

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MÔNICA COFFERRI

**DETERMINAÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA ATRAVÉS DE DIFERENTES
METODOLOGIAS**

**Alegrete
2017**

MÔNICA COFFERRI

**DETERMINAÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA ATRAVÉS DE DIFERENTES
METODOLOGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Adriana Gindri Salbego

**Alegrete
2017**

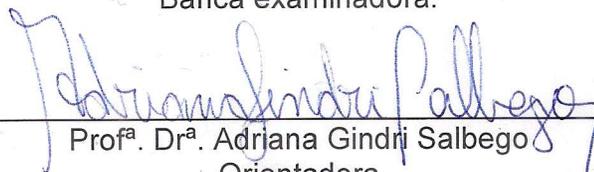
MÔNICA COFFERRI

**DETERMINAÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA ATRAVÉS DE
DIFERENTES METODOLOGIAS**

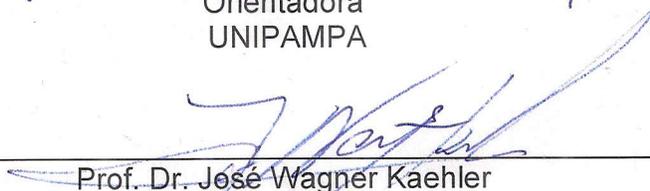
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de novembro
de 2017.

Banca examinadora:



Profª. Drª. Adriana Gindri Salbego
Orientadora
UNIPAMPA



Prof. Dr. José Wagner Kaehler
UNIPAMPA



Prof. Me. Marília Ferreira Tamiosso
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional em todas as horas.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais Nilo e Maribel e meu irmão Glaycon, por todo o apoio, carinho e incentivo prestados no período de minha graduação; nunca mediram esforços para auxiliar a conquistar meus objetivos.

À professora Adriana Gindri Salbego, pelo suporte e conhecimento compartilhado na realização deste trabalho.

Ao professor José Wagner Kaehler, colega Leonardo Richter e Sr. Moacir P. Antunes Filho, pelo auxílio prestado durante a aplicação dos experimentos. Sem a colaboração, esse trabalho não seria possível de ser realizado.

Aos meus amigos e ao meu namorado, por compreenderem os momentos de ausência, que muitas vezes foram necessários, assim como pelo apoio e carinho prestados desde sempre.

“Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?”.

Fernando Pessoa

RESUMO

Os objetivos deste trabalho referem-se à medição de vazão em um curso d'água localizado na cidade de Alegrete, estado do Rio Grande do Sul. O local da medição pertence à microbacia hidrográfica do Arroio Caverá, que possui uma área de drenagem correspondente a 1.450 km² e deságua na sub-bacia do Ibirapuitã, com área de 5.965 km². A partir das medições realizadas pelo método do flutuador, molinete hidrométrico modelo OTT C31 e método acústico com o equipamento OTT Qliner 2, realizou-se uma análise comparativa afim de se verificar o método que apresenta maior confiabilidade de resultados. Os resultados encontrados foram correlacionados com os dados apresentados pela estação fluviométrica na sub-bacia do Ibirapuitã (código 76750000 da ANA), no mesmo dia das medições. Assim, foi possível também validar o método de proporção de áreas, que realiza a correspondência das vazões em áreas as quais não se dispõe de dados com aquelas que os apresentam, por meio das estações fluviométricas ou registros históricos.

Palavras-Chave: flutuador, molinete, ADCP, medição de vazão.

ABSTRACT

The aims of this work are to measure the discharge of a watercourse located in the city of Alegrete, state of Rio Grande do Sul. The measurement site belongs to the Arroio Caverá hydrographic basin, which has a drainage area corresponding to 1.450 km² and flows out to the Ibirapuitã sub basin, with an area of 5.965 km². From the measurements taken out by the float method, OTT C31 current meter and acoustic method with the OTT Qliner 2 equipment, a comparative analysis was carried out in order to verify the method with the highest reliability of results. The results were correlated with the data presented by the fluvimetric station in the Ibirapuitã sub-basin (code 76750000 from ANA), on the same measurement day. Thus, the area proportion method was validated, which performs the correspondence of the flows in areas that do not have data with those that present them, through fluvimetric stations or historical records.

Key words: float, current meter, ADCP, discharge measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grandezas necessárias para a determinação da descarga líquida.....	6
Figura 2 – Vista em planta e seção transversal de uma calha Parshall.....	9
Figura 3 – Alguns tipos de vertedores padronizados.....	10
Figura 4 – Execução do método do flutuador.....	12
Figura 5 – Molinete hidrométrico de eixo horizontal modelo OTT C31.....	15
Figura 6 – Molinete hidrométrico de eixo vertical modelo Price Pygmy.....	15
Figura 7 – Cálculo da seção média: esquema de verticais e áreas.....	17
Figura 8 – Método da meia seção: esquema de verticais e áreas.....	18
Figura 9 – Mapeamento da seção transversal através do método acústico.....	20
Figura 10 – Mudança de frequência causada pelo efeito Doppler.....	21
Figura 11 – Localização da ponte do Caverá e local de realização da medição.....	24
Figura 12 – Localização da microbacia do Arroio Caverá no contexto estadual.....	25
Figura 13 – Localização da estação fluviométrica na sub-bacia do Rio Ibirapuitã.....	26
Figura 14 – Localização da estação fluviométrica Alegrete (código 76750000).....	27
Figura 15 – Software Hidroweb.....	27
Figura 16 – Equipamento OTT Qliner 2 e computador portátil.....	29
Figura 17 – Posição do equipamento OTT Qliner 2 na seção transversal do canal..	30
Figura 18 – Medição da vazão no Arroio Caverá com o equipamento OTT Qliner 2.	31
Figura 19 – Molinete fluviométrico OTT C31 e contador Z400.....	32
Figura 20 – Medição da vazão no Arroio Caverá com o equipamento OTT C31.....	33
Figura 21 – Seção transversal a partir da batimetria do molinete hidrométrico.....	36
Figura 22 – Perfil de velocidade em função da distância à margem de referência....	37
Figura 23 – Velocidades do molinete em função de diferentes profundidades.....	38
Figura 24 – Gráficos elaborados pelo software Qliner – primeira medição.....	40
Figura 25 – Dados processados pelo software Qliner – primeira medição.....	40
Figura 26 – Gráficos elaborados pelo software Qliner – segunda medição.....	41
Figura 27 – Dados processados pelo software Qliner – segunda medição.....	41
Figura 28 – Software Hidroweb com dados dos dias 01 a 05 de outubro de 2017....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler;

ANA – Agência Nacional de Águas;

MMA – Ministério do Meio Ambiente;

WMO – World Meteorological Organization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Hidrometria	4
2.2 Importância da medição de vazões em cursos d'água	4
2.3 Métodos para a medição da vazão	5
2.3.1 Método volumétrico	6
2.3.2 Método químico	7
2.3.3 Dispositivos regulares	8
2.3.3.1 Calha Parshall	9
2.3.3.2 Vertedores	10
2.3.4 Flutuadores	11
2.3.5 Medição através de molinete hidrométrico	13
2.3.5.1 Método da seção média	16
2.3.5.2 Método da meia seção	18
2.3.6 Método acústico	19
2.3.6.1 Tecnologia ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)	20
2.4 Estimativas de vazões para locais com dados escassos	22
2.4.1 Proporção de áreas	22
3. METODOLOGIA	24
3.1 Definição e localização da área de estudo	24
3.2 Estruturação da base cartográfica da área de estudo	25
3.3 Identificação da estação fluviométrica	26
3.4 Descrição dos métodos e materiais utilizados	28
3.4.1 Medição de vazão com flutuador	28
3.4.2 Medição de vazão com ADCP	29
3.4.3 Medição de vazão com molinete hidrométrico	31
3.5 Análise dos resultados através do intervalo de confiança	33
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	35

4.1 Análise dos resultados: método do flutuador.....	35
4.2 Análise dos resultados: método do molinete hidrométrico	36
2.5 Análise dos resultados: método do ADCP	40
2.6 Análise dos resultados: método de proporção de áreas.....	42
2.7 Análise dos resultados: intervalo de confiança.....	43
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6. REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de utilização dos recursos hídricos promove a necessidade de tratar a gestão de uma forma diferenciada, atentando-se quanto à disponibilidade e qualidade da água, principalmente.

O conhecimento das informações hidrológicas de um determinado curso d'água é de fundamental valia, uma vez que auxilia a tomada de decisões quanto ao abastecimento de água humano, irrigação, controle ambiental ou projetos de construção, como pontes e hidrelétricas. Para tanto, faz-se necessária a obtenção de dados hidrométricos precisos e seguros, afim de auxiliar a avaliação e planejamento do uso múltiplo da água.

Os processos de outorga para a utilização da água também necessitam do conhecimento dos dados hidrológicos, com o propósito de se evitar conflitos ou conceder direitos que não condizem com a realidade.

Os dados referentes à vazão em um curso d'água fornece informações a respeito da qualidade dos recursos hídricos, bem como determinação de hidrogramas e referências para o manejo e gestão. Ressalta-se, também, a importância desse dado para informar o volume de água necessário ao abastecimento humano, bem como a possível previsão e prevenção de enchentes.

A vazão não pode ser medida diretamente, mas pode ser calculada a partir de variáveis possíveis de serem tomadas, como largura, profundidade e velocidade do canal (WMO, 2010). Diversos métodos são empregados para a determinação da vazão, como o molinete hidrométrico, flutuador, método acústico ou estruturas como vertedores e calhas. A indicação para a utilização de cada método varia de acordo com as características dos cursos d'água – de pequeno, médio ou grande porte -, bem como a disponibilidade dos equipamentos, tempo para aplicação da metodologia, qualificação dos aplicadores, entre outros.

O método convencional (com molinete hidrométrico) calcula a vazão a partir da determinação da área da seção e velocidade média do fluxo. Consiste no método mais tradicional utilizado, apesar de apresentar maior dificuldade de obtenção de dados em grandes profundidades e requerer maior tempo de execução quando comparado ao método acústico, por exemplo. (SANTOS et al., 2001).

A medição acústica consiste em um método mais moderno de medição da vazão. Possui como princípio a integração de áreas e velocidades da seção, porém, essas informações são coletadas através de ondas acústicas de alta frequência. Esse método é mais utilizado em cursos d'água de médio e grande porte, necessitando de menor tempo de execução. Entretanto, é um método com custo mais elevado em relação aos outros, o que o torna menos acessível.

A maneira mais simples para medir a velocidade da água é através de um flutuador. Nessa metodologia é possível obter-se a velocidade superficial através do tempo de deslocamento de um flutuador num dado percurso. Geralmente, é uma técnica de medição que apresenta resultados com razoável precisão, recomendada para estimativas preliminares, ou quando os outros métodos não podem ser empregados.

Diante das diferentes técnicas comumente utilizadas para a determinação de um dado tão importante para a hidrologia, faz-se necessária a comparação entre a eficiência de cada um, considerando suas diferentes características, de modo a contribuir para a escolha destes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Comparar as técnicas de medição de vazão em cursos d'água, por meio de equipamentos convencionais (método do flutuador e molinete hidráulico) e acústico (ADCP – Acoustic Doppler Current Profile).

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar estatisticamente a variação entre resultados obtidos através dos métodos do flutuador, molinete e ADCP;
- Utilizar os métodos de cálculo de seção média e meia seção para o cálculo de vazão, comparando os resultados;
- Relacionar as vazões medidas *in loco* com as obtidas pelo método de proporção de áreas (estação fluviométrica).

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está disposto em cinco capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo introduziu o assunto correspondente à pesquisa, apresentando sua justificativa, objetivos e disposição do texto.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento do trabalho, trazendo conceitos das áreas da hidrologia correspondentes ao tema estudado, bem como descreve os principais métodos de medição, e os utilizados na metodologia dessa pesquisa.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada, juntamente com os materiais necessário para a prática de pesquisa.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos através da prática proposta e a análise realizada a partir desses.

No quinto capítulo encontram-se as considerações finais do presente trabalho

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Hidrometria

A hidrometria constitui-se de uma parte da hidrologia destinada à medição de variáveis hidrológicas, objetivando mensurar dados como precipitações, vazões, níveis da água, entre outros, quanto a variação temporal e espacial (SANTOS et al., 2001). Segundo Pereira et al. (2003), dentro da hidrometria pode-se citar a fluviometria, que abrange as medições de vazões e cotas de rios.

