

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Curso de Engenharia Hídrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estimativa de descarga líquida do Canal São Gonçalo/RS na região de desembocadura da Lagoa Mirim, extremo sul do Brasil, utilizando o método das velocidades indexadas

Anderson Andrei Noschang

Pelotas, 2018

Anderson Andrei Noschang

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

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Hídrica, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares – UFPel

Coorientador: Guilherme Kruger Bartels

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N897e Noschang, Anderson Andrei

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 / Anderson Andrei Noschang ; Gilberto Loguercio Collares, orientador ; Guilherme Kruger Bartels, coorientador. — Pelotas, 2018.

53 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) — Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Velocidades indexadas. 2. Canal São Gonçalo. 3. Perfilador acústico. 4. Side-looking. 5. Vazão. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Bartels, Guilherme Kruger, coorient. III. Título.

CDD : 627

Anderson Andrei Noschang

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

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 01/08/2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

MSc. Augusto Muniz Cavalcanti
Mestre em Bioecologia Aquática pela Universidade Federal de Rio Grande do Norte

MSc. Roberta Machado Karsburg
Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

Agradeço a minha família, em especial minha mãe Angela, pelo amor dado durante estes anos, pelo apoio em todas minhas decisões e incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Agradeço a todos os meus professores por me despertarem o fascínio pela área da ciência exata e da terra. Em especial aos professores Idel Milani e Luis Suzuki, a calorosa recepção no curso e carinho dedicado foram determinantes ao meu envolvimento na graduação.

Ao meu professor e orientador Gilberto Collares, pelas oportunidades, incentivo, amizade e confiança.

Ao meu coorientador Guilherme Bartels, pelo tempo dedicado, amizade e ajuda durante todo este processo.

Agradeço ao técnico em hidrologia e amigo Reginaldo Bonczynski, que esteve sempre disponível em ajudar e não mediu esforços nisso.

A todos os meus amigos e colegas de curso, pelo bom tempo de aprendizagem e entretenimento que passamos juntos, foi uma época ímpar.

À minha namorada Barbara, que me estimulou durante todo esse tempo e pela compreensão de minha ausência pelo tempo dedicado aos estudos.

À FAPERGS pelo suporte através da concessão de bolsa.

Ao grupo NEPE-HidroSedi pela parceria, aprendizado e ajuda de todos.

Resumo

NOSCHANG, Anderson Andrei. **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 (Graduação em Engenharia Hídrica), Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

A obtenção de dados hidrológicos com qualidade e com resolução espaço-temporal adequada é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos e o desenvolvimento de projetos em diversos segmentos da economia como: agricultura, transporte, energia e meio ambiente. Neste contexto, a medição de vazão é essencial, pois quantifica os potenciais hídricos e possibilita a correta tomada de decisões para a bacia hidrográfica. Sua obtenção se dá de forma indireta e sua estimativa emprega metodologias de baixo custo, como é o caso da curva-chave, a qual baseia-se em sucessivas medições de vazão associadas a uma determinada cota em uma dada seção de um rio. Entretanto, este método não se demonstra adequado a todas as condições observadas no ambiente natural, sendo assim, quando a relação de linearidade entre a cota e a vazão não apresenta validade, observando-se para um mesmo nível diferentes valores de vazão ou fluxo bidirecional, é necessário utilizar uma metodologia mais adequada. Deste modo, para a obtenção da descarga líquida para seções do Canal São Gonçalo, no extremo sul do Brasil, local do presente estudo, utilizou-se o método das velocidades indexadas, que através de duas equações relaciona a estimativa da velocidade média da água e da área molhada da seção transversal. Para estabelecer a relação, foi necessária a instalação de um equipamento com tecnologia acústica de efeito Doppler *Side-Looking* de 500 KHz, fixado à margem esquerda do Canal, que permitiu o monitoramento contínuo e permanente de velocidades do fluxo e observação dos respectivos níveis d'água. Através da equação da continuidade estimou-se a efetiva vazão da seção de controle. Este estudo abrangeu 10 campanhas de medição de vazão no período de 06/03/18 a 06/06/18 e observou-se medidas de velocidade média da água variando de $0,348 \text{ m.s}^{-1}$ a $-0,251 \text{ m.s}^{-1}$. Através das estimativas realizadas neste estudo, observou-se condições de fluxo inverso no canal São Gonçalo, através da medida de vazões negativas, assim como a forte influência do vento sob o escoamento, ao cruzar dados da estação hidrometeorológica localizada ao lado do posto fluviométrico.

Palavras-chave: velocidades indexadas; canal São Gonçalo; perfilador acústico; side-looking; vazão;

Abstract

NOSCHANG, Anderson Andrei. **Estimate of water discharge in São Gonçalo Channel in the mouth of Lagoon Mirim, in the extreme South of Brazil, using the index-velocity method.** 2018. 53p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Hídrica), Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

Obtaining high quality hydrological data with an adequate space-time resolution is fundamental for the management of water resources and the development of projects in various segments such as agriculture, transportation, energy and the environment. In this context, the measurement of flow rate is essential, as it quantifies the water potential and allows to take the correct decision for a given hydrographic basin. This measurement is obtained indirectly and its estimate uses low-cost methodologies, such as the rating curve method, which is based on successive flow measurements associated to a quota in a given section of a river. However, this method is not suitable for all conditions observed in the natural environment, so when the linearity relationship between the water flow and its given quota is not valid, and different values of flow or bidirectional flow are observed at the same level, it is necessary to use a more appropriate methodology. Thus, to obtain the water discharge of the São Gonçalo Channel sections, in the extreme south of Brazil, location chosen for the present study, the indexed velocity method was used, which through two equations relates the estimate of mean water velocity and of the wet area of the cross section. To establish a relationship, it was necessary to install a 500 KHz Side-Looking Doppler effect equipment fixed at the Channel left margin, which allowed the continuous and permanent monitoring of flow velocities and observing of respective water levels. Through the continuity equation we estimated the effective water flow of the control section. This study covered 10 flow measurement campaigns from 06/03/18 to 06/06/18, observed mean water velocity ranging from $0,348 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $-0,251 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Based on the estimates made in this study, it was observed reverse flow conditions in the São Gonçalo channel, through the measurement of negative flows, as well as the strong influence of the wind under the flow, when crossing data of the hydrometeorological station located next to the fluvimetric station.

Key-words: index-velocity; São Gonçalo channel; acoustic doppler current profile; side-looking; water discharge

Lista de Figuras

Figura 1 - Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim.	13
Figura 2 - Barragem Eclusa do canal São Gonçalo/RS.	15
Figura 3 - Representação de perfis verticais de velocidades em diferentes condições de escoamento.	17
Figura 4 – Perfil vertical de velocidades em uma medição de vazão com ADCP	17
Figura 5 – Ilustração do transdutor emitindo um pulso acústico e este sendo retroespalhado.	21
Figura 6 – Ângulo formado a partir da medição das componentes de velocidades da água em relação a direção do pulso acústico.	22
Figura 7 – Ilustração do mapeamento realizado pelo ADCP do perfil vertical de velocidades na seção transversal.	23
Figura 8 – Ilustração dos vetores e componentes para cálculo da vazão em uma célula (bin).	23
Figura 9 – Ilustração das áreas não medidas pelo ADCP.	24
Figura 10 – Ilustração de um equipamento acústico estático instalado.	24
Figura 11 – Ilustração do funcionamento dos equipamentos acústicos estáticos.	25
Figura 12 – Perfilador acústico móvel M9 – SONTEK acompanhado do Módulo de Comunicação e Energia (PCM) e a antena GPS.	27
Figura 13 – Ilustração de um ADCP embarcado em funcionamento.	28
Figura 14 – Ilustração de um equipamento estático instalado e os feixes emitidos pelos transdutores.	29
Figura 15 - Estação hidrometeorológica localizada ao lado do posto fluviométrico. .	32
Figura 16 – Localização do posto fluviométrico na localidade de Santa Isabel - Arroio Grande/RS.	32
Figura 17 – Trapiche construído para fixação do SL500 e a estação com datalogger.	33
Figura 18 - Estrutura metálica instalada para fixação do SL500.	33
Figura 19 – Movimentos possíveis e praticáveis durante a calibração da bússola do ADCP M9.	35
Figura 20 - Perfil de velocidades da medição de vazão do dia 11/04/18	39

Figura 21 – Tela exibida pelo programa RiverSurveyor Live após o teste estacionário de fundo móvel.....	41
Figura 22 – Levantamento topobatimétrico da seção transversal.....	43
Figura 23 – (a) Gráfico que relaciona a área gerada a partir da cota registrada no SL500. (b) Gráfico gerado a partir das velocidades em x registradas pelo SL500 no momento da medição das velocidades com o ADCP M9.....	43
Figura 24 – Gráfico de vazões estimadas obtidas a partir do Método das Velocidades Indexadas e vazões observadas no momento da medição com o ADCP M9.	45
Figura 25 – Reconstituição da série de vazões do canal São Gonçalo na localidade de Santa Isabel – Arroio Grande/RS.....	46
Figura 26 – Análise do comportamento das vazões diante as condições do vento. .	48

Lista de abreviaturas e símbolos

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ADVM	<i>Acoustic Doppler Velocity Meter</i>
<i>Blanking Distance</i>	Região da seção de medição que o equipamento acústico não consegue medir
<i>Bottom-Traking</i>	Método usado para medir a velocidade do barco
DGPS	<i>Differentially Corrected Global Positioning System</i>
DMG	<i>Distance Made Good</i>
<i>Ensemble</i>	Média de um conjunto de <i>pings</i> para obter o perfil de velocidades da água e/ou a velocidade do barco
GGA	Mede a velocidade do barco com base nos dados de posição do GPS
GPS	<i>Global Positioning System</i>
<i>Pings</i>	Pulsos acústicos de uma frequência conhecida
<i>Pitch</i>	Inclinação do aparelho no sentido longitudinal do barco
<i>Roll</i>	Inclinação do aparelho no sentido transversal do barco
<i>Side-Lobe</i>	Dispersão do sinal fora do feixe principal
Transdutores	Emissores de ondas sonoras do equipamento acústico
USGS	<i>United States Geological Service</i>
VTG	Mede a velocidade do barco baseado nos dados de velocidade do GPS

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Objetivo	13
2	Revisão de literatura	13
2.1	Caracterização do ambiente de estudo	13
2.2	Hidrodinâmica Fluvial	16
2.3	Métodos para medição de vazão fluvial	18
2.4	Tecnologia <i>Doppler</i> para medição de vazão	19
2.4.1	Classificação dos equipamentos	19
2.4.2	Princípio de funcionamento	20
2.4.3	Equipamentos acústicos utilizados	27
2.4.4	Sistemas de referenciamento com equipamentos acústicos móveis	29
2.4.5	Erros e Incertezas nas medições	30
3	Materiais e métodos	31
3.1	Local das medições	31
3.2	Equipamentos acústicos utilizados	34
3.3	Calibração da bússola do equipamento acústico dinâmico	34
3.4	Teste de fundo móvel (FM)	35
3.5	Método das Velocidades Indexadas	36
3.6	Análise de incerteza das equações	37
4	Resultados e discussão	38
4.1	Medições em campo	38
4.2	Estimativa do efeito de fundo móvel	41
4.3	Aplicação do método das velocidades indexadas	42
4.4	Validação das equações	44
4.5	Reconstituição da série de vazões	45
5	Conclusão	49
6	Recomendações	50
	Referências	51
	Apêndices	54

1 Introdução

A vida, em todas suas formas é regida pela disponibilidade de água no planeta. A humanidade desde os seus primórdios enfrenta problemas causados tanto pela falta, quanto pelo excesso desse recurso. Com o intuito de compreender as variáveis hidrológicas responsáveis pela ação da natureza, o homem através da observação dos fenômenos ligados aos movimentos das massas de água, criou métodos empíricos para entender e controlar essas forças, no entanto eram técnicas rudimentares. Com o avanço da civilização e da tecnologia foi possível que cientistas desenvolvessem estruturas, com base teórica fundamentada nas leis primárias da física e matemática, em forma sistemática, expressando equações, modelos matemáticos e computacionais, capazes de quantificar os recursos hídricos, contribuindo de forma significativa para que as soluções necessárias à vida no planeta pudessem ser melhores entendidas e controladas pelo homem.

Para realizar a quantificação dos recursos hídricos no planeta é estabelecida como a unidade de observação a bacia hidrográfica, sendo a área responsável por drenar a água oriunda da chuva. É uma estrutura com base geográfica, se estabelece como unidade de planejamento, entendida como um sistema aberto, resultante da interação das ações humanas com elementos e formas do meio físico (PINTO; AGUIAR NETTO, 2008).

Do ponto de vista da hidráulica fluvial, os rios e canais podem ser definidos como cursos d'água fluentes sob superfície livre, ou seja, a água que escoar sobre a calha está sob influência da pressão atmosférica, sofrendo variações nos níveis d'água (cota) no espaço-tempo (SILVA, 2007).

Com a finalidade de caracterizar um escoamento, é necessário conhecer um conjunto de variáveis básicas, tanto hidrológicas (nível, velocidade da água, etc.), quanto morfológicas (a forma do fundo e largura do curso d'água). Para que isso seja possível, é fundamental estabelecer uma seção transversal ao curso d'água, para realizar o monitoramento permanente do fluxo e de suas condicionantes, permitindo um acompanhamento temporal nas mais diversas alterações ali ocorridas e, a partir dessas informações, gerar modelos hidráulicos e hidrológicos, capazes de estabelecer o manejo e os usos para uma referida área, entendida como bacia

hidrográfica. Esse diagnóstico pode favorecer a adequada gestão deste recurso, tornando-o compatível com as atividades ali desenvolvidas.

Vazão é a unidade de medida usada para quantificar toda a água da bacia hidrográfica que passa em uma seção de controle, normalmente é expressa no hidrograma unitário e representa o resultado do seu comportamento hidrológico. Sua obtenção dá-se de forma indireta e está associada a um custo considerável. Para facilitar a obtenção desse dado, é realizada a relação entre o nível e a vazão, ou seja, de acordo com o nível de água, que é obtido por meio de réguas linimétricas ou sensores de nível, é feita uma estimativa da vazão através de uma equação gerada para uma determinada seção de controle, dispensando as medições de velocidade após a determinação da relação.

O gráfico gerado pela relação entre a cota e vazão é denominada de curva de descarga, também conhecida como curva-chave. Em determinados casos essa relação não pode ser empregada, devido ao fato do curso d'água sofrer influência de outros condicionantes ou propriedades do próprio escoamento, observando para um mesmo nível, diferentes valores de vazão ou fluxo bi-direcional. Quando essa relação de linearidade não é válida é inevitável o uso de outras metodologias e técnicas para estabelecer uma relação que represente o escoamento de maneira correta.

Uma das técnicas que vem sendo empregadas com mais frequência atualmente é o método das velocidades indexadas, que consiste em estabelecer uma relação entre a velocidade média da seção transversal e a velocidade de uma sub-área (MORLOCK; SCHMIDT, 1996, 2004, *apud* GAMARO, 2012). Com isso, se a velocidade da sub-área puder ser medida continuamente, após ter obtido uma relação com a velocidade média de toda seção, através de medições de vazão, é possível ter o controle contínuo da vazão em uma determinada seção (GAMARO, 2012).

