com o backscatter corrigido, pode-se afirmar que é possível estimar a carga sólida em suspensão de forma contínua, utilizando um ADCP do tipo estático.

Neste estudo, através de amostragens *in loco* de sedimentos em suspensão conduzidas entre março e novembro de 2019, observou-se baixos valores de concentração. Na Seção 1 – Pelotas, observou-se valor mínimo de 11,27mg.L<sup>-1</sup> (16/06/2019) e o valor máximo foi de 57,05mg.L<sup>-1</sup> (21/08/2019). Na Seção 2 – Santa Isabel do Sul, observou-se valor mínimo de 11,29mg.L<sup>-1</sup> (06/11/2019) e o valor máximo observado foi de 129,45mg.L<sup>-1</sup> (03/07/2019).

De acordo com Wood e Teasdale (2013), isto pode ser um limitante para a estimativa da CSS a partir do backscatter corrigido, para diferentes frequências, pois o backscatter possui limitação para baixas concentrações (inferiores a 10mg.l<sup>-1</sup>).

A partir da relação proposta por Gartner (2002), entre valores de CSS observada e valores de backscatter corrigido, obteve-se modelos para estimativa da CSS com coeficientes de determinação de 0,44, e 0,43 nas seções 1 e 2, respectivamente. Ao aplicar-se o fator de porcentagem do viés (PBIAS) para sedimentos, proposto por Moriasi *et al.* (2007), observou-se o enquadramento dos modelos nas faixas “Bom”, e “Muito Bom”, para as seções 1 e 2, respectivamente. Esses resultados indicam a eficácia do modelo em estimar a CSS nas seções.

Esses resultados permitiram a construção de séries históricas de  $CSS_{estimada}$  utilizando apenas dados de *backscatter* coletados pelo ADCP estático instalado na margem, de ambas as seções.

Com isso, aceita-se a hipótese sugerida inicialmente.

## **5.2 Sugestões**

A falta de estudos utilizando equipamentos acústicos do tipo estático em canais naturais, de forma geral no Brasil, traz grandes desafios e destaques ao trabalho aqui realizado. Entretanto, perceberam-se no decorrer dos estudos algumas carências.

Identificou-se a necessidade de um número maior de amostragens de sedimentos em ambas as seções, sugerindo que este monitoramento iniciado seja continuado, pois a amplitude de dados de entrada, obtido *in loco* pode contribuir para a melhora e adequação dos modelos de estimativa.

As falhas geradas pelo ADCP estático instalado na seção 1 – Pelotas, causadas pelo desprendimento do equipamento da estrutura de fixação por diversas vezes, sugerem a substituição ou manutenção definitiva das estruturas, para que a perda de dados não ocorra novamente.

## Referências

- ALVAREZ, L. G.; JONES, S. E. Factors influencing suspended sediment flux in the upper gulf of California. **Coastal and Shelf Science**. p. 54, 2002.
- ANA – Agência Nacional de Águas (Brasil). **Conjuntura dos recursos Hídricos no Brasil 2019: informe anual / Agência Nacional de Águas**. Brasília, p. 100. 2019.
- ANA.; Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico. **Agência Nacional de Águas**. Ed.2.; p. 94. 2014.
- ARAÚJO, C. C.; MARQUES, J. A. V.; NETO, A. R. S.; DOURADO, J. C.; MACHADO, R. N. S.; ESTUDO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO TAQUARUÇU GRANDE (TO). **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Curitiba – PR, Brasil. 2003.
- ÁVILA, R. A.; MÖLLER Jr, O. O.; ANDRADE, M. M.; Uso do ADCP para Estimar Concentrações de Material Particulado em Suspensão para o Estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 19 n. 2, p. 10. 2014.
- BACK, A. J.; **HidroSedimentos, Versão 3.1**. 2011.
- BACK, A. J.; OLIVEIRA, J. L. R.; HENN, A.; BONETTI, A. V.; Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**. Brasília. Cap. 3, p. 49-64. 2011.
- BOLDT, J. A.; “**From mobile ADCP to high-resolution SSC: a cross section calibration tool,**”. Proceedings of the 3rd Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Reno, Nevada, p.3.2015.
- BONCZYNSKI, Reginaldo Galski. **MODELAGEM GEOMÉTRICA DO CANAL SÃO GONÇALO ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geoprocessamento), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.
- BORTOLUZZI, E. C.; PETRY, C.; **Ambiente e Sedimentos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre. Cap. 1, p1-38. 2008.
- BURNS, M. D. M. **Consequências da barragem eclusa do Canal São Gonçalo para a ictiofauna do Sistema Patos - Mirim**. 2010. 148 f..Tese(doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande, 2010.
- CABRAL, H. C. B.; **UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV) PARA AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO**.2014, p. 78. Mestrado (Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CABRAL, H. C.; SANAGIOTTO, D. G.; PAIVA, J. B. D.; Estimating Suspended Sediment Concentration using an Acoustic Doppler Velocimeter. **HOLOS ENVIRONMENT**. v. 19, n. 3. p. 320-337. 2019.