Conforme cita Santos et al. (2001, p. 119), “a vazão ou descarga de um rio é o volume de água que passa através de uma seção transversal na unidade de tempo (em geral um segundo)”. Complementando essa assertiva, Johnstone (1949, p. 56) afirma que a vazão é igual à área transversal multiplicada pela velocidade média nesta seção.

2.2 Importância da medição de vazões em cursos d'água

A vazão de um curso d'água serve ao ser humano em várias maneiras, uma vez que fornece água para uso doméstico, comercial e industrial, bem como irrigação para cultivo, diluição e transporte de sólidos, energia para produção hidroelétrica, canais de transporte para comércio, além de ser um meio para recreação.

Registros de vazão são dados básicos utilizados para desenvolver suprimentos confiáveis a respeito de águas superficiais, porque esses fornecem informações sobre a disponibilidade e sua variabilidade no tempo e espaço. Esses registros são utilizados no planejamento de projetos relacionados às águas superficiais, e também utilizados na administração ou operação desses projetos após os mesmos serem implantados (WMO, 2010).

O crescimento da preocupação ambiental, nas diferentes atividades desenvolvidas pelo ser humano, tem acarretado, a nível mundial, um novo conceito de planejamento, gestão e uso dos recursos hídricos, onde se objetiva melhorar a utilização da água através de medidas técnicas, administrativas e legais.

Para um gerenciamento adequado dos potenciais hidráulicos disponíveis no mundo, é fundamental conhecer o comportamento dos rios, suas sazonalidades e vazões, assim como os regimes pluviométricos das diversas bacias hidrográficas, considerando as suas distribuições espaciais e temporais, que exige um trabalho permanente de coleta e interpretação de

dados, cuja confiabilidade torna-se maior à medida que suas séries históricas ficam mais extensas, envolvendo eventos de cheias e de secas (Ibiapina et al., 2003, apud Pereira et al., 2003, p. 3).

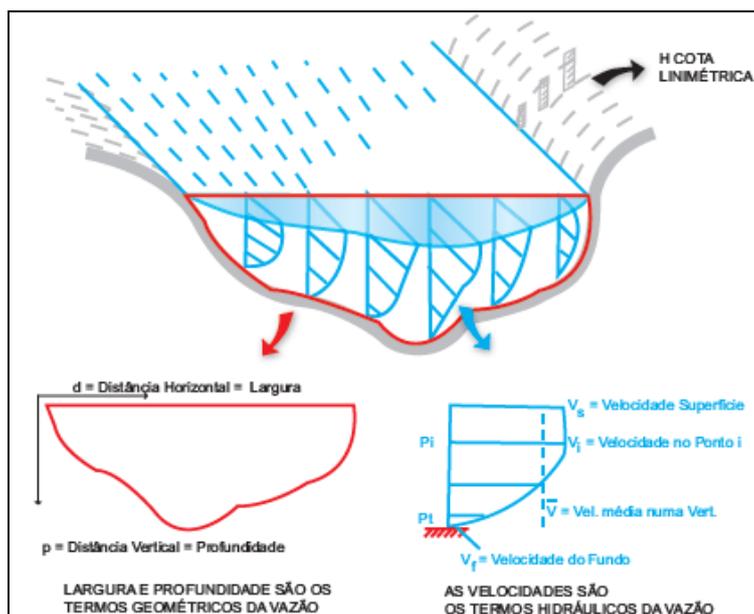
Para projetos de obras hidráulicas é necessário que ocorra a manipulação e apresentação gráfica dos dados de vazão, geralmente correspondentes à longos períodos de tempo, para que se realize uma melhor interpretação das características do rio – como seu regime, comportamento, ou efeitos de regulação propiciados pelos reservatórios. Esses dados podem ser organizados em forma de fluviogramas, curvas de permanência ou curvas de massa (PINTO et al., 1976).

Flórez (2014) destaca ainda que a potência de uma usina hidrelétrica e de sua energia firme são parâmetros essenciais para o bom funcionamento dessa, e são resultados relevantes em um estudo hidrológico. Portanto, valer-se de bons dados hidrológicos históricos permite selecionar uma vazão de projeto coerente ambientalmente e hidroenergeticamente, e, somente o estudo hidrológico pode fornecer informações a respeito da vazão máxima que pode ocorrer em um determinado período de retorno e os sedimentos estacionais presentes na vazão, por exemplo. São dados diretamente ligados ao projeto e estabilidade dessas obras.

2.3 Métodos para a medição da vazão

Os métodos de medição da vazão na hidrometria associam esse dado a uma cota linimétrica a qual é correspondente à cota da superfície livre em relação a um plano arbitrário de referência, como pode ser visto na Figura 1. (SANTOS et al., 2001).

Figura 1 – Grandezas necessárias para a determinação da descarga líquida



Fonte: ANA (2014, p. 30)

Os métodos comumente empregados para a medição da vazão são:

- método volumétrico;
- método químico;
- dispositivos regulares;
- flutuadores;
- molinete hidrométrico;
- método acústico.

Serão descritos com maiores detalhes no presente trabalho os métodos de medição da velocidade, acústico e flutuadores, uma vez que eles serão utilizados para a realização da metodologia proposta.

2.3.1 Método volumétrico

O método volumétrico é também denominado de determinação direta da vazão, ou método do recipiente, visto que consiste em encher um recipiente de volume conhecido registrando o tempo de enchimento (FLÓREZ, 2014). Em caso de pequenos cursos d'água, o recipiente pode consistir em um balde ou pequeno

tanque. Para casos com maiores vazões, por exemplo, pode-se medir a vazão através de reservatório de uma usina hidrelétrica. (SANTOS et al., 2001).

A relação entre os dois valores medidos em campo indica a vazão, através da Equação 1.

$$Q = \frac{V_r}{t} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad \dots(1)$$

Onde V_r é o volume do recipiente e t corresponde ao tempo de enchimento.

Recomenda-se realizar diversas medidas para que se obtenha a média dos dados, assim também para que elas sejam realizadas em diferentes épocas do ano (FLÓREZ, 2014).

Santos et al. (2001) afirmam que esse método pode ser o mais preciso de todos, desde que o volume do recipiente/reservatório seja conhecido com exatidão. Entretanto, seu emprego é limitado a recursos hídricos muito pequenos.

2.3.2 Método químico

O método químico constitui-se em lançar ao fluxo de água uma substância química (geralmente bicromato de sódio) à montante da seção a ser medida e retirar amostras nessa seção, que serão dosadas, permitindo, assim, o conhecimento da descarga a partir da diluição verificada (PINTO et al., 1976).

Segundo Santos et al. (2001), esse método é empregado com frequência em rios de montanha, os quais apresentam grande turbulência, visto que, devido à sua pouca profundidade juntamente com o leito irregular e presença de pedras, o uso de molinetes ou outros equipamentos físicos para a medição pode ser prejudicado.

São utilizados dois métodos para determinar a vazão pelo processo químico:

- método de injeção contínua;
- método da integração.

No primeiro método, é lançada à montante do rio, durante um intervalo de tempo, uma vazão constante q (l/s) de solução salina, em concentração C (g/l). São colhidas na seção de medição, durante um tempo em que q não varia, amostras que

serão posteriormente dosadas. Obtendo-se o valor da concentração média C_1 (mg/l), encontra-se o valor da vazão Q através da Equação 2 (PINTO et al., 1976).

$$Q = q \frac{C}{C_1} (m^3/s) \quad \dots(2)$$

Dumas (1952) determinou um erro máximo de $\pm 5\%$ nesse método utilizando bicromato de sódio. Consiste em uma metodologia que geralmente limita-se a vazões inferiores a 30 m³/s, devido, principalmente, a dificuldade de precisão em se estimar a concentração média (C_1).

Pelo método da integração lança-se um volume V (l) de uma solução em concentração C (g/l) para, posteriormente, serem colhidas amostras a jusante durante todo o tempo de passagem T da solução diluída. A vazão é obtida pela Equação 3 (SANTOS et al., 2001).

$$Q = \frac{V C}{\int_0^T C_1 dt} (m^3/s) \quad \dots(3)$$

Além da imprecisão de medição citada anteriormente, pode ocorrer a retenção de parte da solução no percurso, acarretando em erros na determinação da vazão. André (1960) estimou diferenças entre 1% e 7% em 90% dos casos de medição com método da integração e método do molinete. Com relação à várias medidas tomadas no mesmo local através deste método químico, a diferença foi inferior à 5% (SANTOS et al., 2001).

2.3.3 Dispositivos regulares

O emprego de dispositivos com geometria simples e bem definida para a medição de vazão é indicado para cursos d'água com pequenas vazões, de no máximo 5 m³/s ou menores.

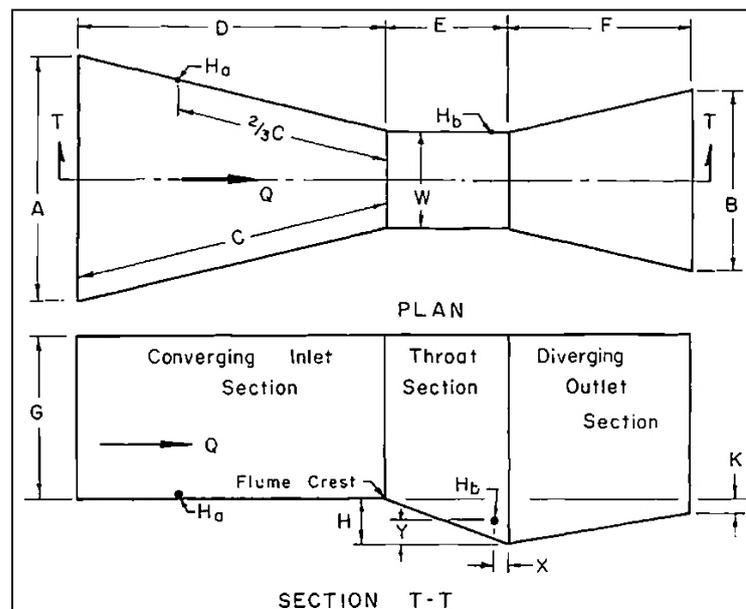
Esse método utiliza calhas Parshall e vertedores de medida, onde a relação entre cota e vazão é tomada por meios teóricos ou em ensaios de laboratório. Devido ao fato de as medidas desses dispositivos serem padronizadas, as relações entre cota-descarga encontradas em laboratório podem ser transpostas para o campo facilmente.

2.3.3.1 Calha Parshall

A calha Parshall consiste em um dispositivo de trecho curto com geometria de fundo e paredes, o qual acelera a velocidade da água e cria uma passagem por escoamento crítico. Mede-se o nível da água a montante da passagem através do regime crítico, sendo esse dado possível de ser relacionado diretamente à vazão (WMO, 2010).

Na Figura 2 pode-se verificar que as calhas são dimensionadas com diferentes tamanhos ao longo de sua seção, de forma a permitir a medição em diferentes faixas de vazão.

Figura 2 – Vista em planta e seção transversal de uma calha Parshall convencional.



Fonte: Skogerboe et al. (1966, p.4)

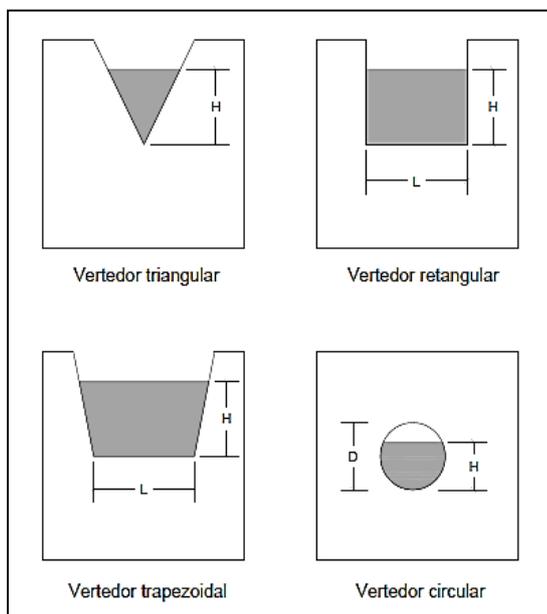
De acordo com Garcez (1988), a vantagem de se utilizar calhas em relação à vertedores deve-se ao fato de que essas ocasionam menor elevação do nível da água e maior facilidade de serem transpostas por material flutuante, como vegetação, entre outros. Santos et al. (2001) destacam ainda que, em uma única estrutura, é possível medir uma ampla faixa de vazões.