Segundo Tucci (2004) a quantificação da disponibilidade hídrica é usada como base para o projeto e planejamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, os estudos e gerenciamento de bacias hidrográficas dependem da disponibilidade de dados hidrológicos consistentes, representativos e com adequada resolução espaço-temporal a cada tipo de aplicação (VILANOVA; BALESTIERI, 2013). Deste modo, garantir a qualidade dos dados coletados em campo é vital para a geração de informações confiáveis.

1.1 Objetivo

Esse estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do Método das Velocidades Indexadas na estimativa de vazões no canal São Gonçalo, na localidade de Santa Isabel, região da desembocadura da lagoa Mirim.

2 Revisão de literatura

2.1 Caracterização do ambiente de estudo

A bacia hidrográfica da Lagoa Mirim (Figura 1) possui área de 62.250 Km², dos quais 29.250 km² (47%) encontra-se em território brasileiro e 33.000 km² (53%) em território uruguaio. É, portanto, considerada uma bacia hidrográfica transfronteiriça e sobre a qual prevalece o regime de águas compartilhadas (segundo o Tratado de Limites, assinado em 1909, e o Tratado da Lagoa Mirim, assinado em 1977).

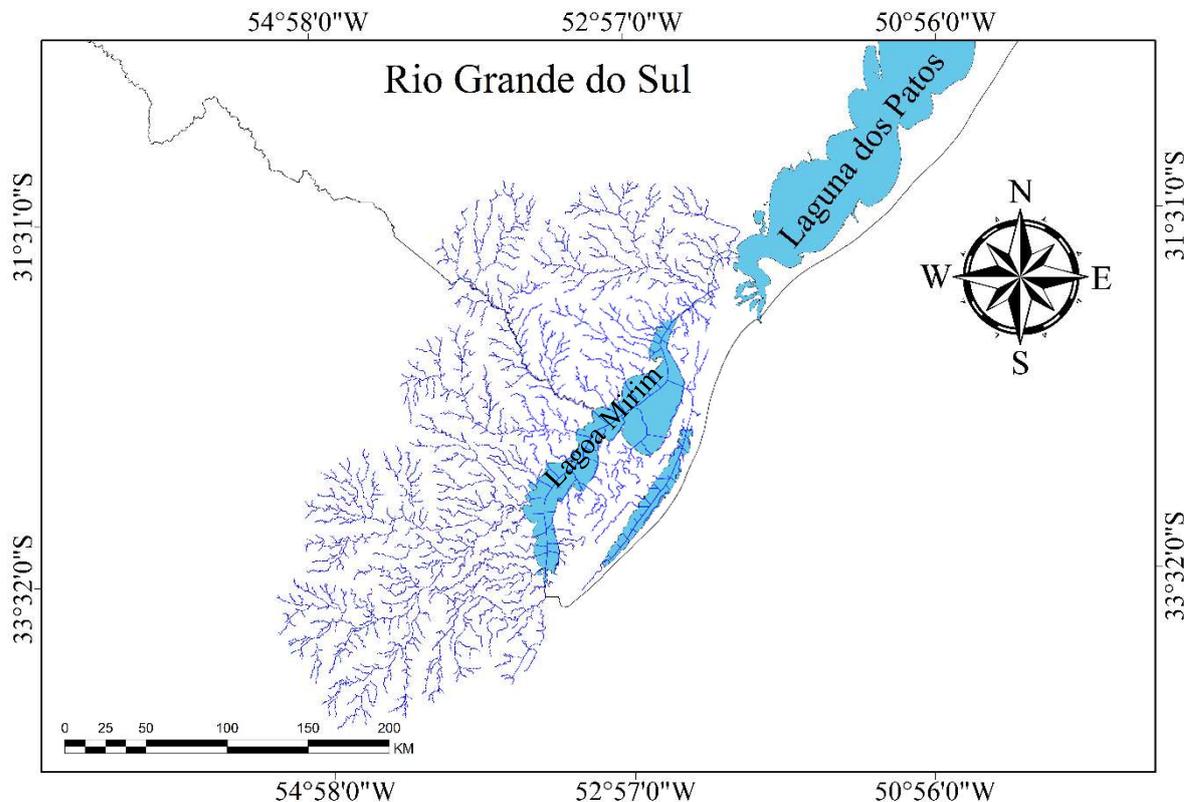


Figura 1 - Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim.

Trata-se de uma importante bacia hidrográfica do ponto de vista da preservação e conservação da sua biodiversidade da fauna e flora, pois é mantida como ponto de pouso, descanso e nidificação de aves migratórias.

A Lagoa Mirim funciona como um enorme reservatório de amortecimento dos seus contribuintes, como o Canal São Gonçalo que devido suas condições geométricas nunca teve a capacidade para descargas superiores a 4 mil $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (DELLAZOPPA, 2010).

Segundo a Agência da Lagoa Mirim (2018) a região apresenta um clima subtropical, com precipitações médias anuais variando de 1.200 mm, ao sul, até 1.450 mm ao norte, com temperaturas médias mensais que variam entre 25° em janeiro a 11° em julho, com valores absolutos extremos entre – 8° e 44 °C.

O canal São Gonçalo sofre influência na variação do seu nível d'água, devido a oscilação dos níveis da laguna dos Patos e lagoa Mirim, das condições de fluxo do rio Piratini, da ação dos ventos e do regime pluvial dessa macrorregião (HARTMANN *et al.*, 1986; MÖLLER *et al.*, 2001; MONTEIRO *et al.*, 2005).

Devido ao canal ligar a Laguna dos Patos com a Lagoa Mirim, exerce a função de vaso comunicante entre as lagoas, fazendo com que os níveis d'água tendam a um equilíbrio.

Segundo Hartmann *et al.* (1986) os ventos de direção NE (Nordeste) causam o represamento ou a diminuição da vazão do canal São Gonçalo, já os ventos de direção sudoeste (SO) e sudeste (SE) favorecem o seu escoamento.

Hartmann e Harkot (1998) destacam que em períodos de estiagem, o fluxo do canal que normalmente ocorre no sentido Lagoa Mirim – Laguna dos Patos pode ser invertido. Devido ao canal ter ligação indireta com o oceano e, nos períodos que os níveis das águas das duas lagoas reduzem demasiadamente, permite a intrusão salina para o Canal São Gonçalo e deste para a Lagoa Mirim (CAPÍTOLI *et al.*, 2008).

Localizada a aproximadamente 15 Km da Laguna dos Patos, a barragem eclusa (Figura 2) que opera desde o ano de 1977, tem como o objetivo controlar o nível e o ingresso da água salina em aproximadamente 80% do canal São Gonçalo e em toda a área da Lagoa Mirim (GOUVÊA *et al.*, 2010).

Ao impedir a salinização através do barramento, é garantido o papel fundamental de preservação dos usos múltiplos da água (irrigação, abastecimento humano, navegação, dessedentação animal, etc.). Contudo, o sistema de operação

da Barragem Eclusa fez com que o regime natural do canal fosse modificado, tornando ainda mais complexo o seu estudo.



Figura 2 - Barragem Eclusa do canal São Gonçalo/RS. Fonte: Fly Camera

A barragem Eclusa é gerenciada pela Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (ALM) e constituída de 18 comportas basculantes com 12 m de largura e pouco mais de 3 m de altura. Na margem esquerda do canal, foi construída uma eclusa, com 120 m de comprimento, 17 m de largura e 5 m de profundidade. Nas duas cabeceiras estão localizados os portões basculantes com 17 m de largura e 8 m de altura, bem como as comportas de *by-pass* que equalizam os níveis dentro da eclusa permitindo a passagem das embarcações em quaisquer circunstâncias, interligando uma hidrovia de grande potencial econômico entre o Brasil e Uruguai, chamada de hidrovia Uruguai-Brasil.

2.2 Propriedades básicas dos cursos d'água

Segundo Porto (2006), os canais podem ser classificados como *naturais*, que são os cursos d'água já existentes na natureza, como as pequenas correntes, córregos, rios, estuários, etc., ou *artificiais*, de seção aberta ou fechada, construídos pelo homem, como canais de irrigação, de navegação, aquedutos ou galerias. No caso dos rios, estes escoamentos são provenientes de precipitações pluviais ou da contribuição de águas subterrâneas. Os canais artificiais, por sua vez, têm suas águas

oriundas da retificação de rios, assim como águas destinadas para irrigação ou abastecimento.

A **seção transversal** é a propriedade geométrica mais utilizada como referência de um curso d'água. Ela é obtida pela intersecção da calha do rio com um plano perpendicular à direção principal do escoamento. Diferentes dos canais artificiais, as seções transversais dos rios têm formas irregulares. Isso deve-se ao fato de que seu leito pode variar devido aos processos morfológicos naturais ou ações antrópicas.

Uma seção transversal é caracterizada pela *profundidade* (h) do seu escoamento, que é a distância vertical do fundo do canal até a superfície da água, pela *largura superficial* (B), sendo a largura medida na superfície livre, a *área da seção transversal* (A), sendo a área dessa seção, também denominada *área molhada*, o *perímetro molhado* (P), sendo a distância ao longo da seção transversal que está em contato com a água em escoamento e o *raio hidráulico* (R_h), que é definido como a razão entre a área da seção transversal pelo perímetro molhado (GRIBBIN, 2009).

Conhecendo essas variáveis é possível então gerar modelos hidráulicos e computacionais, a fim de caracterizar o escoamento para a seção transversal em estudo.

2.2 Hidrodinâmica Fluvial

O escoamento de água em condutos livres é caracterizado pela atuação da pressão atmosférica sobre a superfície do líquido, podendo variar a posição da linha d'água no espaço e no tempo em resposta, por exemplo, a alterações na sequência de vazões ocorridos à montante. Quando essa variação ao longo do tempo se manter constante, denomina-se que o escoamento se encontra em **regime permanente**. A maior parte dos rios se encontra em **regime não-permanente**, apresentando um hidrograma com períodos de ascensão, seguido por períodos de recessão, podendo ser observados em ondas de cheias ou ondas geradas pela operação de usinas hidrelétricas.

Leopold e Maddock (1953) identificam três parâmetros importantes para estudar as propriedades do canal fluvial, que são a largura, profundidade e velocidade do fluxo. Estas são facilmente controladas em função de variáveis como o regime do

fluxo, descarga (vazão), declividade, propriedades físicas dos sedimentos, solo, clima, vegetação, dentre outros parâmetros da bacia de drenagem (LEWIN, 1978; BRIDGE, 2009).

De acordo com Santos *et al.*, (2001), no escoamento de um canal, em função de sua rugosidade do fundo, das margens, obstáculos localizados no fundo ou pela ação dos ventos, o perfil de velocidades na vertical pode apresentar-se de várias formas, por consequência das ações de tensões tangenciais, que fazem com que o fluxo tende a “frear”, como mostra a Figura 3.

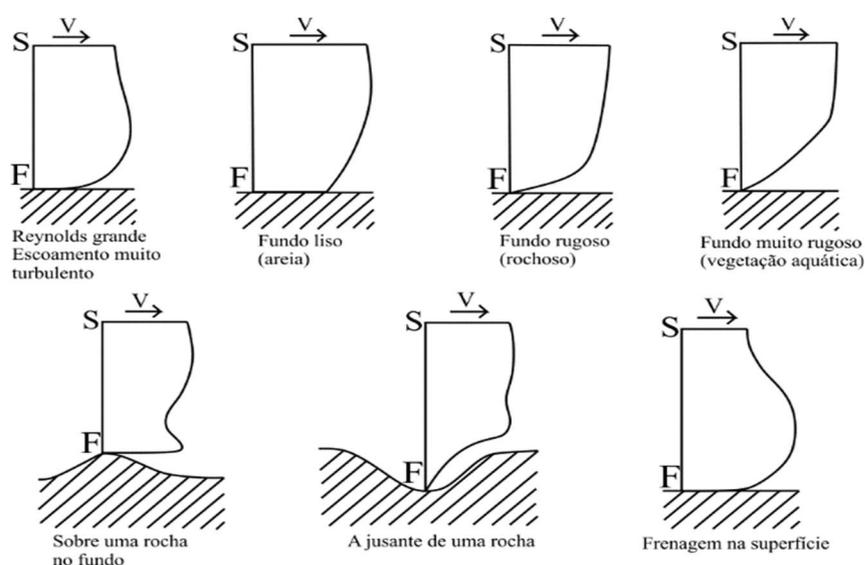


Figura 3 - Representação de perfis verticais de velocidades em diferentes condições de escoamento. Fonte: SANTOS *et al.*, 2001.

Por haver tais inferências, o perfil vertical das velocidades não se comporta uniformemente, o que pode ser observado na Figura 4 e, normalmente é substituída pela velocidade média do fluxo.

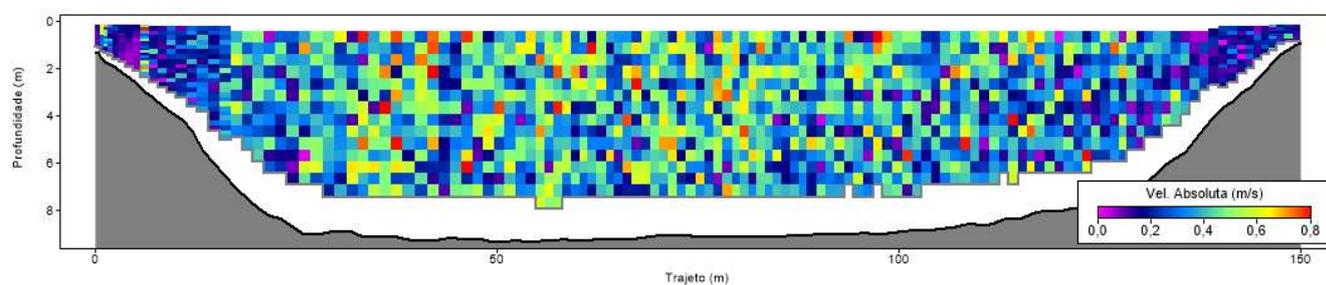


Figura 4 – Perfil vertical de velocidades em uma medição de vazão com ADCP, sendo possível observar a variação das velocidades ao longo da coluna d'água. As células (bins) de cores mais frias representam velocidades mais baixas, assim como as de cores mais quentes, velocidades mais altas.

2.3 Métodos para medição de vazão fluvial

O processo de medição de vazão é a mensuração de todo o volume de água que passa em uma seção transversal por unidade de tempo, no Sistema Internacional (SI), e é expressa em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e sua determinação está associada pelas variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo.

Embora existam mais métodos para a determinação de vazão, a Agência Nacional de Águas (ANA) em seu manual de medição de vazão em grandes rios cita os principais métodos utilizados nas medições, que são:

- a) medição e integração da distribuição de velocidade (método convencional);
- b) método acústico.

O método convencional é um processo mecânico e universalmente utilizado para a determinação da vazão. Consiste em representar a área da seção transversal, dividindo a largura do canal através de um número significativo de verticais e com o auxílio do molinete hidrométrico realizar medidas pontuais de velocidade ao longo da seção, assim como nas verticais, variando de acordo com a profundidade.

Cada molinete hidrométrico possui um certificado de calibragem contendo uma equação, que transforma o número de rotações por segundo em velocidade. Os coeficientes da equação mudam de acordo com o tipo de hélice usada, pois podem ser substituídas para diferentes faixas de velocidade do escoamento. Por fim, é realizado o processo numérico de cálculo (seção média ou meia seção), e a partir do somatório das áreas e das velocidades médias, estima-se a vazão.