CAPITOLI, R. R.; BENVENUTI, C. E.; GIANUCA, N. M. Ocorrência e observações bioecológicas do caranguejo *Metasesarma rubripes* (Rathbun) na região estuarina da Lagoa dos Patos. **Atlântica**, 1977, v. 2., n. 1.; p. 50-62. 1977.

CARVALHO, N. O.; Hidrossedimentologia prática. CPRM – Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. ELETROBRAS. Rio de Janeiro, RJ. p. 372. 1994.

CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W.; GUIA DE PRÁTICAS SEDIMENTOMÉTRICAS. **Agência Nacional de Energia Elétrica** - Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília, DF. p. 116. 2000a.

CARVALHO, N. O.; HORA, M. A. G. M. da.; **Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas – Volume 1**/Organizado por Cristiano Poletto. ABRH, Porto Alegre. p. 218. 2014.

CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W.; GUIA DE AVALIAÇÃO DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS. **Agência Nacional de Energia Elétrica** -Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília, DF. p. 107. 2000b.

CLM – Comissão da Lagoa Mirim. **Barragem do São Gonçalo: estudo preliminar de viabilidade**. Vol. 1; p. 46. 1970.

COLBY, B. R.; **Relationship of Sediment discharge to Streamflow**. Open File Report, Prepared by Quality of Water Branch. p. 170,1956

CREED, E. L.; PENCE, A. M.; RANKIN, K. L. Inter-comparison of turbidity and sediment concentration measurements from an ADP, an OBS-3, and a LISST. Proc. Oceans. **Holland Publications**. Escondido, CA – EUA, p. 1750.2001.

DAVIDE, V.; PARDOS, M.; DISERENS, J.; UGAZIO, G.; THOMAS, R.; DOMINIK, J.; Characterization of bed sediments and suspension of the river Po (Italy) during normal and high flow conditions. **Water research**. 37, p.2847-2864. 2003.

DEINES, K. L. **Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers**. RD Instruments, San Diego. USA. 1999.

DNAEE. **Normas e recomendações hidrológicas**. Anexo III – Sedimentometria. 1970.

DOMANSKI, M. M.; STARUB, T. D.; WOOD, M. S.; LANDERS, M. N.; WALL, G. R.; BRADY, S. J.; **Surrogate analysis and index developer (SAID) tool and real-time data dissemination utilities**.Conference Paper. Reno, Nevada – EUA, p. 12. 2015

DORNELLES, A. M.; **UTILIZAÇÃO DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRENTES POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS)**. 2009, p. 127. Mestrado (Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal DO Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DUAN, N.; Smearing Estimate: A Nonparametric Retransformation Method. **Journal of the American Statistical Association**. Vol. 78, p. 5.1983

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D.; **Field methods for measurement of fluvial sediment**. Open-file report - USGS. Reston, Virginia. USA. p. 86-531 1988.

GAMARO, P. E.; **Estimando carga de sedimentos com medidores acústicos Doppler. Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas – Capítulo 3**. Porto Alegre: ABRH. Volume 1, p. 218.2014.

GAMARO, P. E.; **Medidores Acústicos Doppler de Vazão. Itaipu Binacional**. Foz do Iguaçu, p. 164. 2012.

GARTNER, J. W. Estimation of suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background. In: **Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop**. Reno, NY, USA. p. 3. 2002.