2.3.3.2 Vertedores

Os vertedores para medição de vazão podem ser classificados em dois grupos, de acordo com o tipo de soleira: vertedores de soleira delgada – compostos basicamente de uma placa fina com recorte em formato apropriado para que o dispositivo intercepte transversalmente o fluxo da água – e vertedores de soleira espessa, que possuem uma elevação plana no fundo do canal, o qual provoca um aumento de velocidade necessário para se formar um escoamento crítico sobre a soleira (SANTOS et al., 2001).

Devido aos diferentes formatos do recorte, dispõe-se de diversos tipos de vertedores (triangular, retangular, trapezoidal, etc.), os quais possuem suas próprias equações para a determinação da vazão, em função da largura da soleira e altura do dispositivo. A Figura 3 apresenta os diferentes tipos de vertedores usualmente utilizados, sendo eles: vertedor triangular, vertedor retangular, vertedor trapezoidal e vertedor circular.

Figura 3 – Alguns tipos de vertedores padronizados



Fonte: Elaboração própria

Garcez (1988) apresenta que as maiores dificuldades para a medição da vazão com vertedores encontram-se em problemas de erosão e assoreamento a

montante da soleira, inundações causadas pela elevação do nível de água a montante e, principalmente, quanto ao custo da instalação.

2.3.4 Flutuadores

A medição de vazão com flutuadores consiste em determinar a velocidade em que um objeto flutuante escoar, medindo-se o tempo necessário para que este se desloque em um trecho de curso d'água com comprimento conhecido (Figura 4).

Foi descrito pela primeira vez por Leonardo da Vinci (1452-1519), utilizando o método para mostrar que a velocidade máxima ocorre na superfície da água. Após, foi também recomendado por Benedetto Castelli (1577-1644) e aperfeiçoado nos séculos seguintes (UNESCO, 1974).

De acordo com Santos et al. (2001), corresponde a uma metodologia recomendada quando a vazão do rio é muito alta (maior que 300 l/s), podendo colocar em risco a vida dos hidrometristas, ou quando outros equipamentos (como o molinete) não estão disponíveis. Ainda, se os valores de velocidade são extremamente baixos e desaconselha-se o uso de molinete convencional – mas torna-se necessário levar em conta o efeito do vento que pode ser considerável.

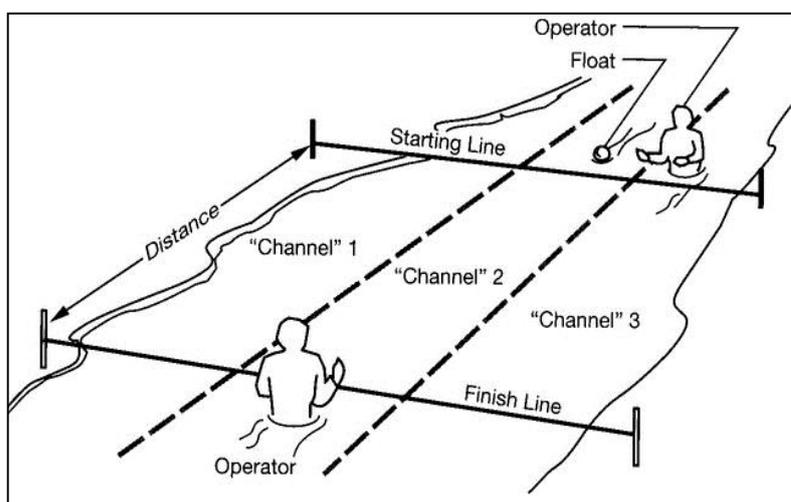
Os objetos utilizados na medição podem ser de superfície, sub-superfície, com haste ou garrafas e outros objetos flutuantes.

O flutuador de superfície flutua com a mesma velocidade da superfície do curso d'água e, por isso, é muito leve e pode ser arrastado pelo vento. Constitui-se de um método que indica apenas a velocidade da superfície da água e por isso é necessário aplicar-se um coeficiente redutor afim de se obter a velocidade média na seção (SANTOS et al., 2001). A Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2010) recomenda que se utilize um coeficiente de aproximadamente 0,85, que pode variar de 0,85 a 1,00, dependendo da forma da seção transversal, tipo do flutuador e distribuição da velocidade.

O flutuador sub-superficial é formado por um objeto submerso e arrastado pela corrente, estando conectado a um flutuador de superfície através de uma haste ajustável. Esse método pode medir diretamente a velocidade média, contanto que o curso d'água possua seção longitudinal uniforme e para a qual a posição da velocidade média na vertical é conhecida. Quando não houver informações a

respeito da distribuição da velocidade na vertical, é indicado que se posicione o objeto a aproximadamente 60% da profundidade (SANTOS et al., 2001).

Figura 4 – Execução do método do flutuador



Fonte: Sanders (1998, não paginado)

A velocidade do flutuador é igual a distância entre as seções dividida pelo tempo de travessia do objeto. A velocidade média do fluxo na vertical corresponde a velocidade do flutuador multiplicada pelo coeficiente redutor (WMO, 2010).

Ao optar-se pela medição de vazão através de objetos à deriva como troncos de árvores, por exemplo, pode-se obter um valor de velocidade mais confiável em relação aos flutuadores comuns de superfície. Se for observado um número suficiente de pontos ao longo da largura do rio, esses podem fornecer um valor bastante razoável da velocidade superficial – que também demanda a aplicação de um coeficiente redutor. Santos et al. (2001) também afirmam que, em casos onde as medições pelo método do flutuador sejam favorecidas pelas condições hidráulicas do local de medição, é possível obter-se resultados igualmente bons com o molinete, se o seu uso for aplicável.

A escolha do local onde será utilizado o flutuador deve contemplar questões como o “trecho retilíneo com margens paralelas, com comprimento mínimo de duas vezes a sua largura, com boa visibilidade em todos os sentidos, com declividade do leito constante e profundidade uniforme no sentido longitudinal” (SANTOS et al., 2001, p. 198).

2.3.5 Medição através de molinete hidrométrico

O molinete hidrométrico consiste em um aparelho que determina a velocidade mediante a medida do tempo necessário para um hélice ou concha completar um certo número de rotações (PINTO et al., 1976). Constitui-se em um dos métodos mais utilizados para a medição de vazão, e que determina a área da seção transversal do curso d'água e a velocidade média do fluxo passante nessa seção.

A área é determinada por meio da medição da largura do rio e da profundidade em um número significativo de pontos ao longo da seção, chamados de verticais, nas quais também é realizada a medição da velocidade com molinete hidrométrico, em um número significativo de pontos a diferentes profundidades, que irão originar a velocidade média na vertical (SANTOS et al., 2001, p. 124).

Para a Agência Nacional das Águas (ANA, 2012), a medição da vazão deverá ser realizada pelo processo detalhado, a menos que seja determinado o contrário. Por meio desse processo as posições do molinete para estimar a velocidade são relacionadas com a profundidade da vertical (Tabela 1), já que a velocidade da água é normalmente maior na parte central de um fluxo d'água, do que em suas margens, bem como mais baixa ao fundo, do que na superfície.

Tabela 1 – Tabela de pontos para o método detalhado

Nº de pontos	Posição na vertical (*) em relação a profundidade (p)	Cálculo da velocidade média (vm) na vertical	Profundidade (m)
1	0,6 p	$v_m = v_{0,6}$	0,15 - 0,6
2	0,2 e 0,8 p	$v_m = (v_{0,2} + v_{0,8})/2$	0,6 - 1,2
3	0,2; 0,6 e 0,8 p	$v_m = (v_{0,2} + 2 v_{0,6} + v_{0,8})/4$	1,2 - 2,0
4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p	$v_m = (v_{0,2} + 2 v_{0,4} + 2 v_{0,6} + v_{0,8})/6$	2,0 - 4,0
6	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 p e F	$v_m = [v_s + 2(v_{0,2} + v_{0,4} + v_{0,6} + v_{0,8}) + v_f]/10$	> 4,0

Vs - velocidade medida na superfície e Vf - velocidade medida no fundo do rio;

*A posição S (superfície) corresponde à profundidade 0,10 m e a posição F (fundo) corresponde àquela determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (ANA, 2012, p.25)

Caso for utilizado apenas um dado de medição, pode-se acarretar uma estimativa errônea da velocidade média. Para evitar esse tipo de erro, é importante tomar as medidas em várias verticais (Tabela 2).

Tabela 2 – Distância recomendada entre verticais

Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)
≤ 3,00	0,30
3,00 - 6,00	0,50
6,00 - 15,00	1,00
15,00 - 30,00	2,00
30,00 - 50,00	3,00
50,00 - 80,00	4,00
80,00 - 150,00	6,00
150,00 - 250,00	8,00
≥ 250,00	12,00

Fonte: Adaptado de Santos et al., (2001 p.142)

Entretanto, Lobo (1997) apud Santos et al. (2001) recomenda a medição em 20 verticais, para qualquer largura de curso d'água entre 2 e 160 metros. Para cada vertical a velocidade deve ser tomada em dois ou até seis pontos, realizando-se duas medidas e, em caso de discrepância, uma terceira.

O método simplificado (ou método dos dois pontos) também é descrito em bibliografias; nele, se utiliza um ponto a 0,6 p ($p < 0,60$ m) e dois pontos a 0,2 e 0,8 p ($p \geq 0,60$ m). Pimenta (1996) “conclui a partir de análise de 115 medições realizadas pela CPRM que os métodos são estatisticamente equivalentes”.

Os molinetes hidrométricos podem ser classificados como de eixo vertical (tipo americano) e de eixo horizontal (tipo europeu). O segundo tem sido mais utilizado por hidrometristas no Brasil, com preferência para as marcas A.OTT, Amsler e Neyrpic (SANTOS et al., 2001).

O molinete de eixo horizontal apresentado na Figura 5 possui uma hélice que converte o movimento de translação do fluxo d'água em movimento de rotação; com o auxílio de um contador, é tomado o número de voltas que a hélice realizou em um determinado intervalo de tempo (CARVALHO, 2008).

Maldonado (2015) descreve que “para cada revolução da hélice do molinete, um impulso é transmitido, acionando o contador de impulsos (eletromecânico ou eletrônico), acoplado a um cronômetro de contagem regressiva”.

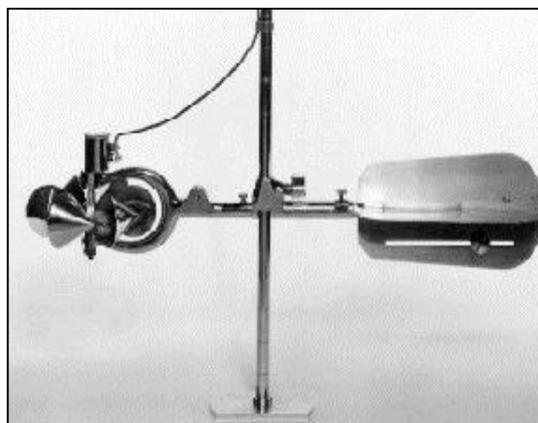
Figura 5 – Molinete hidrométrico de eixo horizontal modelo OTT C31



Fonte: OTT Hydromet (2017, não paginado)

O molinete de eixo vertical mostrado na Figura 6 é mais sensível a baixas velocidades. Pode também ser chamado de diferencial, uma vez que é a diferença de pressão do fluxo d'água nas partes côncavas e convexas que movimenta o objeto.

Figura 6 – Molinete hidrométrico de eixo vertical modelo Price Pygmy



Fonte: Bureau of Reclamation (2001, não paginado)

A Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2010) apresenta que, em testes comparativos entre o molinete de eixo vertical e horizontal, os resultados foram praticamente iguais. Entre os anos de 1958 e 1960, foram realizadas 19 medições de descarga líquida no Rio Mississippi, utilizando os molinetes do tipo Ott e Price. A diferença máxima encontrada na medição foi de 1,53%.

De acordo com o Manual Técnico de Medição de Descarga Líquida (ANA, 2014), é necessário que o conjunto do molinete contenha o certificado de

calibragem, o qual apresenta a equação utilizada para calcular as velocidades em função do número de rotações por segundo. A relação tipicamente utilizada é descrita na Equação 4:

$$V = a \left(\frac{N}{t} \right) + b \quad \dots(4)$$

Em que:

a: passo da hélice (constante – função da hélice do molinete);

b: inércia da hélice (constante – função da hélice do molinete);

t: duração da medição;

N: número de rotações da hélice.