O método acústico (doppler) para medição de vazão é muito utilizado em substituição ao método do molinete, devido a facilidade e praticidade de seu manuseio. No entanto, a aquisição de equipamentos doppler se torna inviável por certas empresas ou instituições, devido ao custo quando comparado com o molinete. Para se ter uma ideia de como o uso da tecnologia acústica mede vazão, Gamaro (2012) fez uma analogia com o método convencional, imaginando um conjunto infinito de molinetes colocados em uma vertical da seção de medição. A medida de velocidade que cada um dos molinetes efetuará será pontual, entretanto com a tecnologia doppler, passa-se a ter mais medidas de velocidades na área de cada célula criada no perfil.

2.4 Tecnologia *Doppler* para medição de vazão

Os primeiros testes envolvendo a tecnologia doppler para medição de vazão são realizados desde os anos 60, mesmo que não obtendo resultados significativos. Os estudos continuaram e em 1984 a USGS (*United States Geological Survey*) adquiriu o primeiro ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*), iniciando ainda de forma incipiente a prática da medição de vazão em rios, canais e estuários.

Com a necessidade de medições em canais de correntes bidirecionais, onde o método do molinete não era capaz de cumprir as exigências devido ao tempo demandado, a busca por medidores acústicos aumentou, pois é capaz de fornecer resultados de forma rápida, eficiente e segura. No entanto, exige cuidados ao ser utilizado, a fim de evitar distorções às vezes imperceptíveis, gerando dados não confiáveis.

Os equipamentos ADCP, além das aplicações mais conhecidas pela literatura como calibração de modelos hidrodinâmicos, monitoramento de correntes em reservatórios, perfis de velocidade em uma seção, velocidade indexada e estudos de hidráulica, podem ser aplicados também, na determinação de sedimentos em suspensão. Todavia, ainda é uma tecnologia sendo descoberta e há muito o que explorar de seus recursos.

2.4.1 Classificação dos equipamentos

Os primeiros equipamentos *Doppler* surgiram em ambiente de mar e oceano, desenvolvidos para medir correntes sem grandes turbulências e para isso ficavam presos em bóias ou estáticos no fundo. Com o avanço de sua tecnologia novas aplicações foram surgindo, permitindo medir ambientes mais dinâmicos.

Como não há uma classificação formal para estes aparelhos, Gamaro (2012) propôs classificar os equipamentos quanto:

- a) a instalação:
 - Dinâmicos (são instalados em barcos, catamarãs, etc);
 - Estáticos (são instalados nas margens, no fundo, em boias, etc);
- b) as frequências:

- Atualmente existem equipamentos com frequências de 150 KHz a 5 MHz, sabendo-se que, quanto menor a frequência, maior o alcance de varredura dentro da água;

c) os tipos de medição:

- Estáticos (podem medir o perfil de onde estão instalados, medem a velocidade apenas em um plano, medem um ponto ou perfilam tudo, dependendo do número de transdutores);

- Dinâmicos (medem a vazão, velocidade, batimetria e medem um ponto);

- Pontuais (medem em um único ponto, normalmente são utilizados em laboratórios para medição a vau como um molinete eletrônico acústico);

d) a orientação:

- Vertical (*Up*, *Down*), Horizontal ou inclinada;

2.4.2 Princípio de funcionamento

O efeito *Doppler*, descoberto pelo austríaco Christian Johann Doppler que o descreveu teoricamente no ano de 1842, é um fenômeno físico natural que consiste na alteração da frequência sonora percebida pelo observador em virtude do movimento relativo de aproximação ou afastamento entre a fonte e o observador.

Os medidores de vazão que utilizam o efeito *Doppler*, medem a velocidade da água utilizando o som, que são ondas de pressão omnidirecionais que viajam através de gases, líquidos e sólidos. O equipamento emite ondas sonoras em uma frequência pré-estabelecida, fazendo vibrar seus pequenos elementos cerâmicos (transdutores), ao passar por eles uma corrente elétrica (GAMARO, 2012). As partículas (sedimentos e plânctons) carregadas pela água em suspensão, refletem o som de volta para o aparelho que “escuta” o eco por meio dos mesmos sensores (Figura 5).

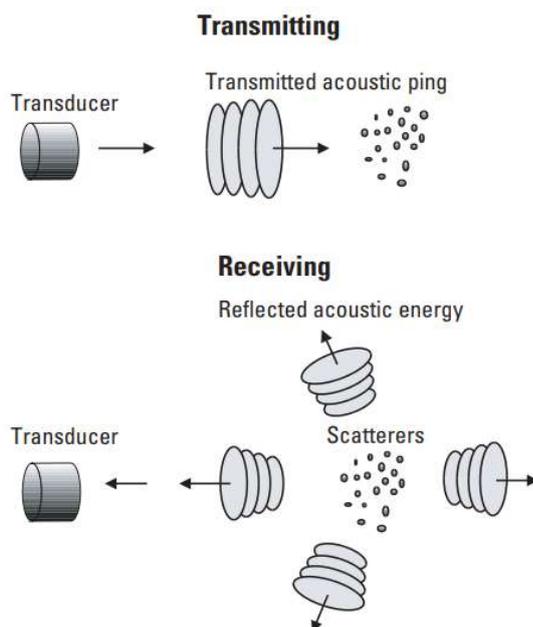


Figura 5 – Ilustração do transdutor emitindo um pulso acústico e este sendo retroespalhado. Fonte: Simpson, 2001.

A mudança de frequência da onda sonora transmitida pelo transdutor e refletida de volta pelas partículas carregadas na água é proporcional à velocidade que a distância entre o transdutor e as partículas aumenta ou diminui (GAMARO, 2012), como mostra a equação 1.

$$Fd = Fs \cdot V/C \quad (1)$$

Onde:

Fd = Diferença de frequência (Hz)

Fs = Frequência transmitida de uma fonte (Hz)

V = Velocidade relativa entre a fonte e o objeto ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

C = Velocidade do som ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Há um efeito Doppler entre transdutor/partícula e outro da partícula/transdutor, conforme a equação 2:

$$Fd = 2Fs \cdot \frac{V}{C} \quad (2)$$

Como o sinal emitido pelo transdutor é refletido pela partícula em diversas orientações, apenas parte do eco é lido pelo instrumento. Visto que o Doppler mede a velocidade radial, somente um componente da velocidade da água é utilizado.

A equação define-se então:

$$Fd = -2Fs \cdot \left(\frac{v}{c}\right) \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

Onde o ângulo θ representa a direção do pulso acústico em relação a velocidade da água (fluxo), como é mostrado na Figura 6.

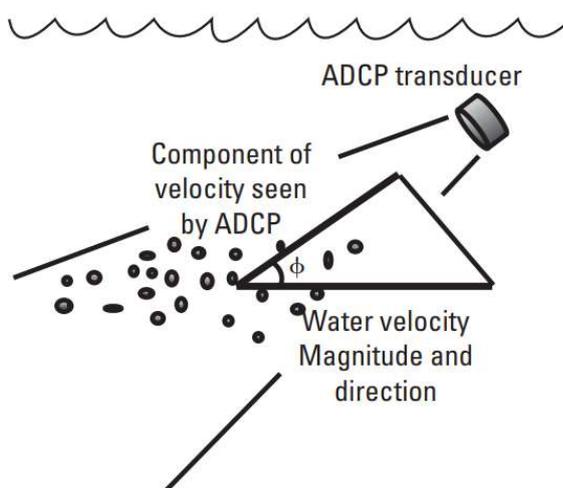


Figura 6 – Ângulo formado a partir da medição das componentes de velocidades da água em relação a direção do pulso acústico. Fonte: Simpson, 2001.

Em equipamentos acústicos dinâmicos, para calcular a velocidade nas três dimensões (x,y,z), são necessários três feixes acústicos (transdutores), um para cada componente. No entanto, usualmente é adicionado um quarto feixe redundante, utilizado para calcular o “erro de velocidade”, que permite avaliar se a corrente horizontal é homogênea, ou seja, se a velocidade da água não muda significativamente em magnitude ou direção no plano. Quanto mais próximo de zero o valor deste “erro de velocidade”, mais homogênea é a amostra. Um erro significativo na velocidade poderia indicar fluxo extremamente turbulento ou o aparelho apresenta a célula como ruim (*bad bin*) ou, no caso da vertical toda, uma vertical ruim (*bad ensemble*) (GAMARO, 2012).

A velocidade é então calculada, por meio de trigonometria, na direção que se deseja, normalmente perpendicular à seção ou rebatida para as direções Norte/Sul ou Leste/Oeste (SONTEK, 2016).

À medida que o ADCP processa o sinal refletido pelas partículas em suspensão na água, divide a coluna líquida em um número discreto de segmentos na vertical, chamadas de células de profundidade ou *bins*. Deste modo, ao transcorrer toda a seção transversal, uma malha de velocidades médias e direções do fluxo nas células será criada, como pode ser observado na Figura 7. Comparado a técnica utilizando

decorrência, por exemplo, de concentração de sedimentos muito alta que prejudicam o sinal acústico emitido ou também de áreas não medidas junto à superfície, perto do leito e perto das margens (Figura 9), devido à existência de interferência no retorno do sinal (*Side-Lobe*). À vista disso, métodos de extrapolação e interpolação são empregados para estimar e corrigir os dados recebidos.

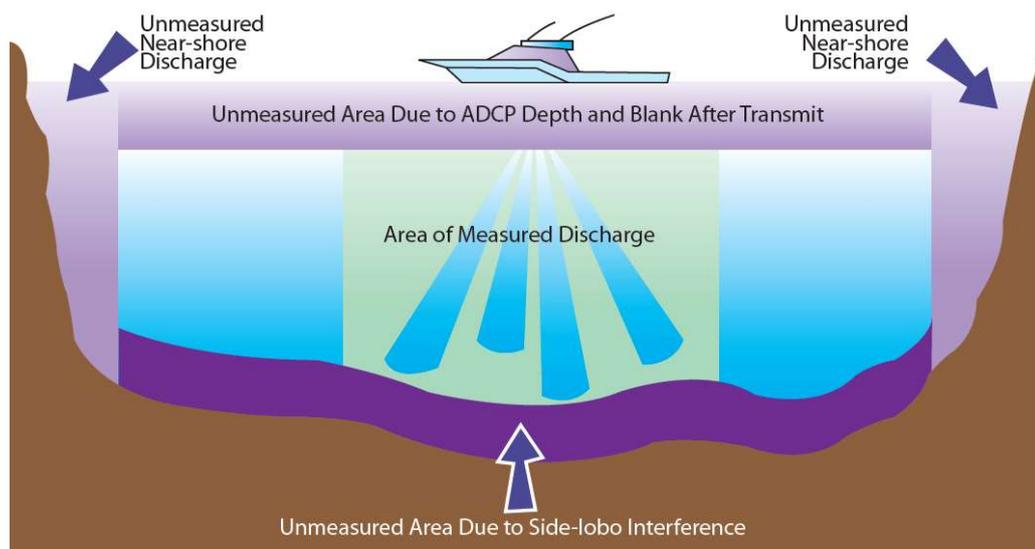


Figura 9 – Ilustração das áreas não medidas pelo ADCP. A velocidade da água medida em áreas próximas as margens, fundo e ao topo são estimadas pelo equipamento acústico. Fonte: ANA, 2014.

Em equipamentos acústicos estáticos a velocidade do fluxo é calculada utilizando dois transdutores que emitem pulsos no sentido transversal da seção, como observa-se na Figura 10.

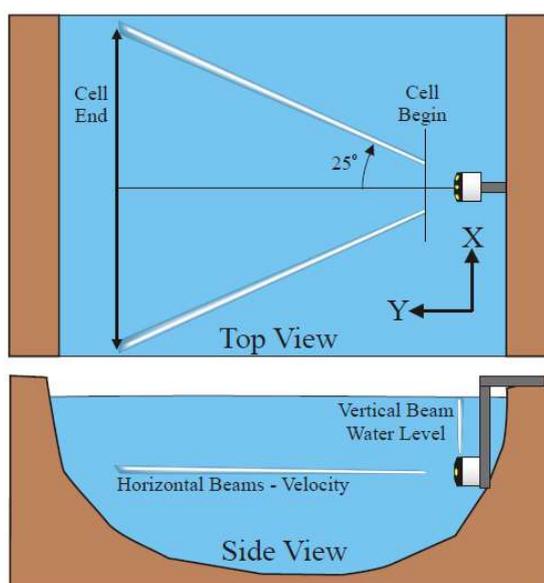


Figura 10 – Ilustração de um equipamento acústico estático instalado. Fonte: adaptado Sontek, 2009.

A velocidade média é formada pela média de todo feixe acústico ou pode ser discretizada em células de tamanho determinado pelo operador, permitindo um estudo mais detalhado da subseção medida.

O ADVM (*Acoustic Doppler Velocity Meter*) ao emitir um pulso sonoro recebe o eco refletido pelas partículas em suspensão, calcula a velocidade da água nas componentes X, Y e as discretiza em células. O esquema ilustrativo da Figura 11 permite a visualização dos feixes acústicos e a divisão das células.

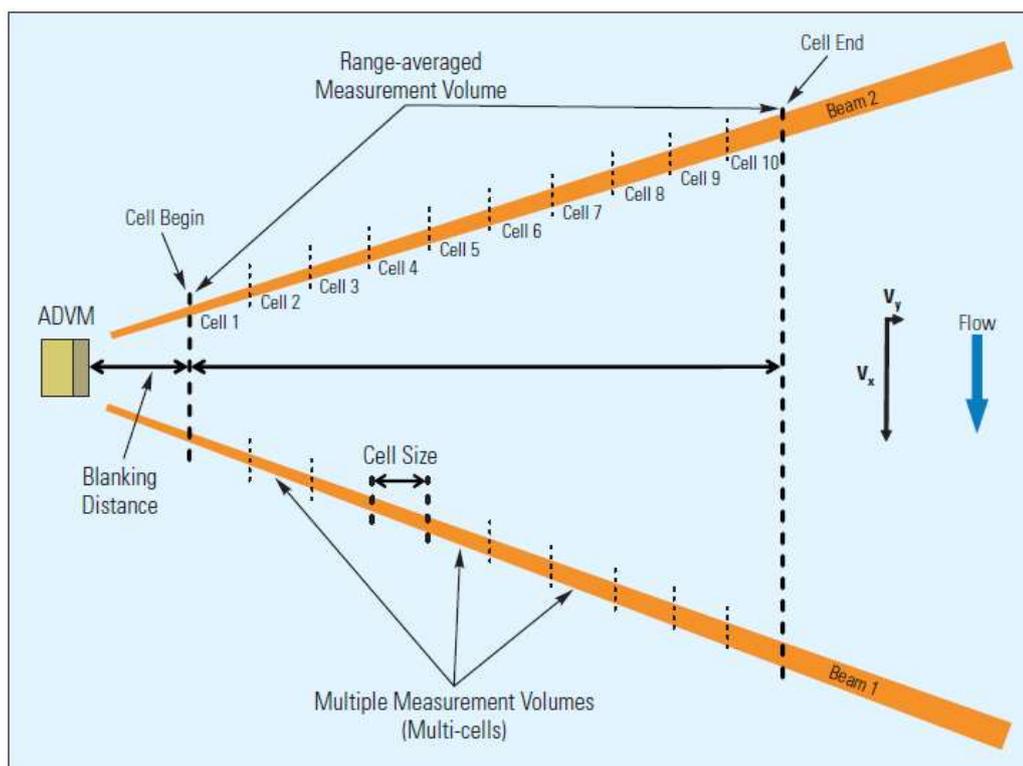


Figura 11 – Ilustração do funcionamento dos equipamentos acústicos estáticos. Fonte: Sontek, 2009.