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

GRAY, J. R.; MELIS, T. S.; PATIÑO, E.; LARSEN, C.; TOPPING, D. J.; RASSMUSSEN, P. P.; ALAMO, C. F.; **U.S Geological Survey Research on Surrogate Measurements for Suspended Sediment**. p. 7. 2003.

GOTVALD, A. J. e OBERG, K. A. Acoustic Doppler Current Profiler applications used in rivers and estuaries by the U.S. Geological Survey: **U.S. Geological Survey Fact Sheet**, 2008–3096, 4 p. 2008.

HOSSEINI, S. A.; SHAMSAI, A.; ATAIE-ASTIANI, B.; Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an acoustic Doppler velocimeter. **Elsevier, Flow Measurements and Instruments**. p. 59-68. 2005.

JAY, D. A.; ORTON, P. Horizontal transports and vertical fluxes in estuaries. **Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference**. p. 258-263. 1999.

Kobiyama, M.; Mendonça, M.; Moreno, D. A.; Marcelino, I. P. O.; Marcelino, E. V; Gonçalves, E. F; Brazetti, L. L. P.; Goerl, R. F.; Moller, G. S. F.; Rudorff, F. M. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos. 1ª ed. Curitiba: Organica Trading**, 2006. v. 1. 109p. 2006.

LANDERS, M. N.; STRAUB, T. D.; WOOD, M. S.; DOMANSKI, M. M.; Sediment acoustic index method for computing continuous suspended sediment concentration. **U.S Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. C5**. p. 63. 2016.

LATOSINSKI, F. G.; SZUPIANY, R. N.; GARCÍA, C. M.; GUERRERO, M.; AMSLER, M. L.; Estimation of Concentration and Load Suspended Bed Sediment in a Large River by Means of Acoustic Doppler Technology. **Journal of Hydraulic Engineering**. American Society of Civil Engineers. p. 15. 2014.

LEVESQUE, V. A.; OBERG, K. A. Computing discharge using the index velocity method: **U.S. Geological Survey Techniques and Methods** (3-A23). p. 148. 2012

LIMA, L. S. **ESTIMATIVA DE VAZÕES PARA O CANAL SÃO GONÇALO, DO SISTEMA LAGUNAR PATOS-MIRIM -RS, ATRAVÉS DO MÉTODO DAS VELOCIDADES INDEXADAS**. 2016, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

MAYERLE, R.; POERBANDONO, W. C. **Effectiveness of acoustical backscatter profiler in the estimation of suspended sediment concentration**. Report n° 16. Coastal Engineering Laboratory, Institute of Geosciences, Cristian Albrechts University. Kiel, Germany. 2002.

MERTEN, G.; POLETO, C.; **Qualidade dos Sedimentos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre, 1ª edição, p. 397. 2006.

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R.; REHMEL, M. S.; OBERG, K. A.; RAINVILLE, F.; Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ed. 2). **U.S. Geological Survey Techniques and Methods**. p. 95. 2013.

NOSCHANG, A. A. **ESTIMATIVA DE DESCARGA LÍQUIDA DO CANAL SÃO GONÇALO NA REGIÃO DE DESEMBOCADURA DA LAGOA MIRIM, EXTREMO SUL DO BRASIL, UTILIZANDO O MÉTODO DAS VELOCIDADES INDEXADAS**. 2018, 53p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.

MARCONDES, C. R. **Estudo de descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. Dissertação (Mestrado), 78 p. Universidade Federal de Itajubá, 2011.

MEDALIE, L.; CHALMERS, A. T.; KIAH, R, G.; COPANS, B.; Use of acoustic backscatter to estimate continuous suspended sediment and phosphorus concentrations in the Barton River, northern Vermont, 2010–2013. **U.S. Geological Survey Open-File Report – 1184**, p. 29. 2014.

MEDRONHA, G. D. A. BIGLIARDI, I. M.; SOUZA, M. F.; BONCZYNSKI, R.; DÉCIO JR., R.; SUZUKI, L. A.S.; PRÁ, M. D.; COLLARES, G. L.; Avaliação Da Qualidade Da Água Do Canal São Gonçalo-Rs Através Do Índice De Qualidade De Água. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, p. 1–8. 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of

Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; COSTAS, M. F. T.; SANTOS, F. A. Concentração de sedimentos em suspensão em uma pequena bacia hidrográfica em urbanização. **Anais XXI Congresso Brasileiro de Engenharia de Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, RJ. 2001.