Os molinetes hidrométricos de eixo horizontal são geralmente comercializados com várias hélices, utilizadas para diferentes faixas de velocidade. Recomenda-se que o instrumento seja aferido com frequência, afim de se detectar mudanças de suas características, a partir do efeito do atrito do molinete (ANA, 2014).

Deve-se atentar para a utilização do molinete apenas entre a faixa de valores para que foi aferido. Caso seja necessário utilizá-lo para velocidades diferentes, deve-se substituir a hélice – ou utilizar o micromolinete no caso de velocidades muito baixas.

Santos et al. (2001) afirmam que o número de rotações registradas pelo instrumento em cada vertical deve ser sempre superior a 20, caso contrário o erro no registro será superior a 5%.

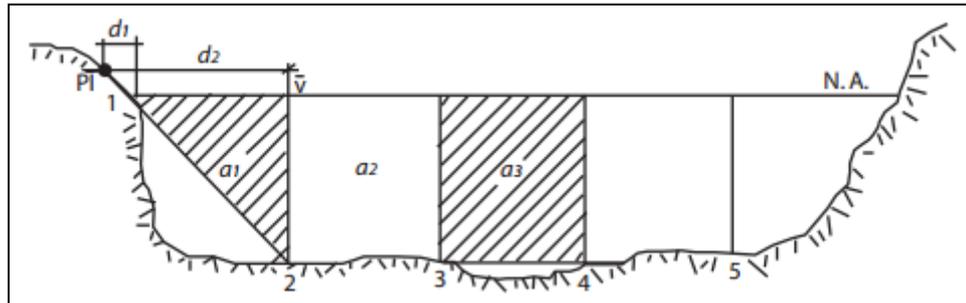
Segundo Santos et al., (2001), o processo numérico de cálculo a partir da medição com molinete hidrométrico apresenta a vantagem de obter-se os dados em tempo real, uma vez que pode ser realizado na caderneta de campo. Assim, durante o processo de medição, é possível avaliar os dados e detectar a consistência desses. Os dois métodos utilizados para o cálculo são o de meia seção e seção média, descritos a seguir.

2.3.5.1 Método da seção média

A partir desse método as vazões parciais são calculadas em cada subseção entre as verticais de medição. São necessários os dados de largura da subseção,

média das profundidades e média das velocidades entre as verticais envolvidas, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Cálculo da seção média: esquema de verticais e áreas



Fonte: Santos et al. (2001, p. 145)

O procedimento para a determinação da descarga líquida é apresentado como segue:

a) Cálculo das velocidades médias nas verticais, de acordo com o tipo de medição utilizado (ver Tabela 1);

b) Velocidades médias nos segmentos:

$$v(a1) = \frac{v1+v2}{2} \quad \dots(5)$$

$$v(a2) = \frac{v2+v3}{2}$$

c) Áreas dos segmentos

$$a1 = (d2 - d1) \left[\frac{(p2+p1)}{2} \right] \quad \dots(6)$$

$$a2 = (d3 - d2) \left[\frac{(p3+p2)}{2} \right]$$

d) Vazões nos segmentos:

$$qa1 = va1 a1 \quad \dots(7)$$

$$qa2 = va2 a2$$

e) Vazão total:

$$Q = \Sigma qi \quad \dots(8)$$

f) Área total:

$$A = \sum ai \quad \dots(9)$$

g) Velocidade média:

$$V = \frac{Q}{A} \quad \dots(10)$$

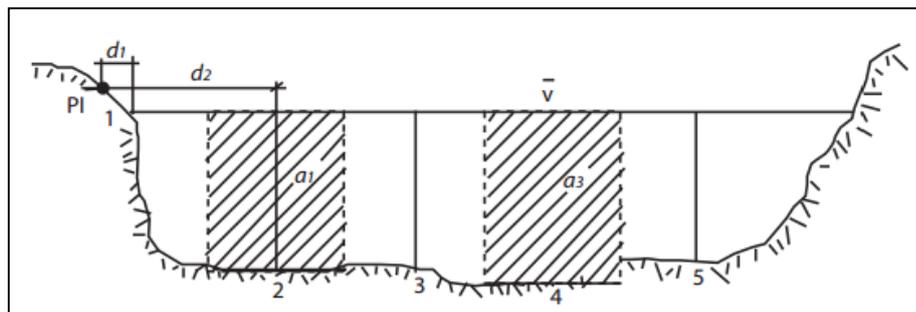
h) Profundidade do rio:

$$P = \frac{A}{L} \quad \dots(11)$$

2.3.5.2 Método da meia seção

É o método mais utilizado por técnicos de entidades de hidrometria no Brasil. Consiste no cálculo de vazões parciais, determinadas em cada região de influências das verticais (Figura 8).

Figura 8 – Método da meia seção: esquema de verticais e áreas



Fonte: Santos et al. (2001, p. 148)

O procedimento para a determinação da descarga líquida é apresentado na sequência:

a) Cálculo das velocidades médias nas verticais, de acordo com o método de medição;

b) Largura dos segmentos:

$$l2 = \frac{d3-d1}{2} \quad \dots(13)$$

$$l3 = \frac{d4-d2}{2}$$

c) Área dos segmentos:

$$a_2 = l_2 p_2 \quad \dots(14)$$

$$a_3 = l_3 p_3$$

d) Vazões nos segmentos:

$$qa_2 = v_2 a_2 \quad \dots(15)$$

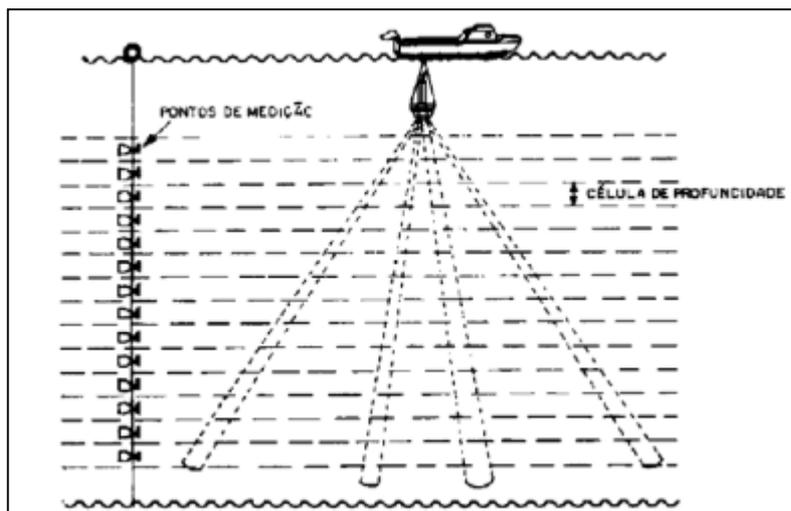
$$qa_3 = v_3 a_3$$

A determinação da vazão total, área total, velocidade média, largura e profundidade do rio seguem as equações apresentadas no método da seção média (vide item 2.3.5.1).

2.3.6 Método acústico

A utilização da tecnologia Doppler para medição de vazão iniciou-se na área da oceanografia. Essa metodologia permite obter “um perfil formado por células que são áreas em vez de pontos e milhares de medidas em cada área em vez de medidas pontuais” (ANA, 2014, p. 61). O método consiste em mapear toda a seção (Figura 9), em relação ao módulo e direção da velocidade da água, profundidade, e também quanto à quantidade de sedimentos em suspensão.

Figura 9 – Mapeamento da seção transversal através do método acústico



Fonte: Tiago Filho et al. (1999, p.3)

Consiste em uma metodologia que, quando comparada à medição com molinete, apresenta vantagens em relação à segurança, tempo necessário para realizar as medições, maior simplicidade para executá-las, maior quantidade e qualidade de dados. Entretanto, como desvantagens pode-se citar o alto custo do equipamento, bem como limitação para cursos d'água muito rasos (profundidade inferior a 0,50 m).

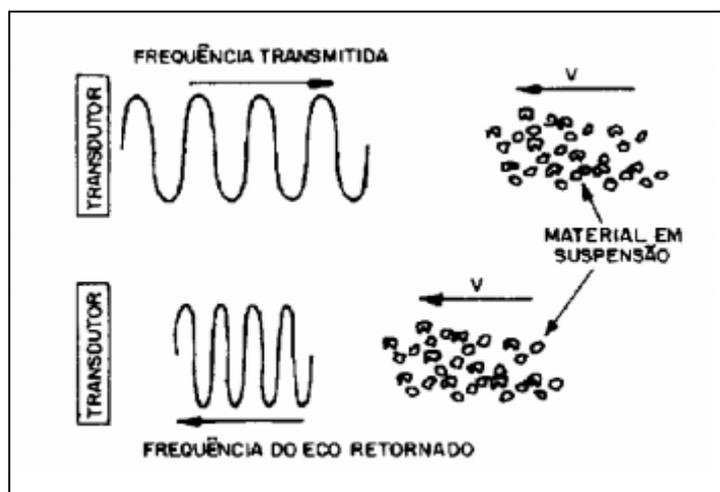
2.3.6.1 Tecnologia ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

No equipamento de medição ADCP, o efeito Doppler consiste em transmitir ondas sonoras através da água. O som refletido pelas partículas em suspensão na água volta para o instrumento, que percebe o eco através de sensores (Figura 10), fazendo assim com que ele reconheça as diferentes profundidades e velocidades das linhas de corrente através do efeito Doppler. Dependendo do modelo, o equipamento pode utilizar diferentes frequências para emitir o som (FILHO et al., 1999).

O efeito Doppler refere-se à mudança de frequência do sinal transmitido pelo sonar, causada pelo movimento relativo entre o aparelho e o material em suspensão da água sob a ação do feixe das ondas sonoras. Como o material em suspensão se desloca na mesma velocidade da corrente da água, a magnitude do efeito Doppler é diretamente proporcional à essa velocidade. Medindo-se a frequência dos ecos que retornam do material em suspensão e comparando-a com a frequência do som emitido, o ADCP

determina a velocidade da partícula que é a mesma da corrente da água (TIAGO FILHO et al., 1999, p. 2)

Figura 10 – Mudança de frequência causada pelo efeito Doppler



Fonte: Tiago Filho et al. (1999, p.3)

O perfil de velocidades da seção transversal é construído pelo eco refletido pelas partículas em suspensão, onde a coluna d'água é separada em "células de profundidade" (segmentos de igual altura). Através do "rastreamento de fundo", a velocidade do instrumento é medida em relação ao fundo do curso d'água, assim como sua direção e profundidade (SANTOS et al., 2001).

A frequência do perfilador é de 2 MHz, com tamanhos de células que variam de 0,10 à 4 m. A profundidade máxima do canal recomendada para se utilizar o equipamento é de 10 m, com velocidade de até 10 m/s, apresentando exatidão de ± 1 mm/s.

A medição é realizada de acordo com o procedimento de verticais (Figura 17). O equipamento mede a velocidade e profundidade da água em cada vertical desejada; todos os valores são transmitidos por Bluetooth ao PDA (computador portátil), sendo então processados online com a ajuda do software de operação Qliner, específico para a marca do equipamento. Os dados obtidos são utilizados em um cálculo matemático para se determinar a velocidade média do fluxo na vertical e a vazão parcial, de acordo com a ISO 748, que utiliza o método da meia seção. Para o manejo do equipamento, pode-se utilizar cabos, tanto em pontes como em costas. O operador posiciona o barco nas respectivas verticais e monitora a medição utilizando o PDA.

2.4 Estimativas de vazões para locais com dados escassos

Em locais onde não há a ocorrência de monitoramento hidrometeorológico, é possível empregar diferentes métodos para a estimativa de vazões, através da transposição de informações que podem ser utilizadas como referência, desde que estas possuam dados registrados. Segundo Cruz (2001), dentre as possibilidades, pode-se citar a interpolação de dados (através da proporção de áreas), regionalização hidrológica, pequenas amostragens locais e modelos hidrológicos.