O método das velocidades indexadas é utilizado para computar registros contínuos de descarga líquida em locais que impossibilitam o uso da curva-chave tradicional, onde a vazão é definida baseada em um único parâmetro, como o nível e, devido a efeitos de remanso, maré, fluxo bidirecional esta relação não é válida. O método das velocidades indexadas consiste em estabelecer uma relação com a velocidade média da área medida com a velocidade média da seção (GAMARO, 2012).

A descarga líquida em qualquer seção transversal pode ser obtida pela equação da continuidade, conforme equação 4:

$$Q = A * V \quad (4)$$

Onde,

Q = vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

A = área da seção transversal (m^2)

V = velocidade média do fluxo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Devido ao alto custo vinculado a aquisição dos dados de vazão, o método das velocidades indexadas pode ser empregado em alternativa às medições diretas de descarga ou relações de cota x vazão que não caracterizam o escoamento de forma fidedigna. Para isto o método associa a velocidade e a área em dois gráficos separados: um que relaciona a cota com a área da seção, e outro que relaciona a velocidade indexada com a velocidade absoluta medida.

A relação de velocidades é construída a partir de um certo número de medições de vazão com ADCP, em condições variadas de fluxo a fim de extrair a velocidade absoluta da água e, através do equipamento estático instalado, extrair a velocidade média da seção. A partir da técnica estatística conhecida como mínimos quadrados ou análise de regressão, é possível chegar a uma equação linear conforme equação 5:

$$V_{\text{média}} = a * V_{\text{index}} + b \quad (5)$$

Onde:

$V_{\text{média}}$ = Velocidade média da seção

a = declividade da reta (coeficiente da variável X)

V_{index} = Velocidade indexada

b = Intercepto do eixo y quando $x=0$

Este é um exemplo de relação simples, em que apenas um fator é relevante no modelo, neste caso a velocidade. Entretanto, o método permite desenvolver relações com mais de um fator significativo, considerando por exemplo o vento, a chuva, etc. O resultado será um modelo que melhor se ajusta às condições de estudo.

Por fim, aplicando a equação da continuidade é possível estabelecer a obtenção da vazão contínua.

2.4.3 Equipamentos acústicos utilizados

O medidor acústico dinâmico *ADCP-M9* (Figura 12) é um aparelho fabricado pela SonTek, desenvolvido com o objetivo de medir vazão em rios e canais para as mais diversas aplicações. É dotado de 9 transdutores, sendo 2 pares com frequência de 3.000 KHz e outros 2 pares com frequência de 1.000 KHz, em uma angulação de 25° com a vertical, responsáveis por fazer o perfilamento da água e o transdutor de 500 Hz é utilizado para medir a profundidade, funcionando como um ecobatímetro.



Figura 12 – Perfilador acústico móvel M9 – SONTEK acompanhado do Módulo de Comunicação e Energia (PCM) e a antena GPS.

É um equipamento pequeno, portátil, com robustos processadores capazes de ajustar de forma automatizada os modos de operação de acordo com as condições do ambiente, como por exemplo, a tecnologia *SmartPulse*, que altera a frequência, o tamanho das células (*cell size*), o número das células (*cell count*) e a distância em que o equipamento não realiza a medição (*blanking distance*), fornecendo dados de velocidade com a melhor resolução possível. A vertical composta por todas as células de uma linha na vertical é chamada de *ensemble*.

A Figura 13 apresenta uma ilustração do funcionamento do equipamento, sendo possível observar a orientação dos feixes lançados pelos transdutores e a divisão das células criadas em uma medição de vazão.

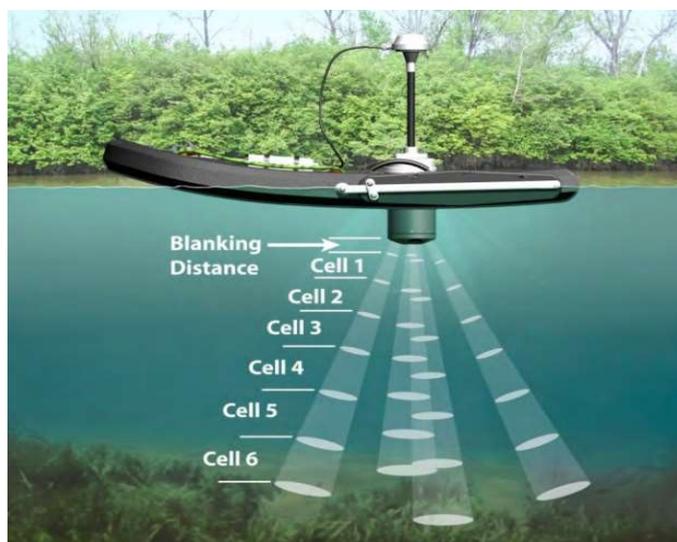


Figura 13 – Ilustração de um ADCP embarcado em funcionamento. Ao lançar os feixes acústicos sobre a coluna d'água, realiza a varredura do perfil vertical de velocidades e do leito. Fonte: RiverSurveyor Live Manual, 2017.

O ADCP mede a velocidade da água utilizando o princípio Doppler, usando múltiplos pulsos acústicos transmitidos e recebidos por toda a coluna d'água. Quando o ADCP está em movimento, a velocidade da água medida é uma combinação da velocidade da embarcação e a velocidade da água, chamada de velocidade relativa. Para determinação da velocidade real (absoluta) do fluxo, o equipamento realiza a subtração entre a velocidade da embarcação e a velocidade da água.

Todos os cálculos de vazão são realizados dentro do ADCP, proporcionando maior flexibilidade para a coleta dos dados e evitando qualquer possibilidade de interrupção ou perda de dados caso a conexão seja perdida.

Já o equipamento acústico *Side-Looking (SL)* de 500 KHz tem sua estrutura fixa a uma das margens do canal, tornando-o estático. Inicialmente sua utilização se dava em ambientes de baía, estuários e oceanos, vindo a ser utilizados posteriormente em rios e canais com problemas na curva-chave, como é o caso do ambiente de estudo. É fabricado pela SonTek, tendo como objetivo a medição de velocidades e direção do fluxo, sendo possível calcular a vazão continuamente, através de técnicas como a da velocidade indexada aplicada a este trabalho.

Possui em sua estrutura 2 transdutores que emitem pulsos de som no sentido transversal do canal, responsáveis por obter a média de velocidades em duas dimensões (X e Y) e um transdutor de feixe vertical responsável pela leitura de nível d'água acima do sensor (Figura 14). Seu funcionamento se dá de forma semelhante aos equipamentos dinâmicos, onde é possível discretizar o perfil de velocidades em células. No entanto, a configuração da célula de início (*Cell Begin*) e fim (*Cell End*), assim como o tamanho de cada célula (*Cell Size*), é realizada de forma manual, podendo ser adaptada às condições do local de estudo.

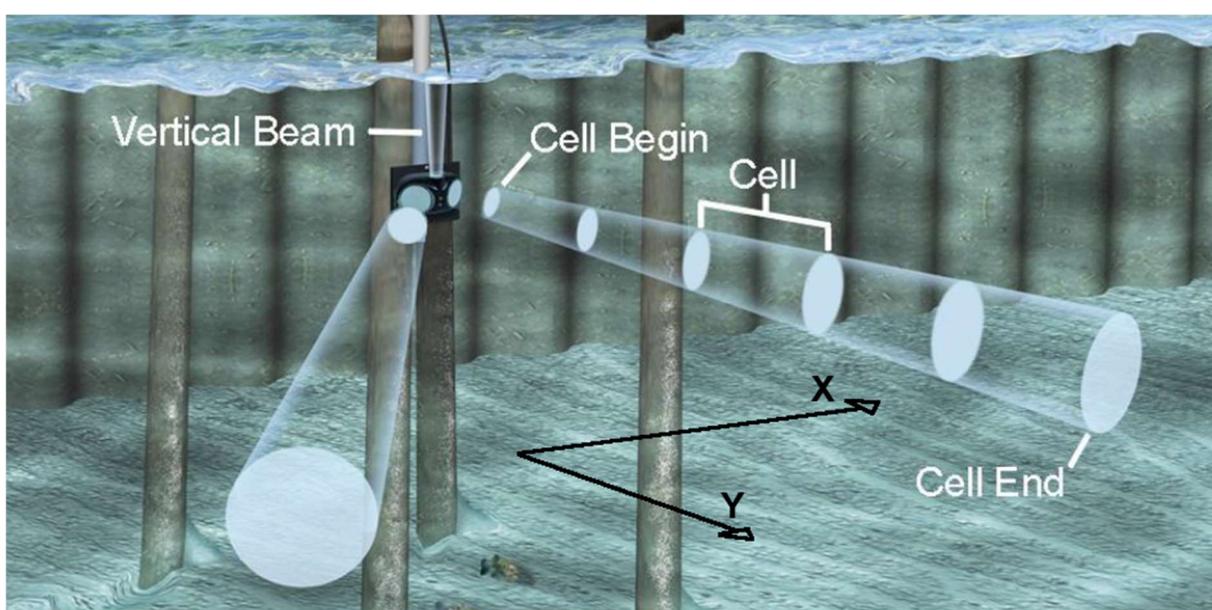


Figura 14 – Ilustração de um equipamento estático instalado e os feixes emitidos pelos transdutores. Fonte: Adaptado de Argonaut-SL System Manual, 2008.

2.4.4 Sistemas de referenciamento com equipamentos acústicos móveis

Para a realização de medição de vazão com equipamentos acústicos móveis, a localização exata do equipamento é necessária para o cálculo da velocidade do barco durante a travessia. A fim de determinar a velocidade absoluta da água, a velocidade da embarcação deve ser conhecida e subtraída da medição real da velocidade da água. Desta forma, dois métodos de referência são usados para determinar a velocidade da embarcação, *bottom tracking* e GPS (GGA e VTG), sendo sempre necessário o cuidado de escolher o método correto para cada situação.

O sistema de referência *bottom tracking* fornece a velocidade da embarcação, profundidade e direção da embarcação, baseando-se apenas na mudança do feixe

acústico sob o leito do canal. Esta técnica assume que o leito é estacionário, ou seja, que não possui fundo móvel. No entanto, sedimentos transportados por arraste podem afetar o deslocamento do pulso emitido, influenciando diretamente na velocidade do barco e resultando em velocidades e vazões menores que as reais (MUELLER; WAGNER, 2009).

Detectada a presença de fundo móvel, técnicas alternativas com uso de GPS são usadas para determinação da velocidade do barco, ou seja, a referência do barco não é mais o fundo do rio e sim a rede de satélites, entretanto, para alguns locais e condições, não geram resultados confiáveis (GAMARO, 2012).

Ao usar o sistema GGA a partir do GPS para medir o movimento do ADCP, a velocidade do instrumento é determinada calculando a distância percorrida entre dois pontos sucessivos de posição GPS e dividindo essa distância pelo tempo entre os pontos. Portanto, a precisão posicional é de vital importância para a qualidade do dado gerado, sendo necessário uso de DGPS com precisão de 95% para correção da posição (MUELLER; WAGNER, 2009).

O sistema VTG apresenta apenas a velocidade relativa em relação ao fundo, que inclui dados de direção e velocidade, mas não de posição. A velocidade é calculada acessando o efeito Doppler nas fases da frequência de transmissão (GAMARO, 2012). O método exige pelo menos 4 satélites e é minimamente afetada pelas mudanças de multipercurso e de satélite devido ao curto tempo de amostragem necessário (MUELLER; WAGNER, 2009)

Para Gamaro (2012) a utilização do *bottom tracking* é quase sempre melhor que a utilização de um DGPS, pois a precisão ou erro de uma medição com GPS começa na escolha do GPS e, se utilizado, na correção do sinal.

2.4.5 Erros e Incertezas nas medições

Uma medição de vazão, seja com equipamentos tradicionais ou acústicos, tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição. Os erros que contribuem para as incertezas das velocidades são de fontes aleatórias ou sistemáticas e busca-se sempre reduzir os erros aleatórios, pois são os únicos sobre os quais se pode ter algum controle (GAMARO, 2012).

Segundo Gamaro (2012), as fontes de erros aleatórios podem ser internas ou externas. As fontes internas abrangem o comprimento do pulso, a frequência transmitida e o ângulo do feixe, e as externas são as turbulências, as ondas internas, a movimentação do instrumento e os fatores de medição. Já as fontes dos erros sistemáticos incluem a geometria do feixe, a temperatura, entre outros.

De acordo com Simpsons (2001), para a obtenção de uma medida média de vazão, é instruído que se realize um mínimo de 4 medições (2 em cada direção), não ultrapassando um erro de 5% entre as vazões. Desta forma, a fim de evitar ou reduzir os potenciais erros, cuidados devem ser tomados desde o início da utilização do equipamento até a realização da medição.

3 Materiais e métodos

3.1 Local das medições

O presente trabalho foi realizado no canal São Gonçalo, responsável por conectar a lagoa Mirim com a laguna dos Patos, a qual mantém ligação indireta com o oceano Atlântico. Está inserido na bacia hidrográfica transfronteiriça (BH) Mirim – São Gonçalo e se desloca pelos municípios de Pelotas, Rio Grande, Capão do Leão e Arroio Grande extremo sul do Brasil. Tem aproximadamente 76 Km de extensão, 250 m de largura e profundidade média de 5 m (MÖLLER *et al.*, 2011), podendo atingir, em alguns trechos, até 15 m de profundidade. A BH possui área de 25.961,04 km², situa-se no sudeste do RS, entre as coordenadas geográficas 31°30' a 34°35' de latitude Sul e 53°31' a 55°15' de longitude Oeste (SEMA, 2017). Conta com inúmeros afluentes, sendo os mais importantes localizados na margem esquerda, com destaque para o rio Piratini (HARTMANN *et al.*, 1986).

A seção transversal onde foi estabelecido o monitoramento permanente e contínuo de velocidades possui aproximadamente 160 metros de largura, encontra-se na localidade de Santa Isabel – Arroio Grande/RS, onde o Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Hidrometria e Sedimentos para Manejo de Bacias Hidrográficas da Universidade Federal de Pelotas com a parceria da Agência de Desenvolvimento da

Lagoa Mirim possuem uma base de pesquisa equipada com estação hidrometeorológica (Figura 15).



Figura 15 - Estação hidrometeorológica localizada ao lado do posto fluviométrico.

O posto fluviométrico situa-se sob as coordenadas $32^{\circ} 07' 07''$ Sul e $52^{\circ} 35' 35.3''$ Oeste (Figura 16), a aproximadamente 4,5 Km do exutório do canal São Gonçalo para a Lagoa Mirim e 40 Km da Barragem Eclusa.