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

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

SCHUCK, A. **UTILIZAÇÃO DO ACOUSTIC DOPPLER PROFILER (ADP) PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) E TURBIDEZ**. 2013, p. 98. Mestrado (Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B.; Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas. *RiMa*. São Carlos, SP. p. 158. 2003.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO, E. M. Processos Erosivos. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, In: PAIVA, J. B. D.

SIMPSON, Michael R. **Discharge Measurement Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler**. USGS Open File. Sacramento, EUA. Report 01-1. p. 134. 2001.

SIVIEIRO, M, R, L.; COIADO, E. M.; Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: transport condition at the bankfull and effective discharge?. *Geomorphology*. p.243-262. 1999.

SONTEK (a). **Argonaut-SL System Manual**. San Diego, EUA: Abril, 2009.

SONTEK (b). **SonTek-SL Serier SIDE-LOOKING DOPPLER CURRENT METERS**. San Diego, EUA. 2014.

SOUZA, M. F.; **Qualidade da água do Canal São Gonçalo-RS/Brasil: uma avaliação hidroquímica considerando seus usos múltiplos**. 2015.105 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 2015.

STRAUB, T.; DOMANSKI, M.; WOOD, M.; LANDERS, M.; **“Sound” Sediment Science - A Training Course to Augment USGS Course H-17-037, Acoustic Index Method for Estimating Fluvial Suspended Sediment and USGS Techniques and Methods**. Report 3C-5. Treinamento. 2018.

- THORNE, P. D.; MERAL, R.; Formulation for the scattering properties of suspended sandy sediments for use in the application of acoustics to sediment transport process. **Continental Shelf Research**. p. 309-317. 2007.
- TOMAZELLI, L.J; VILLWOCK, J.A. **Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo do Rio Grande do Sul**. Gravel, 3, p.109-115. 2003.
- URICK, R. J.; Principles of Underwater Sound, 3<sup>rd</sup> edition. **Peninsula Pub**. Published in 1996. p. 444. 1975.
- VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. New York: ASCE(Manual and Reports on Engineering Practice, 54). p.745. 1977.
- Vestena, L. R.; Lucini, H.; Kobiyama, M. **Avaliação da Concentração de Sedimento em Suspensão no Rio Caeté, em Alfredo Wagner/SC**. VII SINAGEO. 2008.
- WALL, G. R.; NYSTROM, E. A.;LITTEN, S. Use of an ADCP to compute suspended sediment discharge in the Tidal Hudson River, New York. **Scientific Investigations Report**. 2006.
- WOOD, M. S.; FORNESS, R. L.; ETHERIDGE, A. B.; **Sediment transport and evaluation of sediment surrogate ratings in the Kootenai River near Bonners Ferry, Idaho, water years 2011-14**. U.S Geological Survey Scientific Investigations Report – 5169, p. 48. 2015.
- WOOD, M. S.; TEASDALE, G. N.; Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10. **U.S Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5052**. p. 30. 2013.
- WOOD, M. S.; Estimating suspended sediment in rivers using acoustic Doppler meters. **U. S. Geological Survey Fact Sheet 2014-3038**. p. 4. 2014.
- WOOD, M. S.; SZUPIANY, R.; BOLDT, J.; STRAUB, T.; DOMANSKI, M.; **Measuring Suspended Sediment in Sand-Bedded Rivers Using Down-looking Acoustic Doppler Current Profilers**. 2018.
- WREN, D. G.;KUHNLE, R.; CHAMBERS, J.; BARKDOLL, B. 2001. Field techniques for suspended-sediment measurement. **Journal of Hydraulic Engineering**. p. 97-104. 2001.
- XAVIER, B. C.; SILVA, I. O.; GUIMARÃES, L. G.; GALLO, M. N.; RIBEIRO, C. P.; FIGUEIREDO JR, A. G. Estudo experimental e numérico para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio de sinais de espalhamento acústico. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS – ENES**, 10., 2012. Anais... Foz do Iguaçu, PR. Brasil, 2012.