2.4.1 Proporção de áreas

Esse método é descrito pela Eletrobrás (1985), e permite obter as vazões relativas à área de interesse correspondendo-se os dados com estações fluviométricas mais próximas. É um método de uso frequente, e que, segundo Salbego (2010), tem como princípio básico a consideração de que a vazão específica em um canal sem monitoramento seja proporcional ao de uma seção próxima monitorada situada em uma região hidrológicamente homogênea e sujeita a regimes pluviométricos semelhantes. Pelo método, é possível que se realize a correlação entre vazões a partir da Equação 16:

$$Q_u = Q_p \frac{A_u}{A_p} \quad \dots(16)$$

Onde:

Q_u : vazão no local da central;

Q_p : vazão no posto do mesmo rio, do qual se dispões de dados;

A_u : área de drenagem, desde as cabeceiras até o local da central;

A_p : área de drenagem da bacia, até o local do posto fluviométrico.

No caso de o local estar situado entre dois postos fluviométricos, pode-se utilizar a equação de transferência 17:

$$Q_u = Q_m + \left(\frac{A_u - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad \dots(17)$$

Onde:

Qu: vazão no local da central;

Qm: vazão do posto de montante;

Qj: vazão do posto de jusante;

Au: área de drenagem do local da central;

Am: área de drenagem do posto de montante;

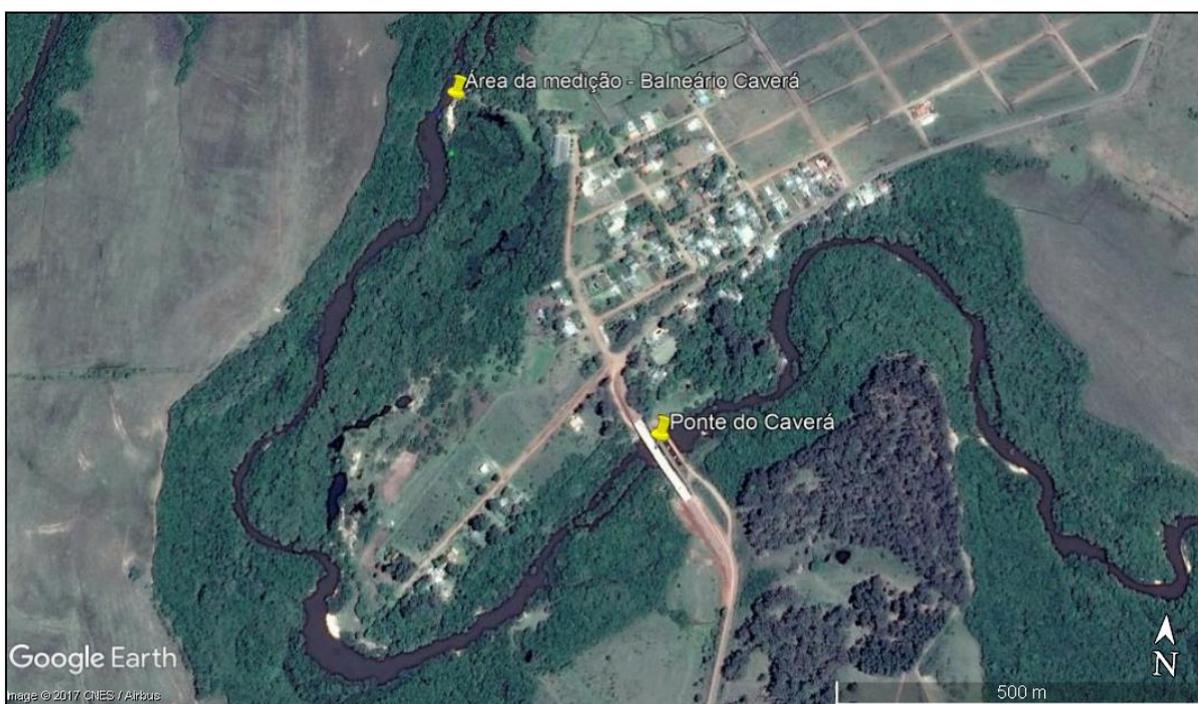
Aj: área de drenagem do posto de jusante.

3. METODOLOGIA

3.1 Definição e localização da área de estudo

A medição em campo foi realizada nas proximidades do Balneário Caverá (Figura 11), na data de 05 de outubro de 2017.

Figura 11 – Localização da ponte do Caverá e local de realização da medição

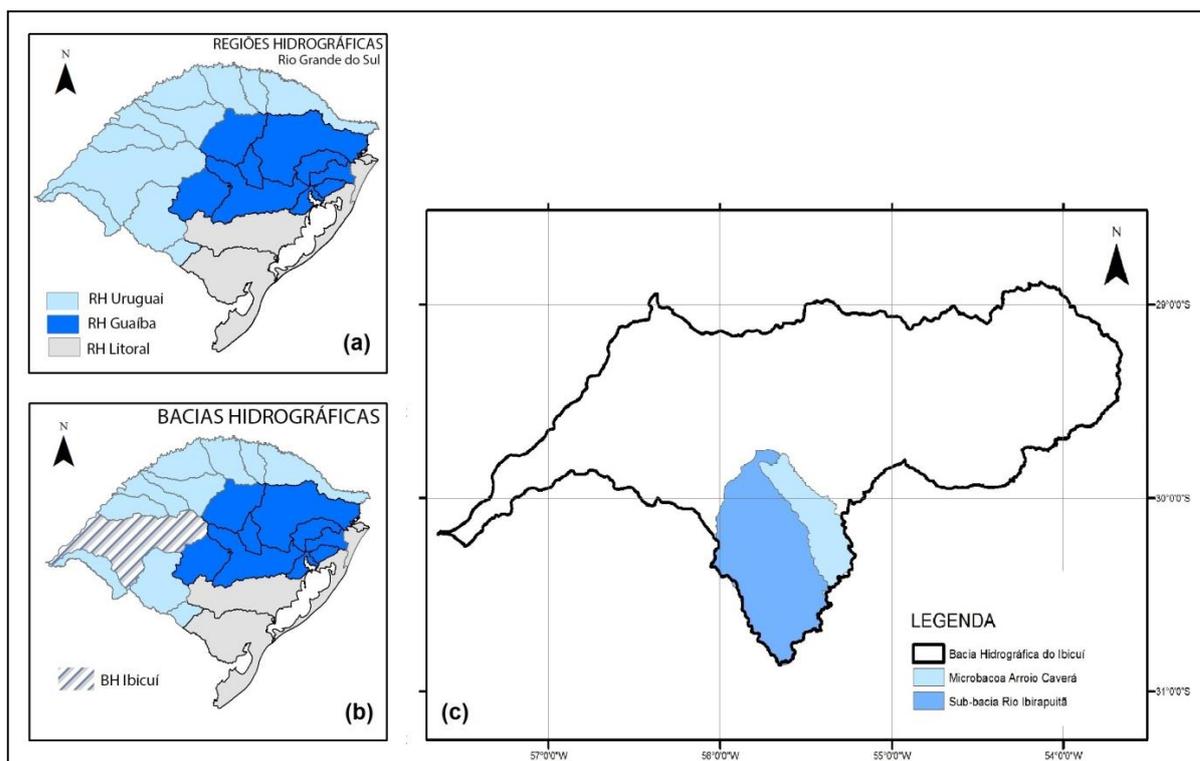


Fonte: Adaptado de Google Earth

O Balneário Caverá foi definido como exutório da microbacia hidrográfica do Arroio Caverá, drenando uma área correspondente a 1.450 km². A microbacia deságua na sub-bacia do Ibirapuitã, que possui área correspondente de 5.965 km² no ponto da estação fluviométrica 76750000.

No contexto estadual, a área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do Ibicuí, pertencente a região hidrográfica do Uruguai. As Figuras 12, 13 e 14 a seguir ilustram a localização da área de estudo no contexto estadual e da bacia hidrográfica do Ibicuí.

Figura 12 – Localização da microbacia do Arroio Caverá no contexto estadual



Fonte: Elaboração própria.

(a) Regiões hidrográficas do Rio Grande do Sul; (b) Bacia hidrográfica do Ibicuí no contexto das regiões hidrográficas; (c) Microbacia do Caverá e sub-bacia do Ibirapuitã na bacia hidrográfica do Ibicuí, a partir do exutório da estação Alegrete 76750000.

3.2 Estruturação da base cartográfica da área de estudo

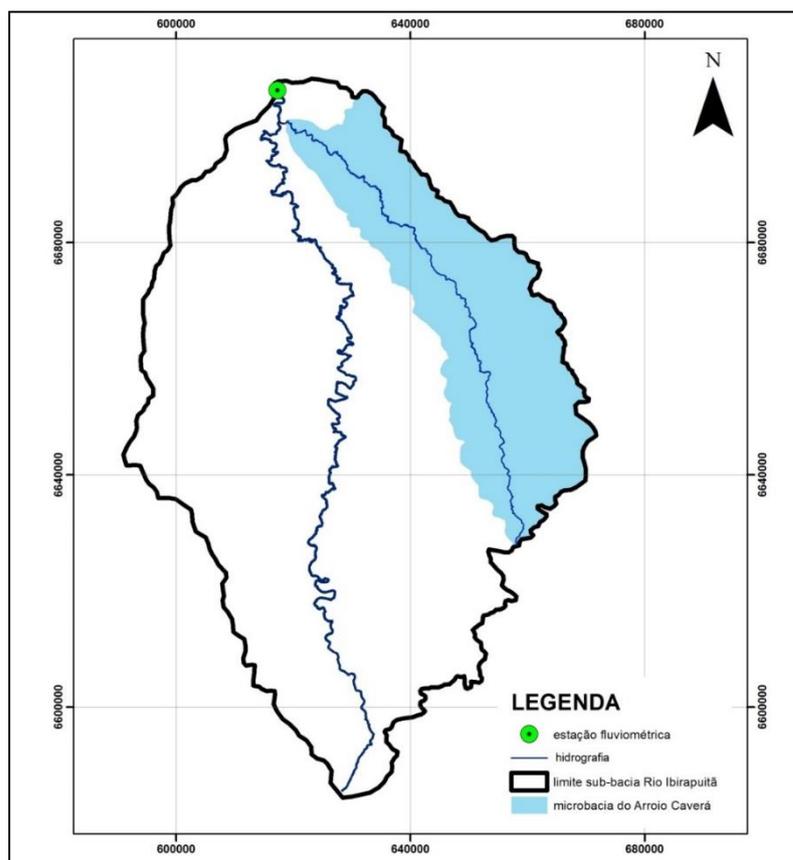
A partir da Base Cartográfica Digital Georreferenciada do Rio Grande do Sul, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum Horizontal SIRGAS2000, zona 21, em escala 1:50.000, foi estruturado o SIG (Sistema de Informação Geográfica) da área de estudo, contendo os planos de informação referentes aos limites da sub-bacia do Ibirapuitã, da microbacia do Caverá, hidrografia e sistema viário.

Posteriormente a definição do exutório da microbacia do Arroio Caverá, na qual considerou-se as condições de acesso ao local e segurança da equipe de medição, foi determinada a estação fluviométrica a ser utilizada para extrair os dados necessários à aplicação da metodologia de proporção de áreas.

3.3 Identificação da estação fluviométrica

Para validar o método de proporção de áreas foi efetuada uma pesquisa sobre estações fluviométricas em operação na região, sendo definida a estação Alegrete (código 76750000) – localizada a jusante da área de estudo, na sub-bacia do Rio Ibirapuitã – como fornecedora de dados para aplicar o método. A responsabilidade pela operacionalidade da estação é da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), enquanto que a entidade responsável por esta é a Agência Nacional de Águas. A Figura 13 a seguir apresenta a localização da estação fluviométrica no contexto da sub-bacia do Ibirapuitã, enquanto que a Figura 14 a localiza na área urbana do município de Alegrete.