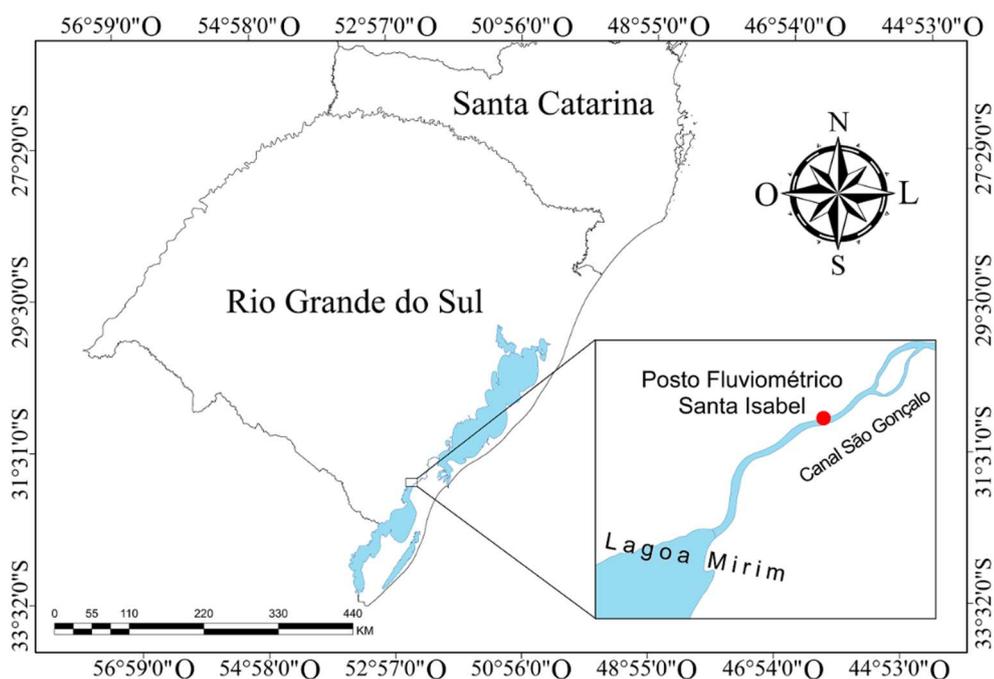


Figura 16 – Localização do posto fluviométrico na localidade de Santa Isabel - Arroio Grande/RS.

O local foi escolhido em função da possibilidade em implantar um monitoramento contínuo de vazões na extremidade sul do canal São Gonçalo, complementando a aquisição de dados do SL500 instalado na extremidade norte e, a partir disto, ser possível estabelecer um balanço de toda a água que entra e sai do canal, recurso de grande importância para a gestão da BH Mirim-São Gonçalo.

Para a fixação do equipamento SL500 na margem esquerda do canal, foi necessário a construção de um trapiche (Figura 17), a fim de atingir uma profundidade considerável para o funcionamento do aparelho sob condições de cotas baixas e, para possibilitar a manutenção sob cotas altas foi instalada uma estrutura metálica usada como trilho para içar o equipamento (Figura 18).



Figura 17 – Trapiche construído para fixação do SL500 e a estação com datalogger.



Figura 18 - Estrutura metálica instalada para fixação do SL500.

3.2 Equipamentos acústicos utilizados

Para a realização deste trabalho foram necessários utilizar dois equipamentos acústicos, sendo um destes de instalação dinâmica de orientação vertical (ADCP M9) e outro estático de orientação horizontal (SL500).

Para a medição com equipamento embarcado, é necessário, após todas etapas iniciais de configuração do equipamento no software *RiverSurveyor Live*, definir o ponto de início e fim do percurso a ser medido, tomando o cuidado para que a cada transecto, sempre se retorne ao mesmo ponto. Feito isso, é possível iniciar a medição e, por meio do software acompanhar todo o processo da coleta dos dados, visualizando informações parciais de vazão, velocidade do barco, velocidade absoluta da água, batimetria, dentre outros. As medições de vazão com o perfilador acústico móvel M9 foram realizadas no período entre 6 de março de 2018 e 6 de junho de 2018, sendo computadas um total de 10 medições.

No início de março de 2018 foi instalado às margens do Canal São Gonçalo o equipamento SL500-SONTEK, sob as coordenadas 32° 07' 07" Sul e 52° 35' 35.3" Oeste, abrangendo uma área de drenagem de aproximadamente 25.961 Km².

O equipamento foi configurado para realizar medições constantes em um intervalo de 300 segundos (*Averaging Interval*), sendo o período de tempo em que o instrumento calcula a média dos dados para computar a velocidade média do perfil, gerando uma amostra de velocidade a cada 900 segundos (*Sampling Interval*).

É imprescindível destacar a importância da sincronização entre os relógios dos dois equipamentos durante a medição. Discrepância de tempo de apenas 15 segundos entre dispositivos de medição podem causar relações errôneas entre a velocidade indexada e a velocidade média medida (SONTEK, 2016).

3.3 Calibração da bússola do equipamento acústico dinâmico

A calibração da bússola interna é necessária antes de cada medição de descarga, sendo uma etapa crítica para evitar erros, pois é usada para compensar a interferência magnética nas proximidades do ADCP. Desta forma, foi projetada para representar as condições que serão experimentadas durante a medição real.

Seguindo instruções do manual “*River Surveyor S5/M9 System Manual*” para executar a calibração da bússola, é necessário girar o ADCP lentamente através de dois círculos completos, enquanto varia suavemente a inclinação do aparelho no sentido longitudinal (*Pitch*) e transversal (*Roll*) da embarcação, representando os maiores ângulos de inclinação possíveis e praticáveis como mostra a Figura 19. Se o ADCP estiver montado em uma embarcação, toda ela deve girar para realizar a calibração. Cada rotação deve levar no mínimo um minuto completo para ser concluída e deve ser feita lentamente.

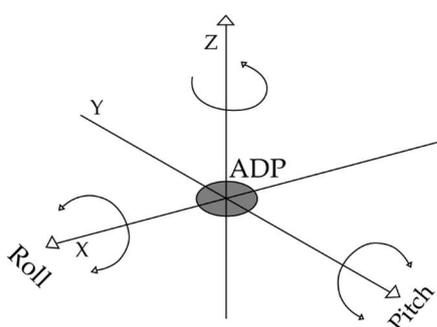


Figura 19 – Movimentos possíveis e praticáveis durante a calibração da bússola do ADCP M9.

É importante antes da calibração ficar atento a materiais magnéticos ou fontes de interferência (celulares, relógios de pulso, ferramentas, chaves, etc) nas proximidades do local, os quais podem afetar a calibração.

3.4 Teste de fundo móvel (FM)

Segundo Rainville (2004, *apud* GAMARO, 2012) fundo móvel é a falsa determinação do fundo do rio, pelos equipamentos acústicos, em locais onde existe grande concentração de sedimentos que se deslocam no leito do rio.

Ao utilizar o *Bottom Tracking* para determinação do deslocamento da embarcação, o ADCP usa o leito do rio como sua referência e o considera como sendo estático. Na ocorrência de fundo móvel, erros de posicionamento são atribuídos durante a medição e conseqüentemente na velocidade da embarcação. Como o sedimento se desloca no mesmo sentido da massa d'água, o equipamento acústico entende que a embarcação está se movendo para montante, quando na realidade não está. Ao realizar o cálculo da velocidade absoluta da água, o resultado será uma

velocidade inferior da realmente ocorrida e, por conseguinte uma vazão subdimensionada, necessitando, deste modo, de uma correção ou outro sistema de referência (GPS) usado durante a medição.

O método estacionário consiste em realizar medições contínuas de velocidades em alguns pontos da seção com a embarcação parada por um período não inferior a 5 minutos. O erro causado pelo fundo móvel pode ser estimado dividindo a distância do movimento aparente da embarcação (DMG) pelo tempo de duração do teste em segundos (equação 6) (MUELLER *et al.*, 2013). Este cálculo fornecerá uma estimativa do fundo móvel detectado pela técnica de rastreamento de fundo.

$$Vel. FM = \frac{DMG}{tempo} \quad (6)$$

Para saber se esse valor é relevante em relação a velocidade média medida nas travessias e necessitar correção sobre a medição, é preciso estabelecer a razão da velocidade do fundo móvel pela velocidade média da água durante o teste (equação 7). Se o teste for realizado com a embarcação ancorada e caso não houve movimentação durante o procedimento, o fundo móvel é detectado com um valor de relevância menor que 1% e, menor que 2% caso a embarcação tenha se movimentado. Detectada a presença de fundo móvel a correção na medição deve ser feita ou algum método para evitar o erro deve ser utilizada (MUELLER *et al.*, 2013).

$$Rel = \frac{Vel.FM}{Vel.Méd da Água} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

Rel = Relevância (%)

Vel.FM = Velocidade do fundo móvel (m/s)

Vel.Méd da Água = Velocidade média da água (m/s)

DMG = Distância aparente entre o início e fim da medição (m)

3.5 Método das Velocidades Indexadas

Após as etapas iniciais de instalação, configuração e operação do equipamento SL500, é dado início ao processo de desenvolvimento do método da curva indexada

de velocidades. Como o método separa as componentes da vazão em dois gráficos, é necessário estabelecer as relações de cota x área e velocidade média x velocidade indexada.

O gráfico que relaciona a área molhada a partir dos dados de nível é elaborado através de um levantamento topobatimétrico da seção transversal utilizando um ecobatímetro para a leitura do leito do canal e uma estação total para as medições de topografia nas margens acima da água. Após caracterizada a seção transversal, por meio do programa *AreaComp*, disponibilizado pela USGS em seu site, foi possível estabelecer a relação de cota x área.

Para a relação de velocidades, um número significativo de medições em diferentes condições de fluxo deve ser feito, a fim de caracterizar o escoamento para uma ampla faixa de vazões. Por conseguinte, a equação que relaciona área x cota, juntamente com os dados de cotas, velocidades indexadas e medições de vazão são usadas para desenvolver a curva indexada para o local de estudo e através da equação da continuidade (equação 4), computar os dados para a série de vazão.

3.6 Análise de incerteza das equações

Para avaliar a qualidade de ajuste do modelo gerado pelas regressões lineares das relações de cota x área e velocidade média x velocidade indexada, uma análise estatística foi realizada usando o coeficiente de determinação (r^2), sendo uma medida descritiva que indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados, ou seja, a proporção da variação da variável observada que pode ser explicada pela variação da variável estimada, quanto mais próximo de 1 melhor o ajuste, é expresso pela equação 8:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(V_e - \bar{V}_e)^2}{\sum(V_o - \bar{V}_o)^2} \quad (8)$$

Onde:

R^2 = Coeficiente de determinação

V_o = Variável observada

V_e = Variável estimada

\bar{V}_e = Valor médio da série de dados estimados

\bar{V}_o = Valor médio da série de dados observados

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (Equação 9), largamente conhecido para avaliar modelos de simulação de vazões, também foi usado para avaliar a eficiência do modelo gerado, podendo variar de $-\infty$ a 1. Adotando a classificação sugerida por Van Liew *et al.* (2007), valores de CNS = 1 significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; CNS > 0,75 o modelo é adequado e bom; $0,36 < \text{CNS} < 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e CNS < 0,36 o modelo não é satisfatório.

$$\text{CNS} = 1 - \frac{\sum (V_o - V)^2}{\sum (V_e - \bar{V})^2} \quad (9)$$

Onde:

CNS = Coeficiente de Nash-Sutcliffe

V_o = Variável observada

V_e = Variável estimada

\bar{V} = Valor médio da série de dados utilizados

4 Resultados e discussão

4.1 Medições em campo

As medições de vazão com o perfilador acústico móvel M9 foram realizadas no período entre 6 de março de 2018 e 6 de junho de 2018, sendo computadas um total de 10 medições. A qualidade da curva indexada gerada é oriunda de uma quantidade significativa de medições que abrangem condições variadas de escoamento, ou seja, quanto maior o número de medições e significativa variação na amplitude de velocidades registradas, melhores resultados serão alcançados.

De acordo com Levesque e Oberg (2012), para estabelecer a relação de velocidades indexadas é necessário um mínimo de 10 medições de vazão em diferentes condições de fluxo. Ao considerar o número de medições realizadas, pode-se afirmar como aceitável, com isso tornou-se possível estabelecer as relações necessárias para o emprego da metodologia.

A Tabela 1 apresenta as informações utilizadas para a aplicação do método das velocidades indexadas. Nela estão apresentadas informações referentes a data e horário de início das medições com o equipamento M9, a duração, áreas, vazões e velocidades médias. O nível foi obtido através do sensor de pressão do SL500. A direção predominante do vento foi obtida através dos boletins de estações agroclimatológicas da Embrapa Terras Baixas, localizada sob as coordenadas 31° 52' 00" S e 52° 21' 24" O, com altitude de 13,24 m e o número de comportas fechadas da barragem Eclusa junto a Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim.

Ao verificar a medição de vazão do dia 13/03/2018, observou-se que a barragem eclusa provoca forte influência sobre a dinâmica de escoamentos do canal São Gonçalo, mesmo com vento predominante na direção sudoeste, o qual favorece seu escoamento no sentido da Laguna dos Patos. Neste dia a barragem eclusa estava com todas suas 18 comportas fechadas e, somado as condições de escoamento do rio Piratini, fez com que o sentido do fluxo se invertesse, observando vazão de $-77,875 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Essa forte influência é percebida também nas medições dos dias 04/04/18, 11/04/18, 08/05/18 e 23/05/18, onde o escoamento teve seu fluxo invertido ou houve uma diminuição dos valores de vazão.

Ao analisar o perfil de velocidades da medição de vazão do dia 11/04/18 com início às 11:34 (Figura 20), rebatido na direção Leste (sentido Laguna dos Patos), observa-se a influência do vento Nordeste sobre o escoamento ao verificar visualmente velocidades mais baixas ou negativas (bins de cores frias) na região superior da coluna d'água e velocidades mais altas (bins de cores quentes) na região inferior, ou seja, o vento NE exercia uma força contrária ao escoamento, fazendo com que a lâmina d'água superior fosse empurrada no sentido da lagoa Mirim e a região inferior continuasse no sentido laguna dos Patos. Fenômeno corroborado por Santos *et al.*, (2001).

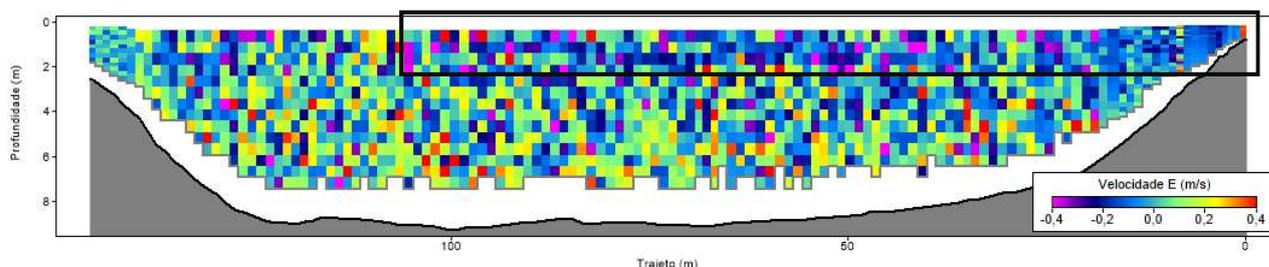


Figura 20 - Perfil de velocidades da medição de vazão do dia 11/04/18 com início às 11:34, rebatido na direção Leste (E).

Tabela 1 – Medições utilizadas para geração da curva de velocidades indexadas.

Data	Hora	Duração (s)	Área (m²)	Vazão Média (m³.s⁻¹)	Velocidade Méd. (m.s⁻¹)	Nível (m)	Direção Predominante do Vento	Comportas Fechadas Eclusa
06/03/2018	16:30:10	776	1153,805	401,874	0,348	1,256	SO	10
13/03/2018	18:11:19	475	1110,23	-77,875	-0,07	0,871	SO	18
21/03/2018	11:14:04	802	1159,824	221,367	0,191	1,217	SO	12
21/03/2018	14:50:39	675	1156,96	374,575	0,324	1,338	SO	15
04/04/2018	15:42:41	584	1115,34	23,733	0,021	1,023	SO	18
11/04/2018	11:34:35	536	1074,80	-3,819	-0,004	0,742	NE	18
11/04/2018	17:06:01	667	1084,16	92,491	0,085	0,809	NE	18
08/05/2018	11:54:04	1370	1060,56	-265,965	-0,251	0,811	NE	18
23/05/2018	16:38:42	579	1098,74	82,947	0,076	1,181	SO	17
06/06/2018	12:34:12	743	1127,36	332,276	0,295	1,167	SO	10

SO – Sudoeste; NE - Nordeste

4.2 Estimativa do efeito de fundo móvel

Seguindo o descrito no item 3.4 da metodologia, para verificar a confiabilidade dos dados de vazão fornecido pelas travessias, verificou-se a presença de movimentação de sedimentos no leito do rio, para isso, foi utilizado o método estacionário e como referência de trajeto usado o *bottom tracking*.

Após o término da verificação de fundo móvel, o programa exibe uma janela com informações coletadas durante o teste (Figura 21), assim como um gráfico com a estimativa da velocidade do leito móvel durante o período de medição e, caso seja necessária alguma correção, um alerta será mostrado. Na tabela que é exibida nesta janela, é possível observar o nome do arquivo criado, a distância do deslocamento a montante (m), a duração do teste (s), a velocidade do fundo móvel ($m.s^{-1}$), a velocidade média da água ($m.s^{-1}$), a profundidade medida (m) e o erro potencial (%).

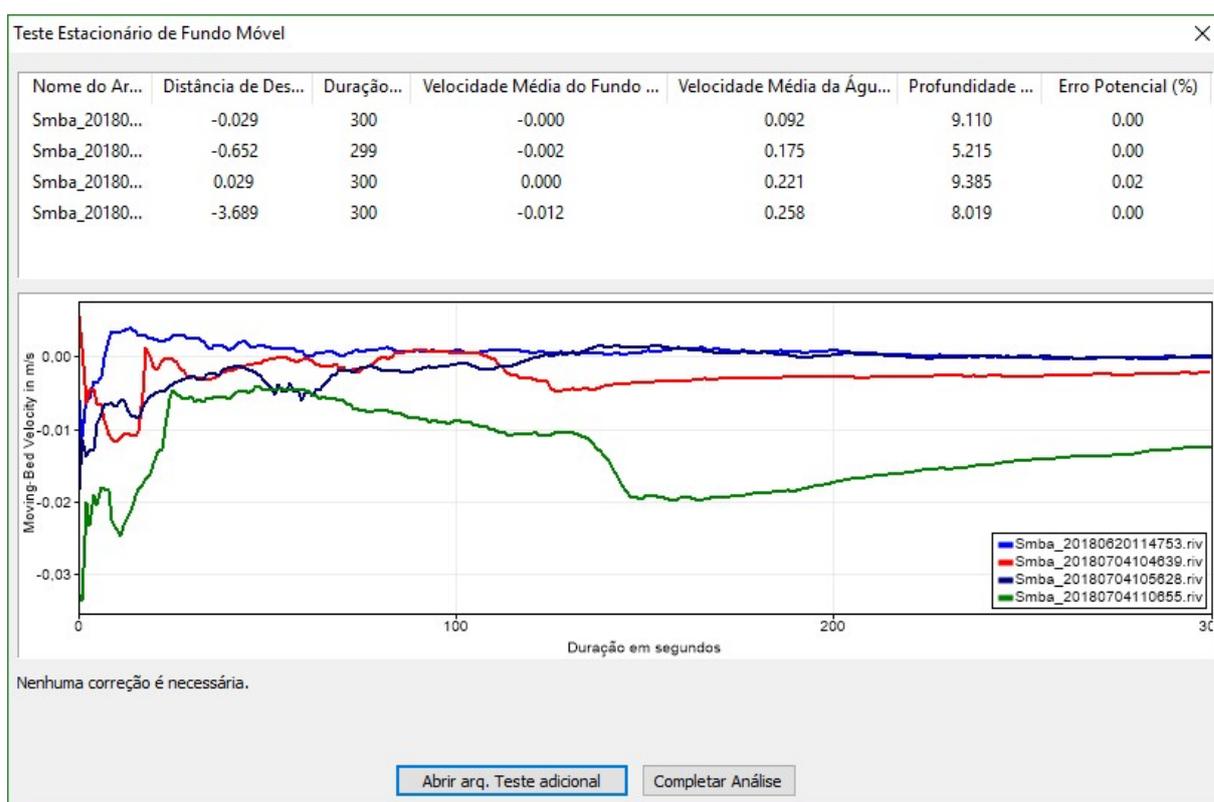


Figura 21 – Tela exibida pelo programa RiverSurveyor Live após o teste estacionário de fundo móvel.

Como o teste foi realizado em apenas um ponto da seção de estudo, não foi possível garantir a presença de leito estacionário e, mesmo que esteja dentro dos limites indicados na literatura, a verificação em mais pontos fez-se necessária. Desta

forma, um total de 4 pontos ao longo da seção transversal foram analisados. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do teste de fundo móvel

Subseção	T (s)	DMG (m)	Profundidade (m)	V_{fm} (m.s⁻¹)	V_{média} (m.s⁻¹)	Relevância (%)
1	299	- 0,652	5,215	-0,002	0,175	1,25
2	300	0,029	9,385	0	0,221	0,04
3	300	- 0,029	9,11	0	0,092	0,11
4	300	- 3,689	8,019	- 0,012	0,258	4,77
Média	-	-	-	-	-	1,54

T – tempo em segundos; DMG – distance made good; V_{fm} – velocidade de fundo móvel; V_{média} – velocidade média da água

Ao analisar os dados constantes na tabela acima, percebe-se que ao final dos testes a subseção de nº 1 apresentou valor de velocidade média do fundo móvel pouco superior a 1%, um erro pouco significativo para a determinação do leito móvel. Observa-se também que a subseção nº 4 a relevância do FM foi superior aos estabelecidos por MUELLER *et al.*, (2013), fato que se justifica devido a movimentação da embarcação na hora do teste por perda de ancoragem. Em contrapartida, as subseções de nº 2 e 3 apresentaram resultados dentro dos estabelecidos e, ao realizar a média de todos os testes o valor de relevância do FM não excede 2%. Em vista disso, o local de estudo não é caracterizado pela presença de fundo móvel.

4.3 Aplicação do método das velocidades indexadas

A partir dos dados gerados pelo programa *AreaComp*, o qual tem como valores de entrada o levantamento topobatimétrico da seção transversal (Figura 22), foi elaborado o gráfico que relaciona a área com a cota registrada pelo SL500. Deste modo, ao inserir os valores da equação gerada no equipamento estático, de forma automatizada será possível determinar a área molhada da seção transversal.

Os dados de calibração (velocidade média medida e velocidade indexada) foram usados como entrada no software estatístico para a análise de regressão a fim

de ajustar a linha reta que resultou na equação das velocidades indexadas e a partir disto, ser possível determinar a velocidade média da seção e, por conseguinte a vazão instantânea.

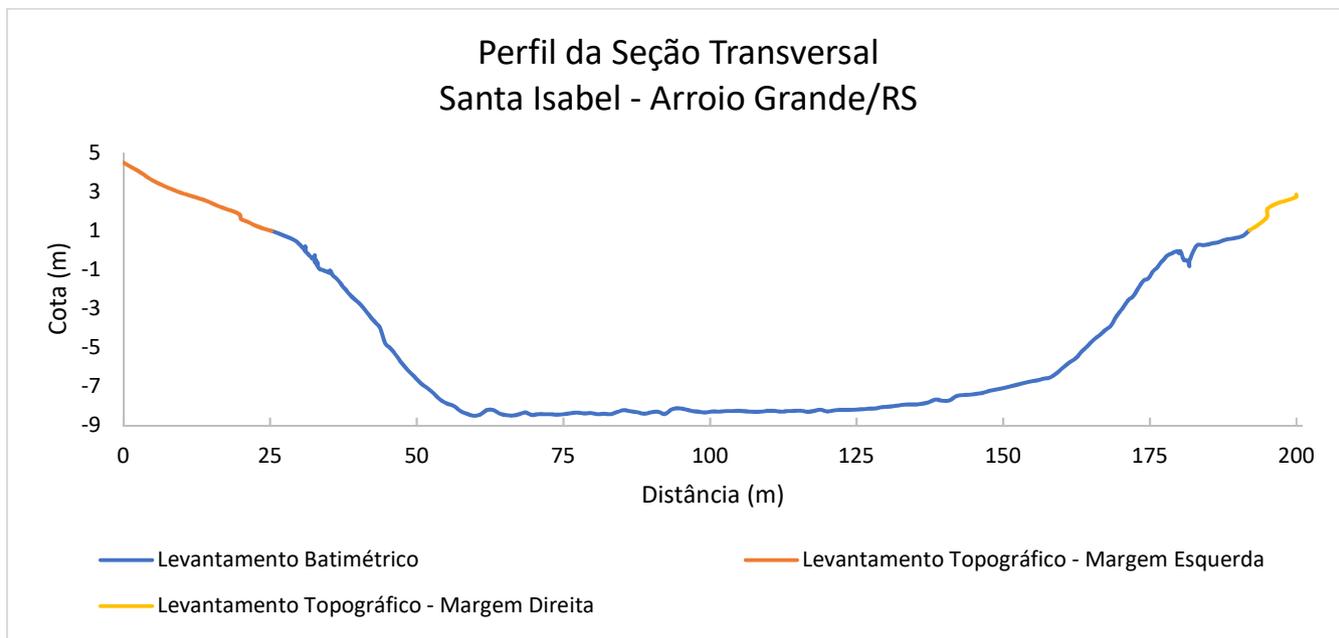


Figura 22 – Levantamento topobatimétrico da seção transversal.

Na Figura 23 é possível observar os resultados das equações geradas pelas regressões lineares.

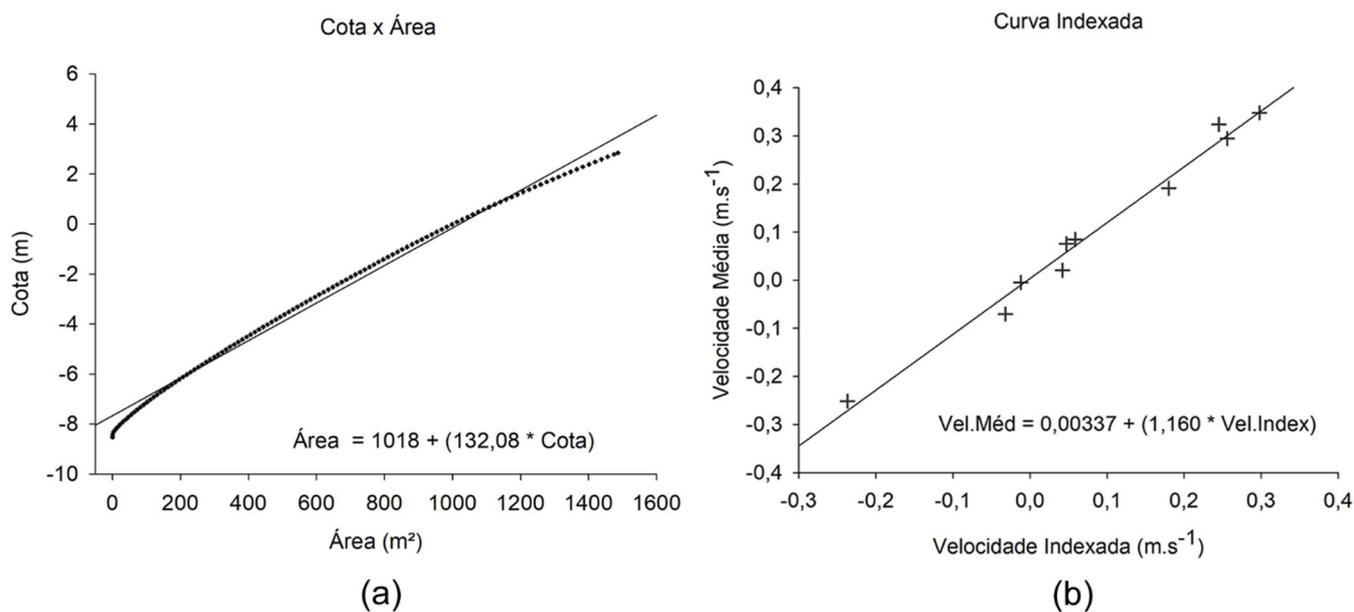


Figura 23 – (a) Gráfico que relaciona a área gerada a partir da cota registrada no SL500. (b) Gráfico gerado a partir das velocidades em x registradas pelo SL500 no momento da medição das velocidades com o ADCP M9.

4.4 Validação das equações

Através do método das velocidades indexadas foi possível estabelecer uma relação de causa e efeito sobre a velocidade média da água e, a partir disto, uma estimativa dessa variável pôde ser estabelecida. Contudo, em qualquer relação estatística existe um erro associado à esta estimativa. Desta forma, para verificar se os erros contidos na relação de velocidades indexadas são significativos, foram realizadas as análises estatísticas descritas no item 3.6 da metodologia.

A tabela 3 apresenta os resultados das análises estatísticas para as equações geradas a partir do método das velocidades indexadas. Observa-se que os testes apresentaram valores de coeficientes de determinação de 0,985 e 0,999 para as relações de velocidades e cota x área, respectivamente. Desta forma, considera-se que os testes apresentaram bons resultados e que as equações estão muito bem ajustadas.

Tabela 3 - Análise estatística das equações geradas pelo Método das Velocidades Indexadas para estimativas de descarga líquida do canal São Gonçalo na localidade de Santa Isabel - Arroio Grande/RS.

Equação	R²	NS
Área = 1018 + (132,08 * Cota)	0,999	-
Vel.Méd = 0,00337 + (1,160 * Vel.Index)	0,985	0,984

R² – Coeficiente de Determinação; NS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Ao analisar o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que representa a eficiência do modelo em reproduzir os valores reais da variável estudada, verifica-se que a equação de velocidades apresentou um coeficiente de 0,984, considerado um ajuste muito bom e que pode ser comprovado ao comparar os valores de vazão observada com os valores estimados (Figura 24), apresentando resultados muito próximos aos verificados nos dias das medições.