Figura 13 – Localização da estação fluviométrica na sub-bacia do Rio Ibirapuitã



Fonte: Elaboração própria

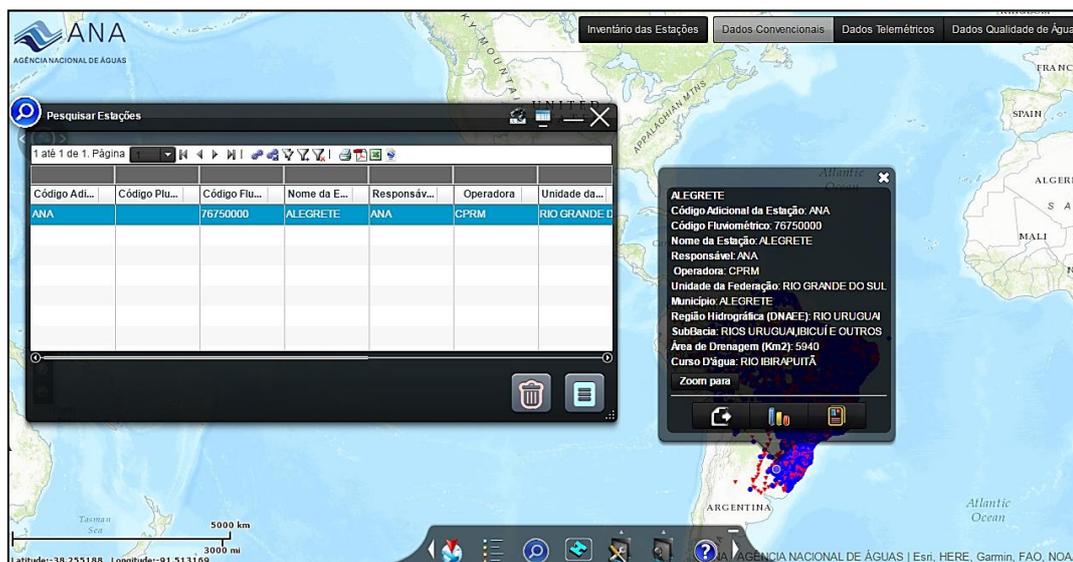
Figura 14 – Localização da estação fluviométrica Alegrete (código 76750000)



Fonte: Adaptado de Google Earth

A estação fluviométrica possui uma área de drenagem de 5.965 km². Os dados de nível e vazão do rio encontram-se atualizados diariamente às 7 e 17 horas. Os dados são disponibilizados no endereço eletrônico <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/> (Figura 15). Quanto aos registros históricos da referida estação, verifica-se a existência de dados no período de 1940 a 2017, com significativos intervalos apresentando ausência de dados.

Figura 15 – Plataforma Hidroweb



Fonte: Hidroweb (2017, não paginado)

3.4 Descrição dos métodos e materiais utilizados

Os equipamentos utilizados nessa metodologia são provenientes do Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE), da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

Previamente a realização das medições, foi realizada uma visita ao local definido como sendo o exutório da microbacia (ponte do Caverá) com a finalidade de efetuar o planejamento das ações. No entanto, as condições do local encontravam-se adversas à realização das medições na data. Logo, um novo local teve de ser definido, devendo contemplar os requisitos pré definidos e que se situasse na microbacia do Caverá.

A definição da nova área de estudo levou em conta as condições do nível e velocidade das águas, para que não colocasse em risco a segurança dos operadores dos equipamentos. Assim, o local situado no Balneário Caverá — a aproximadamente 640 m da ponte do Caverá — atendeu aos requisitos na data das medições, considerando-se também ser de fácil acesso.

A seguir, descreve-se a metodologia dos diferentes métodos utilizados na medição.

3.4.1 Medição de vazão com flutuador

Os materiais utilizados na metodologia são:

- balizas;
- cronômetro;
- flutuadores (pedaços de madeira à deriva);
- planilha para registro dos dados.

Para aplicar o método do flutuador foi necessário demarcar dois limites lineares; estes, definidos por duas balizas distanciadas entre si de 25 metros, demarcando o trecho onde as medições com os diferentes equipamentos foram realizadas. A área da seção transversal média foi tomada a partir da batimetria realizada pelo ADCP e posteriormente molinete.

Foram realizadas três medições, as quais consistiram em soltar o objeto flutuante e registrar o tempo em que este levou para atravessar a seção demarcada.

Calculado o tempo médio da travessia, a velocidade média foi obtida dividindo-se o comprimento da seção (em metros) pelo tempo (s) que o flutuador tomou para mover-se pela seção.

Afim de se determinar uma velocidade média aproximada para a seção, foi aplicado o fator de correção, recomendado pela literatura com valor de 0,85. Assim, determinou-se a vazão (em m³/s) para o trecho com o método do flutuador. Os resultados são apresentados no item 4 do presente trabalho.

3.4.2 Medição de vazão com ADCP

O materiais utilizados na metodologia são:

- equipamento OTT Qliner 2 (Figura 16);
- corda graduada a cada 1 metro;
- computador portátil para processamento de dados;
- barco.

Figura 16 – Equipamento OTT Qliner 2 e computador portátil

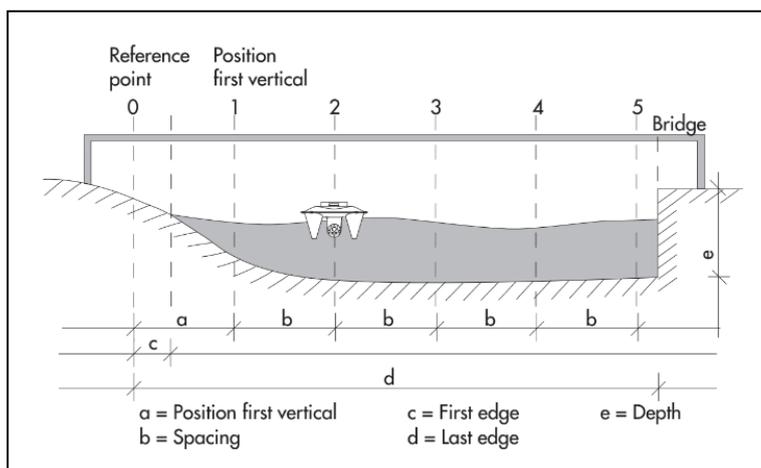


Fonte: Elaboração própria

O equipamento OTT Qliner 2 consiste em um sistema móvel para a medição do fluxo em canais e rios. É composto por um sensor de corrente Doppler ultrassônico, uma unidade de comunicação de dados via Bluetooth, um barco resistente a correntes e PDA (Personal Digital Assistant) resistente à água.

Para a medição com o aparelho ADCP, uma corda graduada a cada 1 metro foi fixada em cada extremidade da seção com o auxílio do barco. Uma vez que a largura total do rio na área de estudo é de 25,05 metros, a literatura indica que as verticais de medição devem ser locadas a cada 2 metros (Tabela 2). Assim, as medições foram realizadas em 13 verticais. Na margem esquerda da seção transversal o equipamento iniciou a medição a 1 metro desta, sendo as próximas verticais seguindo os 2 metros de distância, como representa a Figura 17.

Figura 17 – Posição do equipamento OTT Qliner 2 na seção transversal do canal



Fonte: Operation instructions OTT Qliner 2 (p. 24)

Como apresenta a Figura 18, no dia 05 de outubro de 2017 foram realizadas 2 medições com o aparelho ADCP, com tempo de medição do aparelho de 45 segundos em cada vertical. Os valores foram transmitidos por Bluetooth ao PDA. Em escritório, os dados foram processados e analisados com o software Qreview, do mesmo fabricante do equipamento.

Figura 18 – Medição da vazão no Arroio Caverá com o equipamento OTT Qliner 2



Fonte: Elaboração própria

A partir dos dados fornecidos pelo aparelho, percebeu-se que o resultado final da área da seção transversal não condizia com a área calculada a partir das profundidades fornecidas pela batimetria, resultando em uma vazão muito baixa quando comparada àquela fornecida pelo método de proporção de áreas.

Os dados das medições são apresentados no capítulo 4.

3.4.3 Medição de vazão com molinete hidrométrico

Os materiais utilizados na metodologia são:

- corda graduada a cada 1 m;
- molinete fluviométrico OTT C31 (Figura 19);
- contador Z400;
- haste para sustentação do molinete;
- planilha para registro dos dados;
- barco.

Figura 19 – Molinete fluviométrico OTT C31 e contador Z400



Fonte: Elaboração própria

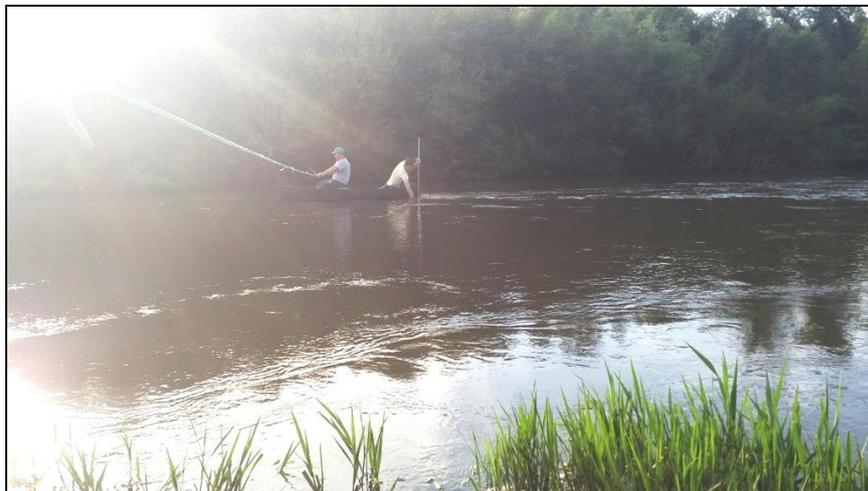
Inicialmente ao estudo da vazão pelo método do molinete, a seção transversal do canal foi demarcada pela corda graduada. A seção apresentou largura total de 25,05 metros. Assim, o número de verticais foi determinado de acordo com a literatura utilizada no método ADCP, sendo estas distanciadas a cada 2 metros.

Utilizou-se o método detalhado para realização da medição através do molinete hidrométrico. Uma vez que a batimetria tomada pelo ADCP apresentou a profundidade máxima da seção de 1,78 metros, determinou-se o número de pontos necessários para realizar a medição da velocidade em cada vertical através do recomendado pela literatura e apresentado na Tabela 1 — 20, 60 e 80% da profundidade.

Com o auxílio do barco cedido pela Universidade Federal do Pampa, os operadores dos equipamentos realizaram as medições com o molinete em cada ponto das verticais, como apresenta a Figura 20. O tempo de medição do molinete

corresponde a 50 segundos para cada ponto, fornecendo, posteriormente, a velocidade média em cada ponto de medição. Os dados do trabalho de campo foram registrados na prancheta de cálculo para análise em escritório.

Figura 20 – Medição da vazão no Arroio Caverá com o equipamento OTT C31



Fonte: Elaboração própria

3.5 Análise dos resultados através do intervalo de confiança

Levando em conta a variabilidade característica das informações coletadas a partir dos métodos do flutuador, molinete e acústico, torna-se necessária a análise dos dados a partir de estimativa com intervalo de confiança. Neste trabalho, será utilizado o intervalo de confiança (μ) de 95%, que representa um intervalo no qual há 95% de confiança de cobertura do verdadeiro valor do parâmetro, e é descrito pela expressão a seguir:

$$P\left(Q_m - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < Q_m + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 0,95 \quad \dots 17$$

Onde:

Q_m : vazão média (m^3/s);

σ : desvio padrão;

n : tamanho da amostra.

A partir do intervalo de confiança pode-se afirmar que existe uma probabilidade de 95% de que o valor do parâmetro μ esteja contido no intervalo indicado pela expressão 17, ou, que há a probabilidade desse valor ser 2,5% maior que o limite superior, como também 2,5% menor que o limite inferior.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos por todos os métodos de medição, organizados em planilhas de cálculo.

4.1 Análise dos resultados: método do flutuador

Os resultados obtidos através do método do flutuador estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Dados obtidos através do método do flutuador

Distância entre balizas (m)	25,00
Tempo (s)	23,58
	21,00
	22,12
	22,23
Tempo médio (s)	22,23
Velocidade (m/s)	1,12
Velocidade com coeficiente redutor (m/s)	0,956
Área (m ²)	38,87
Vazão (m ³ /s)	37,16

Fonte: Elaboração própria

A velocidade média encontrada pelo método do flutuador obteve os maiores valores quando comparada aos outros métodos; assim, a vazão calculada também apresentou uma grande variação.

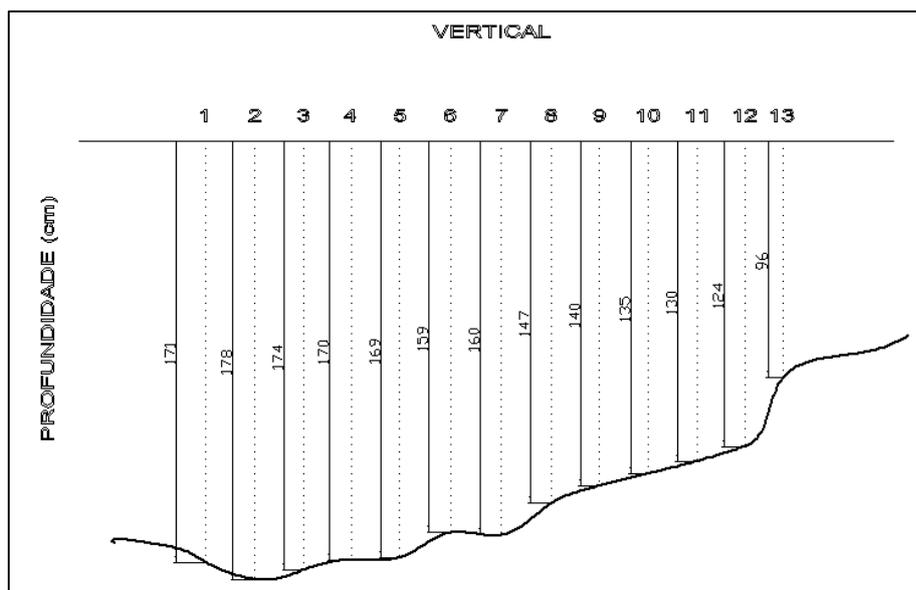
Pode-se citar a influência do vento no resultado elevado da velocidade do flutuador, uma vez que o objeto indica a velocidade na superfície do canal, por isso sendo necessário aplicar o coeficiente redutor.

Também, cabe ressaltar que a seção transversal do trecho definido para se aplicar esse método possuía dimensões irregulares, onde uma parte de sua seção possuía afunilamento entre as margens, o que propicia um aumento da velocidade.

4.2 Análise dos resultados: método do molinete hidrométrico

Na tabela 4 constam os resultados obtidos através do método do molinete hidrométrico. A Figura 21 apresenta o perfil transversal da seção em estudo.

Figura 21 – Seção transversal a partir da batimetria do molinete hidrométrico



Fonte: Elaboração própria

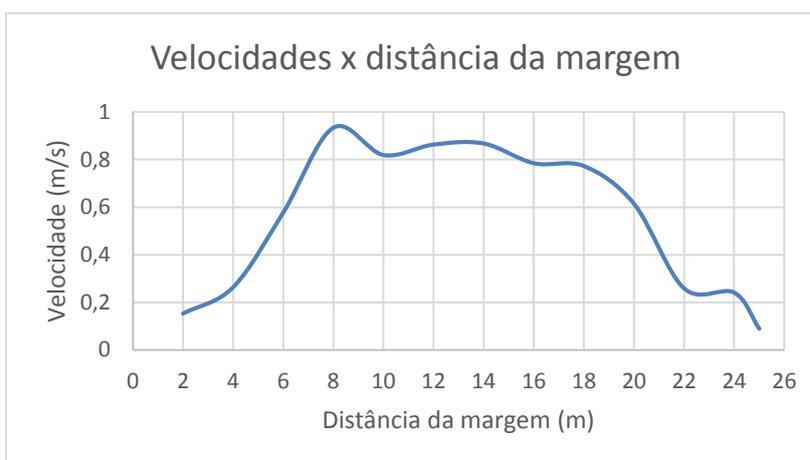
Tabela 4 – Dados encontrados pelo método do molinete

VERTICAL	DISTÂNCIA (m)	PROF. (m)	20%	60%	80%	VEL. MÉDIA (m/s)
			V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	
1	2	1,71	0,226	0,150	0,085	0,153
2	4	1,78	0,296	0,281	0,197	0,264
3	6	1,74	0,683	0,582	0,463	0,578
4	8	1,70	0,957	0,954	0,869	0,934
5	10	1,69	0,958	0,802	0,712	0,819
6	12	1,59	1,08	0,863	0,644	0,863
7	14	1,60	0,995	0,826	0,821	0,867
8	16	1,47	0,875	0,769	0,724	0,784
9	18	1,40	0,839	0,772	0,706	0,772
10	20	1,35	0,708	0,587	0,573	0,614
11	22	1,30	0,337	0,255	0,187	0,259
12	24	1,24	0,318	0,243	0,159	0,241
13	25	0,96	0,102	0,091	0,072	0,089

Fonte: Elaboração própria

A Figura 22 apresenta os dados de velocidade em função da distância da margem de referência.

Figura 22 – Perfil de velocidade em função da distância à margem de referência.

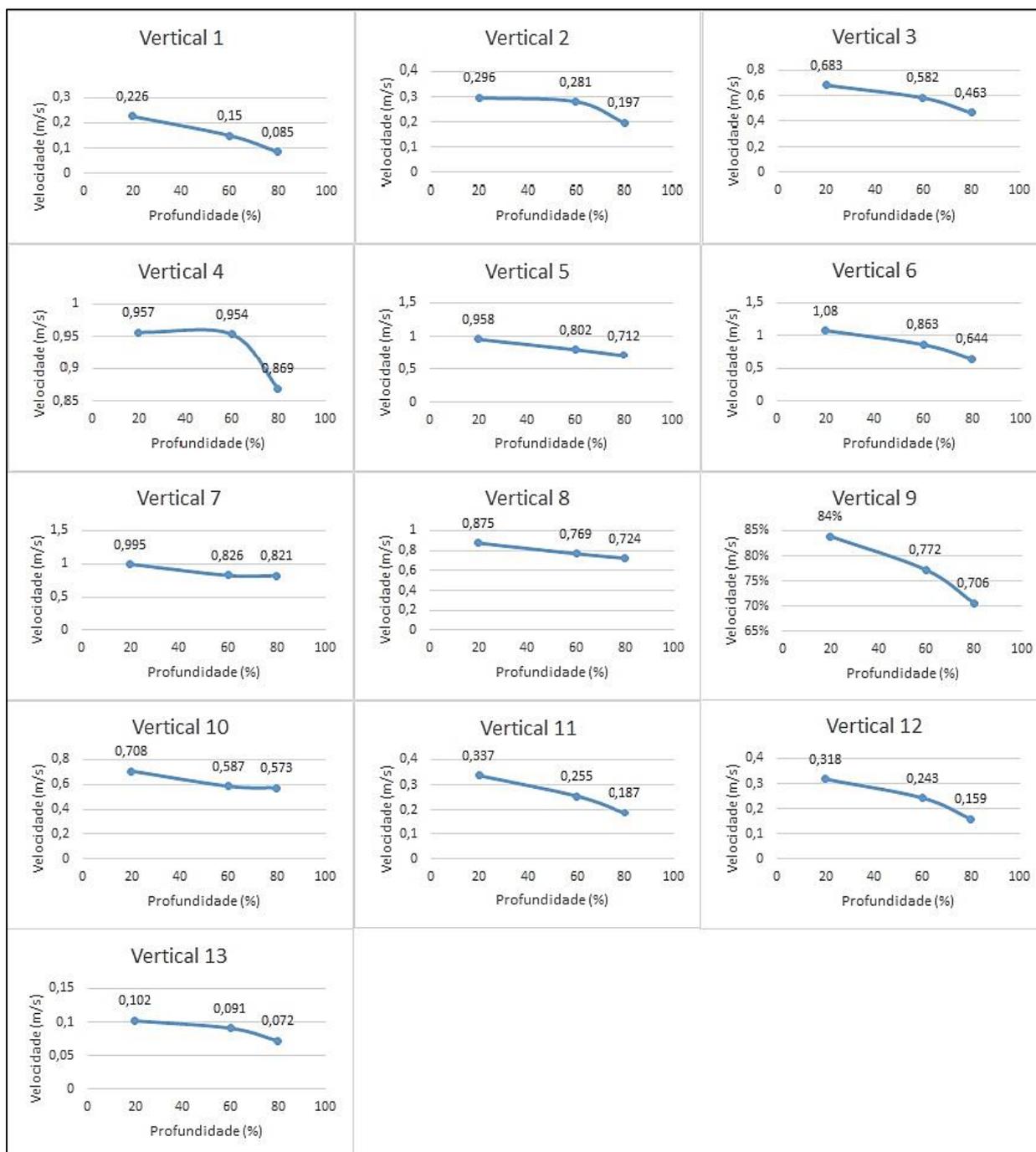


Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que a vertical 4 apresenta a velocidade máxima do canal (0,934 m/s), esta a 8 metros da margem esquerda da seção, com uma diferença de 2% da velocidade encontrada pelo método do flutuador (aplicado na mesma distância da margem). Na vertical mais próxima à margem direita a velocidade apresentou o valor mais baixo (0,089 m/s).

É possível sugerir que, se há um conhecimento prévio da seção transversal, pode-se adotar um maior número de verticais localizadas na parte esquerda do curso d'água, uma vez que estas apresentaram maiores valores de profundidade e de velocidade – valores que interferem diretamente na estimativa da vazão. Os maiores valores de velocidades foram encontrados em todas verticais a 20% da profundidade, fato que se justifica por ser mais próximo da superfície, como representa a Figura 23.

Figura 23 – Velocidades do molinete em função de diferentes profundidades



Fonte: Elaboração própria

Nas tabelas 5 e 6 são apresentados os cálculos da vazão pelos métodos de seção média e meia seção, que diferem entre si em cerca de 11%. O método da seção média apresentou valor de 22,67 m³/s, enquanto que o da meia seção 20,27 m³/s.

Tabela 5 – Cálculo da vazão pelo método da seção média

	VELOCIDADE (m/s)	ÁREA (m ²)	VAZÃO (m ³ /s)
1	0,076	1,958	0,15
2	0,208	2,261	0,47
3	0,421	2,359	0,95
4	0,756	2,448	1,85
5	0,876	2,554	2,24
6	0,841	2,732	2,30
7	0,865	2,839	2,46
8	0,826	2,919	2,41
9	0,778	3,017	2,35
10	0,693	7,000	4,85
11	0,436	3,097	1,35
12	0,250	3,115	0,78
13	0,165	3,151	0,52
	VAZÃO TOTAL (m³/s)		22,67

Fonte: Elaboração própria

Os dados obtidos pelo método da seção média apresentaram variância de 1,58 e média de vazão de 1,74 m³/s, com desvio padrão de 1,25. Para o método de meia seção, encontra-se a variância de 0,76 entre as repetições e média de vazão de 1,56 m³/s e desvio padrão de 0,87. A partir desses dados é possível concluir que o método de meia seção apresentou resultados mais confiáveis entre si. A variância entre os dois métodos é de 0,33.

Tabela 6 – Cálculo da vazão pelo método da meia seção

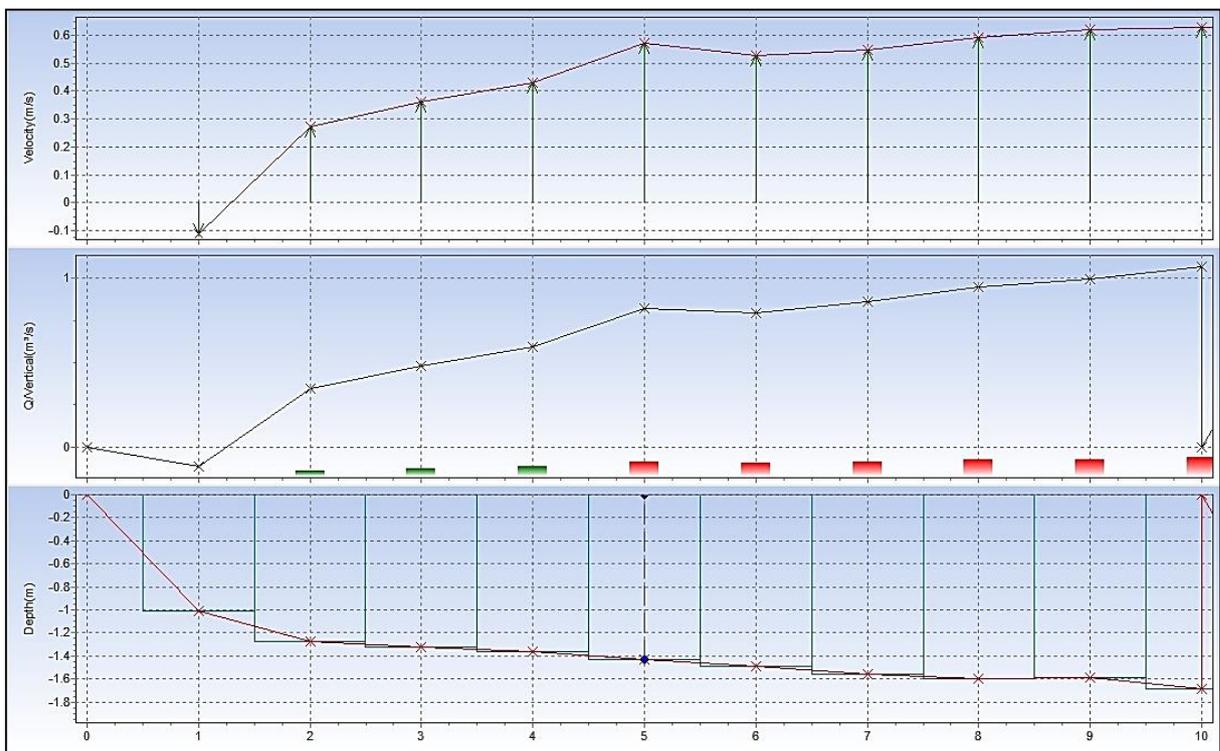
VERTICAL	VELOCIDADE (m/s)	ÁREA (m ²)	VAZÃO (m ³ /s)
1	0,076	2,158	0,16
2	0,208	2,312	0,48
3	0,421	2,403	0,97
4	0,756	2,497	1,89
5	0,876	2,630	2,30
6	0,841	2,817	2,37
7	0,865	2,855	2,47
8	0,826	2,988	2,47
9	0,778	3,033	2,36
10	0,693	3,088	2,14
11	0,436	3,102	1,35
12	0,250	3,133	0,78
13	0,165	3,149	0,52
	VAZÃO TOTAL (m³/s)		20,27

4.3 Análise dos resultados: método do ADCP

As Figuras 24, 25, 26 e 27 a seguir apresentam os dados encontrados pelo método ADCP e processados no software Qreview, realizados em 2 medições.