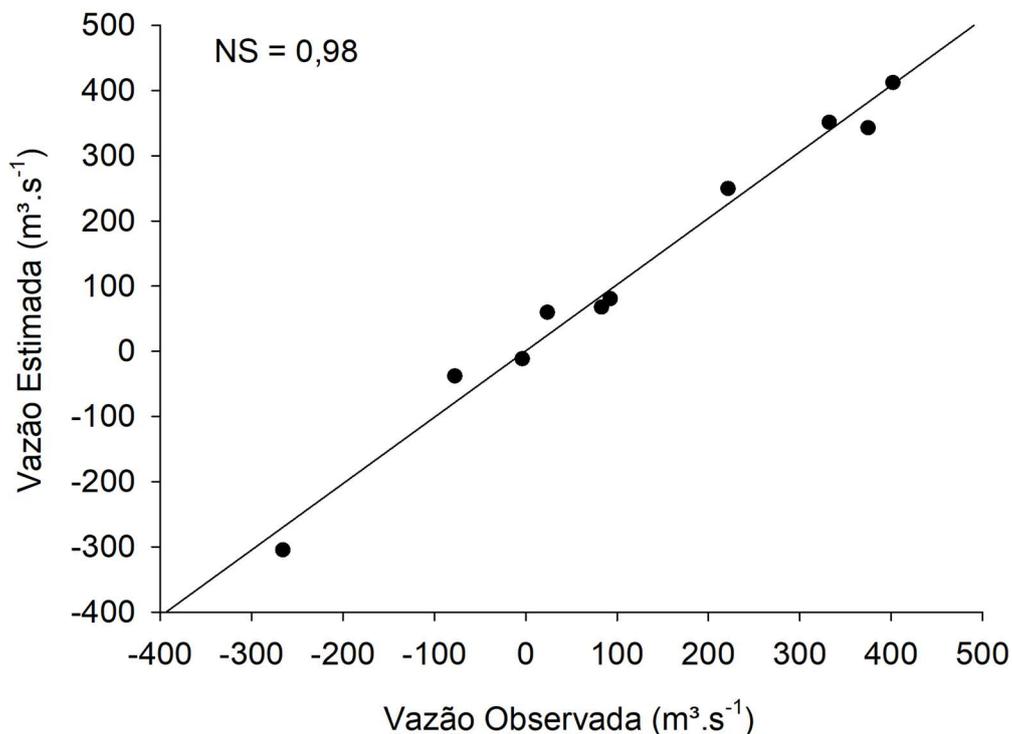


Figura 24 – Gráfico de vazões estimadas obtidas a partir do Método das Velocidades Indexadas e vazões observadas no momento da medição com o ADCP M9.

4.5 Reconstituição da série de vazões

Após estabelecer as relações necessárias para computar os valores de descarga líquida contínua, a partir da equação da continuidade (equação 4), foi realizada a reconstituição da série de vazões no período dos três meses em que o equipamento estático estava em operação.

Na Figura 25 é possível observar a representação do hidrograma das vazões instantâneas contínuas reconstituídas pelo método das velocidades indexadas.

Série Histórica de Vazões

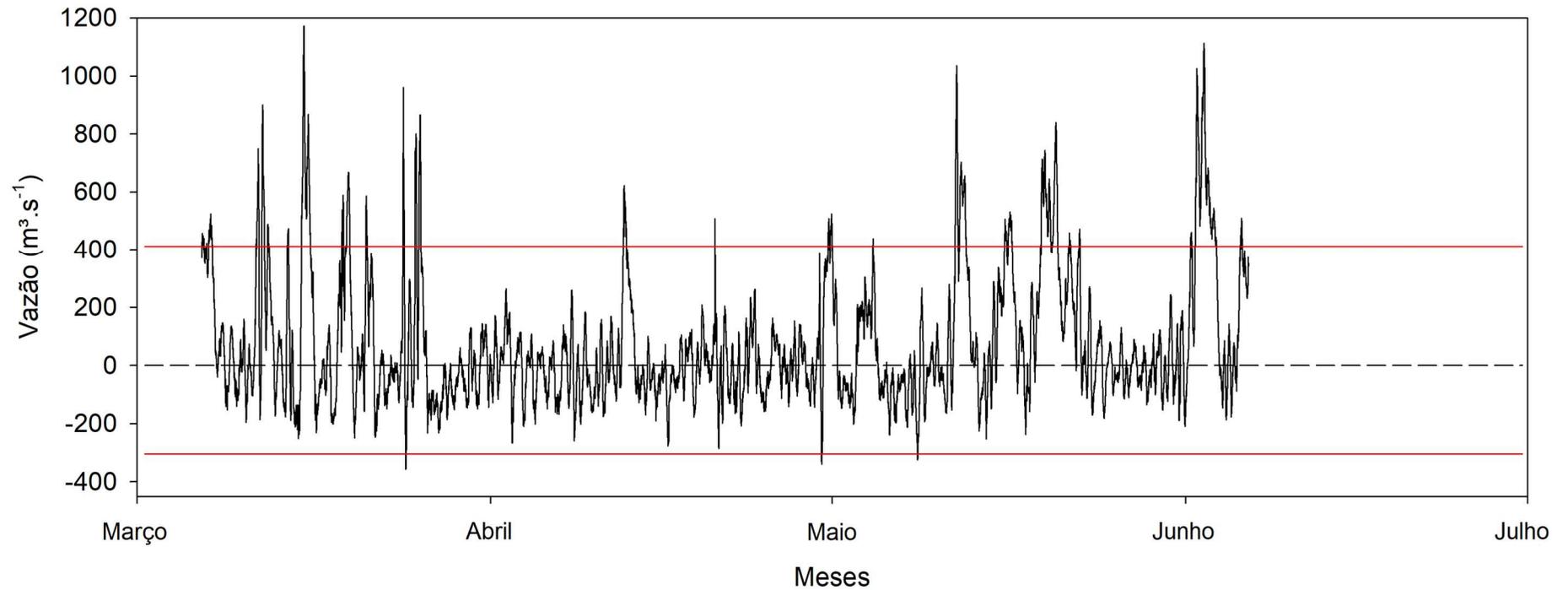


Figura 25 – Reconstituição da série de vazões do canal São Gonçalo na localidade de Santa Isabel – Arroio Grande/RS no período de 06 de março de 2018 a 06 de junho de 2018.

Ao analisar o hidrograma gerado, é possível perceber que duas linhas vermelhas foram adicionadas ao gráfico com o intuito de limitar visualmente a faixa de vazões que foram amostradas. Desta forma, as vazões compreendidas fora do intervalo que varia de $-304,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $412,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, não podem ser consideradas como verdade absoluta por apresentarem incertezas por falta de amostragem.

Como o canal São Gonçalo é responsável por interligar a Lagoa Mirim com a Laguna dos Patos e estar indiretamente ligado com o oceano, em períodos de estiagem os níveis das lagoas reduzem demasiadamente, permitindo a intrusão salina para grande parte da Laguna dos Patos e uma pequena parte do canal, sendo limitado pela barragem eclusa, que como seu objetivo principal é justamente impedir a salinização para o restante do canal e a Lagoa Mirim. Este fenômeno é conhecido como fluxo de correntes bidirecionais, ou seja, o sentido do fluxo que normalmente ocorre no sentido Lagoa Mirim – Laguna dos Patos é invertido. Desta forma, ao observar o hidrograma da Figura 20 este fato pôde ser comprovado com os registros dos equipamentos acústicos, onde valores de vazões negativas representam a inversão do fluxo.

Além da variação do fluxo ocasionado pela oscilação de níveis entre as lagoas ou pelo regime pluvial dessa macrorregião, outro fator condicionante é o vento que, em determinadas direções podem facilitar ou dificultar o escoamento do canal no sentido da Laguna dos Patos.

Ao realizar uma análise dos dados de vazão gerados no período de 18 de maio de 2018 a 03 de junho de 2018 e cruzados com dados de vento oriundos da estação hidrometeorológica localizada ao lado da estação fluviométrica (Figura 26), percebe-se que ocorre o mesmo que já havia sido afirmado por Hartmann *et al.*, (1986), onde ventos de direção sudoeste (SO) favorecem o escoamento do canal e os de direção nordeste (NE) causam o represamento ou a diminuição da vazão. Para esta análise o hidrograma foi dividido em três períodos: o período 1 compreendido entre 18/05/18 a 22/05/18; o período 2 de 22/05/18 a 01/06/18; o período 3 de 01/06/18 a 03/06/18. Abaixo do hidrograma encontram-se os dados de direção e velocidade do vento para cada um dos períodos respectivamente.

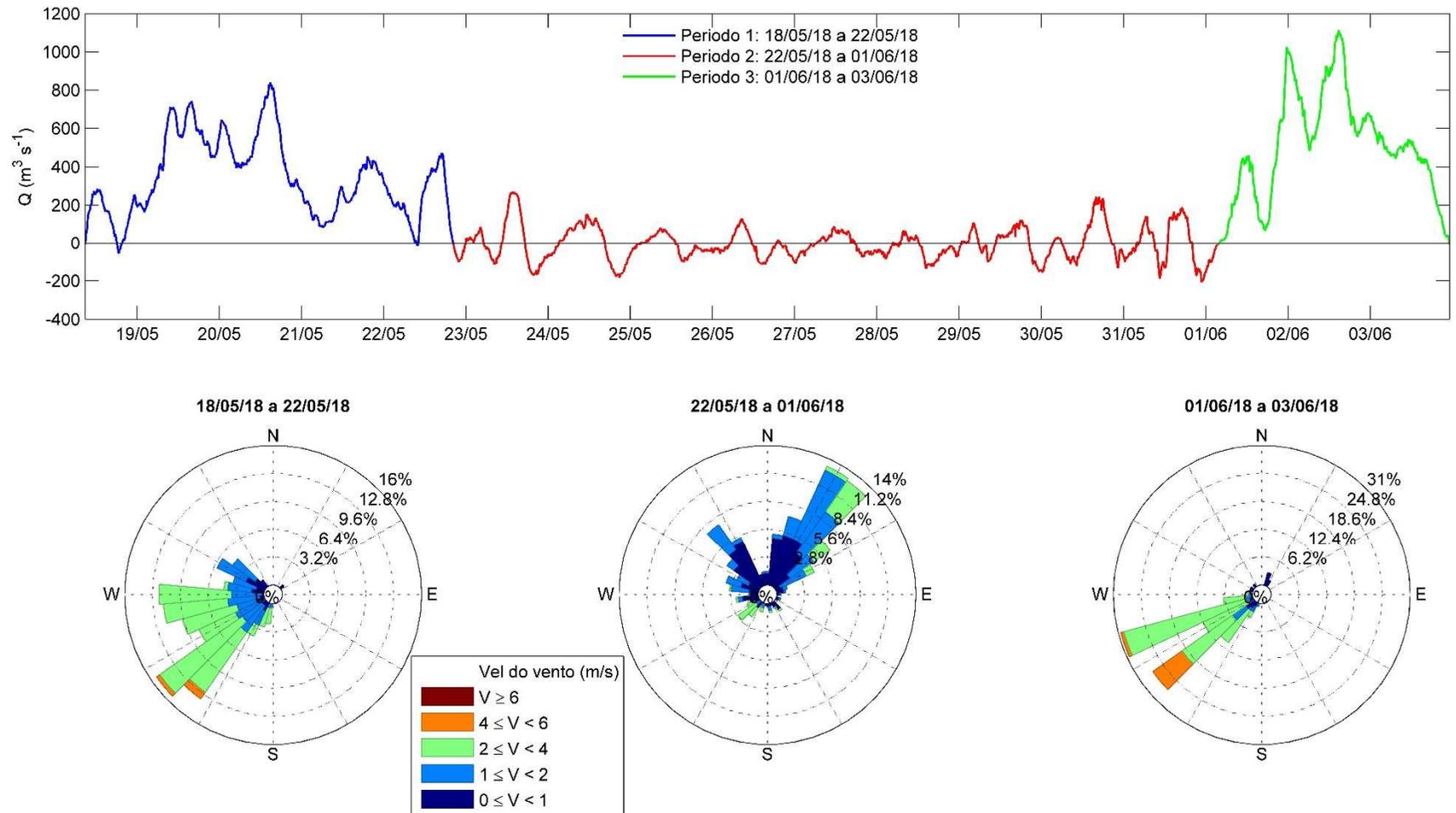


Figura 26 – Análise do comportamento das vazões diante as condições do vento.

Percebe-se que nos períodos 1 e 3 o gráfico apresenta vazões mais altas e se comparadas com o vento, há uma predominância da direção sudoeste (SO), o que facilita o escoamento no sentido Laguna dos Patos, já se comparado ao período 2 verifica-se a predominância dos ventos nordeste (NE) e as baixas vazões, logo, o represamento das águas.

5 Conclusão

Pode-se concluir que o método das velocidades indexadas é altamente eficaz na estimativa das descargas líquidas do canal São Gonçalo, especialmente por estar localizado em uma região de planície, conectado por duas lagoas, onde os métodos tradicionais de medições de vazão acabam não sendo capazes de representar as características do escoamento. Logo, com os medidores acústicos Doppler foi possível avançar tecnologicamente, permitindo obter medidas mais rápidas, mais precisas e menos dispendiosas a longo prazo. Todavia, por ser uma tecnologia ainda “nova”, cuidados devem ser tomados a fim de garantir a qualidade dos dados.

Embora a região não sofra com a disponibilidade de água no momento, o mau uso e a má distribuição deste recurso são fatores que podem influenciar na geração de conflitos e problemas relacionados ao seu uso. Desta forma, ao estabelecer o monitoramento contínuo de vazões, órgãos e entidades governamentais usufruirão de informações valiosas para o gerenciamento e o manejo eficiente da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

6 Recomendações

A fim de garantir a qualidade das informações geradas pelo modelo e aumentar o domínio dos dados, recomenda-se a realização de novas medições de vazão nas mais variadas condições de fluxo para uma melhor representação do escoamento.

Recomenda-se alterar os intervalos de medição do ADVN durante as medições de vazão com o ADCP para computar uma média de velocidades a cada 60 segundos (*averaging e measurement interval* de 60s). O intervalo de medição mais curto e a média contínua fornecerão dados de velocidade indexada mais representativos das condições de vazão durante as medições, permitindo uma maior flexibilidade nos tempos de início e término de cada medição de vazão, assim como também uma sincronização mais precisa entre o ADVN e o ADCP.

Como canais naturais sofrem mudanças em sua geometria devido a alterações do seu leito no decorrer do tempo, indica-se uma reavaliação da seção transversal pelo menos uma vez ao ano a fim de verificar alterações nas condições de escoamento.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Medição de descarga líquida em grandes rios**: manual técnico / Agência Nacional de Águas. -- 2. ed. -- Brasília: ANA, 2014.94p : il.

AGÊNCIA DA LAGOA MIRIM. **Bacia da Lagoa Mirim**. Disponível em: <<http://wp.ufpel.edu.br/alm/bacia-da-lagoa-mirim>>. Acesso em: 05 mai.

BRIDGE, John. **Rivers and Floodplains**: forms, processes, and sedimentary record. Ed. Blackwell Science. 2009. 504p.

CAPÍTOLI, Ricardo Roberto; COLLING, Leonir André; BEMVENUTI, Carlos Emílio. Cenários de distribuição do mexilhão dourado *Limnperna fortunei* (mollusca-bivalvia) sob distintas condições de salinidade no complexo Lagunar Patos-Mirim, RS-Brasil. **Atlântica**, Rio Grande, n. 30, p. 35-44, 2008.

CARVALHO, Thiago Morato de. Técnicas de Medição de Vazão por Meios Convencionais e Não Convencionais. RBGF – **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 01, p. 73- 85, Maio/Agosto 2008.

GAMARO, Paulo Everardo Muniz. **Medidores Acústico Doppler de Vazão**. Assessoria de comunicação social, Itaipu Binacional, 2012. 164p.

GAMARO, Paulo Everardo Muniz. **Medição de Vazão pelo Método Acústico Doppler (ADCP) – Avançado**. Apostila do Curso de Capacitação EAD. Agência Nacional de Águas, 2012. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/64>> Acesso em: 01 mar. 2018

GOUVÊA, Tatiana; ZARNOT, Daiane Hellving; ALBA, José Mmaria Fillipini. Caracterização geoambiental e histórico do processo de desenvolvimento da bacia da Lagoa Mirim. In: DELLAZOPPA, Alvaro Roel; FLORES, Carlos Alberto; SAITO, Carlos Hiroo; ZARNOTT, Daiane Hellnvig; ANDREASE, Diana Musitelli; COSTA, Fábã Amorim; PICCIOLI, Gerardo Evia; NACHTIGAL, Gláucia Figueiredo; ALMEIDA, Ivan Rodrigues; MENEGHETI, João Oldair; SOBRINHO, João Paes Vieira; CARDOSO, Joel Henrique; ALBA, José Maria Filippini; SOSINSKI, Lílian Terezinha Winckler; VARELA, Mariana Vilaró; BARBIERI, Rosa Lia; GOUVÊA, Tatiana; STEIKE, Valdir **Sustentabilidade Socioambiental da Bacia da Lagoa Mirim**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. p. 19-20.

HARTMANN, Carlos; HARKOT, Paulo Fernando Carreta. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da laguna dos patos-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio Grande, v. 20, 1998.

KJERFVE B, SEELIGER U, LACERDA LD. A summary of natural and human-induced variables in coastal marine ecosystems of Latin America. In: Seeliger U, Kjerfve B (eds.) **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**. Springer-Verlag, Heidelberg. pp. 341-353, 2001.

LEOPOLD, Luna B. & MADDOCK, Thomas.. **Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. US Geological Survey. 252p, 1953.

LEWIN, J. Meander development and floodplain sedimentation: a case study from mid-Wales. **Geological Journal**, 13:25-36, 1978.

LEVESQUE, Victor A., e OBERG, Kevin A., **Computing discharge using the index velocity method**: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3–A23, 2012. 148 p

MUELLER, David S.; WAGNER, Chad R. **Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment**. U.S. Geological Survey, Agosto 2006.

MUELLER, David S., WAGNER, Chad R., REHMEL, Michael S., OBERG, Kevin A, e RAINVILLE, Francois, 2013, **Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat** (ver. 2.0, December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap.A22,95p.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, I. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.10, n. 3, p. 282-290, 1970.

SILVA, Rui Carlos Vieira da. MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba, MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Hidráulica Fluvial**. 2. Ed. rev. Rio de Janeiro. 306p. UFRJ, 2007

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

SONTEK. **RiverSurveyor S5/M9 System Manual**. San Diego, EUA: Outubro, 2017.

SONTEK. **ViewArgonaut User Guide**. San Diego, EUA: Abril, 2008.

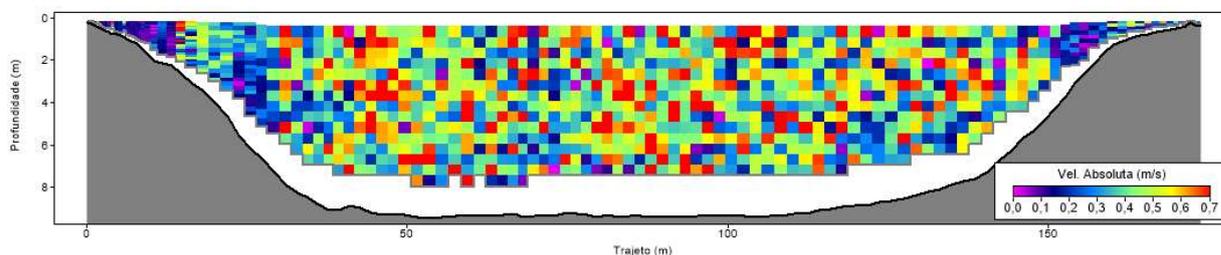
TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. (Org.). **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Editora da UFRGS/ Coleção ABRH Volume 4, 3a Edição, 2004. 943 p.

UNITED STATES OF GEOLOGICAL SURVEY, **Policy and technical guidance on discharge measurements using acoustic Doppler current profilers**. Office of Surface Water Technical Memorandum, 2002.02, 2001

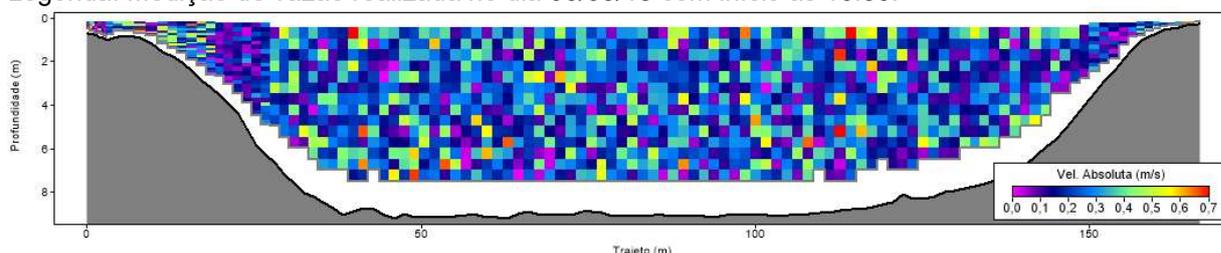
LIEW, Michael W. Van; VEITH, Tamie L.; BOSCH, David D.; ARNOLD, Jeffrey G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Lincoln, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

Apêndices

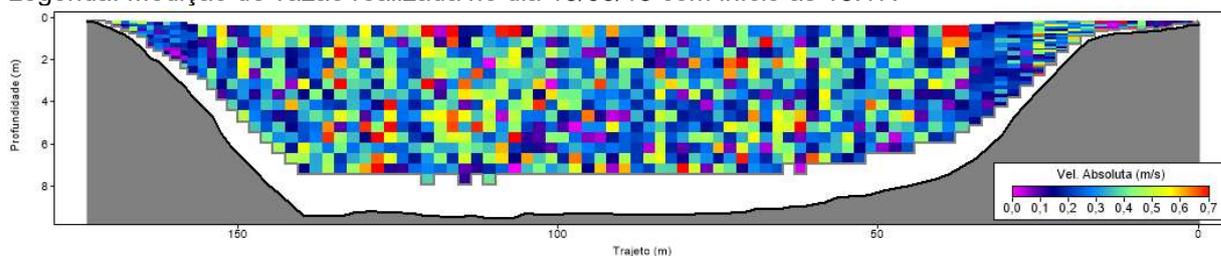
APÊNDICE A: Perfis verticais de velocidades absolutas nas medições de vazão realizadas no posto fluviométrico da localidade de Santa Isabel – Arroio Grande/RS, com equipamento dinâmico ADCP M9.



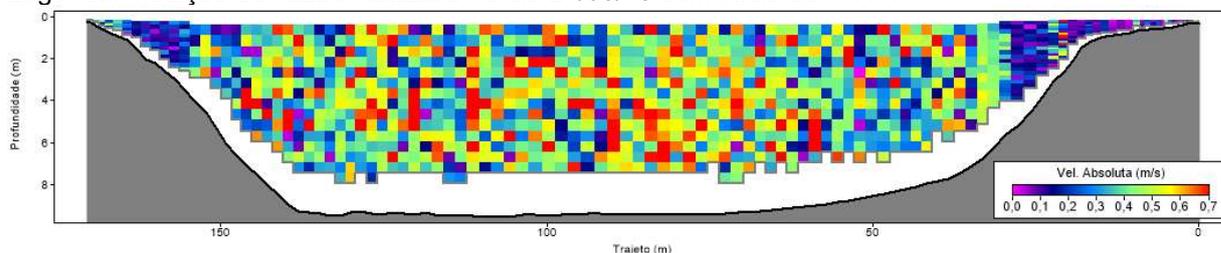
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 06/03/18 com início às 16:30.



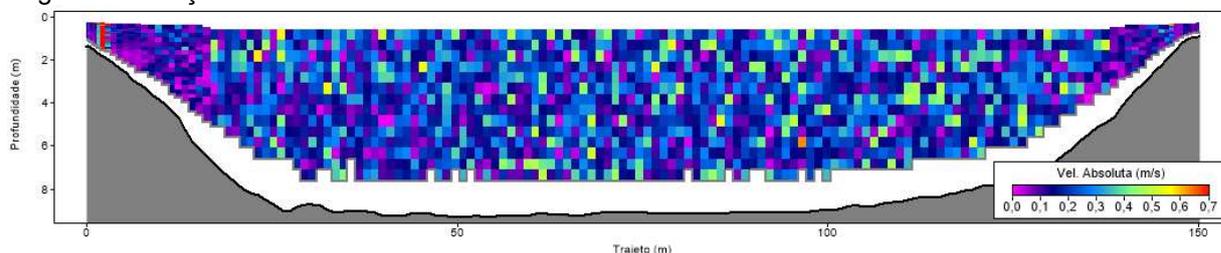
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 13/03/18 com início às 18:17.



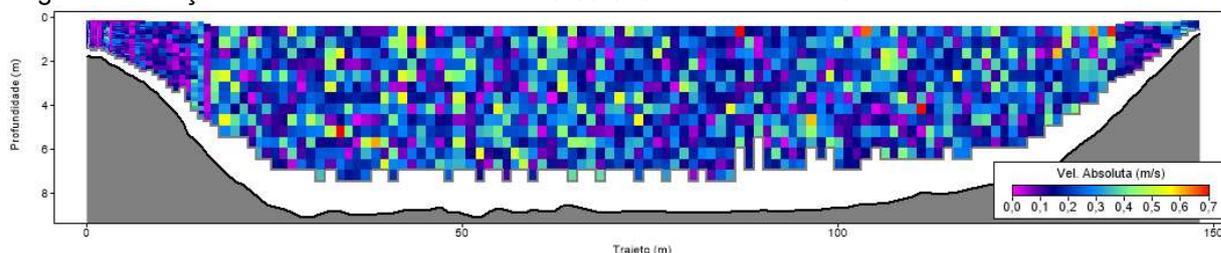
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 21/03/18 com início às 11:11.



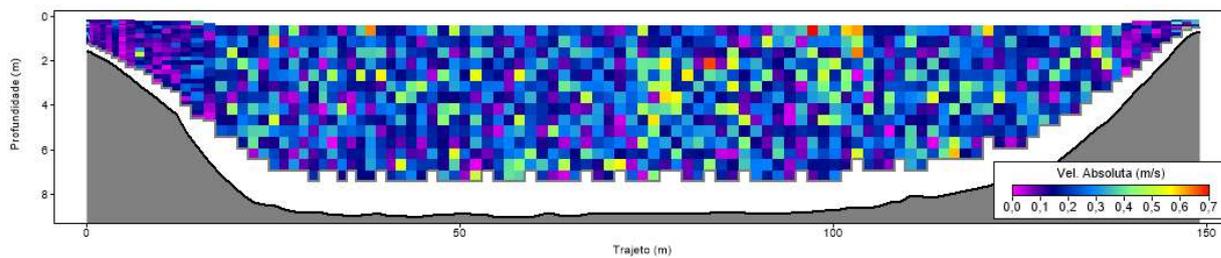
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 21/03/18 com início às 14:54.



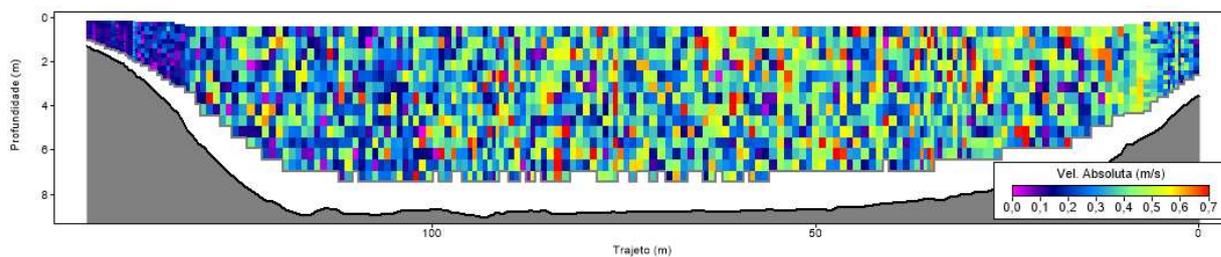
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 04/04/18 com início às 15:42.



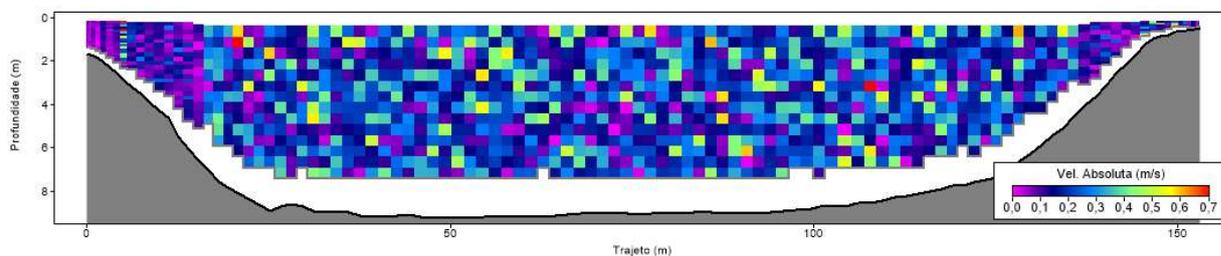
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 11/04/18 com início às 11:37.



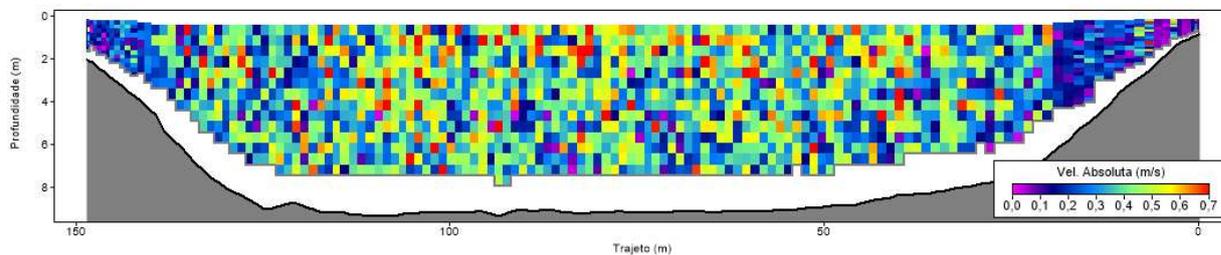
Legenda: Medição de vazão realizada no dia 11/04/18 com início às 17:06.



Legenda: Medição de vazão realizada no dia 08/05/18 com início às 12:15.



Legenda: Medição de vazão realizada no dia 23/05/18 com início às 16:43.



Legenda: Medição de vazão realizada no dia 06/06/18 com início às 12:37.