O primeiro gráfico representa o perfil de velocidade (m/s) em cada vertical, enquanto que o segundo e terceiro quadro apresentam os perfis de vazão (m^3/s) e profundidade (m), respectivamente.

Figura 24 – Gráficos elaborados pelo software Qreview – primeira medição



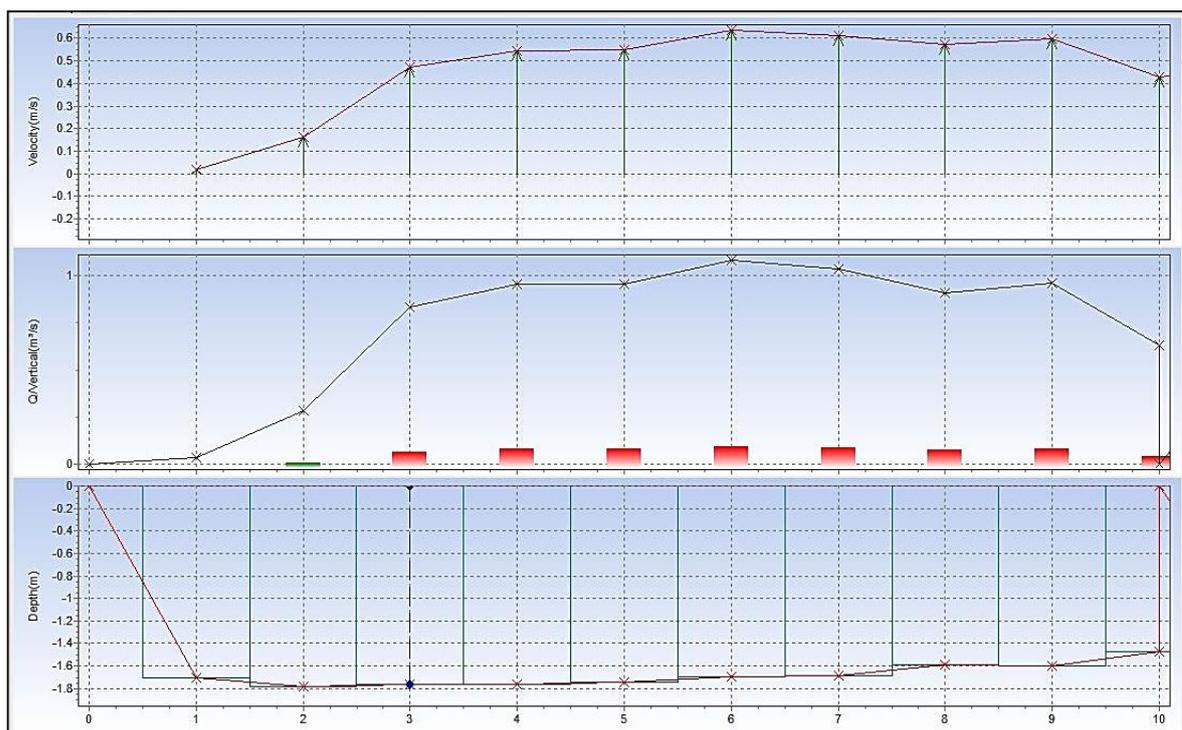
Fonte: Adaptado de Qreview

Figura 25 – Dados processados pelo software Qreview – primeira medição

Overview	More..	Settings	Notes
Site:	teste 3		
Date/Time	05-01-2010 22:34:36 > 22:50:13		
Discharge(m^3/s)	11.861	+/-	0.19
Width(m)	10.00		
Area(m^2)	20.295		
Mean depth(m)	2.030		
Mean Velocity(m/s)	0.584		

Fonte: Adaptado de Qreview

Figura 26 – Gráficos elaborados pelo software Qreview – segunda medição



Fonte: Adaptado de Qreview

Figura 27 – Dados processados pelo software Qreview – segunda medição

Overview	More..	Settings	Notes
Site:	teste 4		
Date/Time	05-01-2010 22:51:50 > 23:03:55		
Discharge(m ³ /s)	9.987	+/-	0.22
Width(m)	10.00		
Area(m ²)	20.170		
Mean depth(m)	2.017		
Mean Velocity(m/s)	0.495		

Fonte: Adaptado de Qreview

Através do software Qreview verifica-se que as vazões calculadas pelo método acústico referem-se a valores de 9 e 11 m³/s – apresentando grande variação quando comparadas ao método do molinete. Percebe-se que as velocidades apresentaram valores próximos aos da medição pelo método do molinete. Durante a análise dos resultados, constatou-se que o equipamento registrou de forma incoerente as informações a respeito da posição de cada vertical, tomando a distância entre cada vertical a cada 1 metro, quando na verdade estavam distanciadas de 2 metros. Assim, o cálculo da área, perímetro molhado e,

consequentemente da vazão, foi obtido com valores inferiores aos da seção real. A seguir, apresenta-se o registro de cálculo da área e vazão com os dados corrigidos.

A partir da batimetria realizada pelo equipamento acústico OTT Qliner 2, e considerando-se a distância de 2 m entre cada vertical, a seção transversal apresentou uma área de 38,28 m². Considerando-se a velocidade média tomada pelo aparelho - igual a 0,584 m/s -, é possível determinar a vazão, a partir da equação 8, onde:

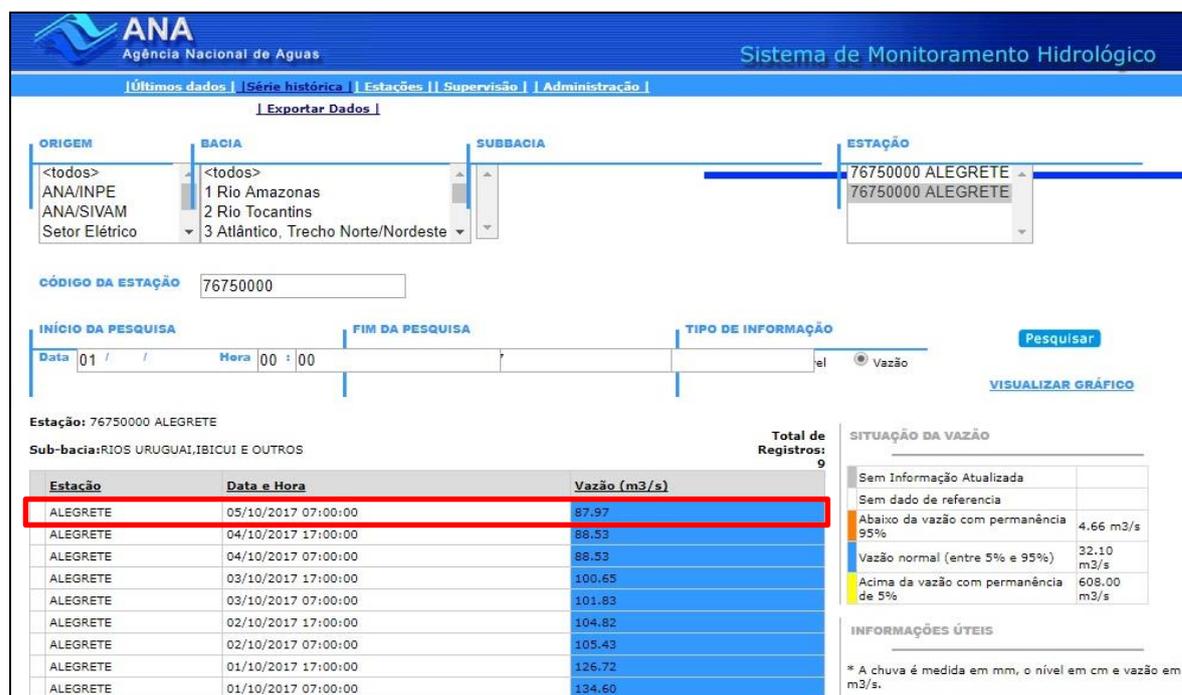
$$Q = 0,584 \times 38,28$$

$$Q = 22,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.4 Análise dos resultados: método de proporção de áreas

A Figura 28 fornece os dados de vazão da estação fluviométrica 76750000 nos dias 1 a 5 de outubro de 2017, destacando-se a vazão no dia de realização das medições.

Figura 28 – Plataforma Hidroweb com dados dos dias 01 a 05 de outubro de 2017



Fonte: Adaptado de ana.gov.br

A vazão da estação 76750000, localizada no Rio Ibirapuitã, com área de drenagem correspondente a 5.965 km² apresentou valor igual a 87,97 m³/s às 7

horas do dia 05 de outubro de 2017. Para validar o método de proporção de áreas, foi aplicada a equação 16, que relaciona as vazões e áreas da estação fluviométrica onde se dispõe de dados com aquela que não os apresenta. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos pelo método de proporção de áreas

Qp (m ³ /s)	87,97
Au (km ²)	1450
Ap (km ²)	5965
Qu (m³/s)	21,38

Fonte: Elaboração própria.

Através dos cálculos realizados pelo método de proporção de áreas percebe-se que este apresenta variação de 6% entre as vazões encontradas pelo molinete hidrométrico e de 4% para a vazão calculada a partir da batimetria corrigida do método acústico. Os valores semelhantes de vazão encontrados por estes métodos justificam-se pelo fato da região da sub-bacia do Ibirapuitã apresentar características homogêneas em termos de uso e ocupação do solo, vegetação – onde predominam os campos nativos –, por apresentarem declividades na maior parte da área de 2 a 5% e possuírem regimes pluviométricos semelhantes.

4.5 Análise dos resultados: intervalo de confiança

A Tabela 8 apresenta os valores de vazão obtidos pelos métodos de cálculo descritos anteriormente.

Tabela 8 – Resultados encontrados pelos diferentes métodos de cálculo.

MÉTODO	Q (m ³ /s)
FLUTUADOR	37,16
ADCP	22,35
SEÇÃO MÉDIA (molinete)	22,67
MEIA SEÇÃO (molinete)	20,27

Fonte: Elaboração própria

A seguir é apresentado a análise estatística realizada, verificando se as vazões apresentadas na Tabela 8 encontram-se dentro de um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 9 – Variáveis utilizadas para cálculo do intervalo de confiança – análise 1.

Qm	25,61
σ	7,77
n	4,00
μ	17,99
	33,23

Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que na análise 1, o intervalo de confiança da amostra apresenta uma grande variação, uma vez que encontra-se em sua população um valor acima do limite superior da probabilidade de 2,5% (vazão de 37,16 m³/s, calculada pelo método do flutuador). A fim de se obter um melhor balizador para verificar os métodos de cálculos, descartou-se o valor de vazão encontrado pelo método do flutuador e calculou-se novamente o intervalo de confiança dessa amostra, representado na Tabela 10.

Tabela 10 – Variáveis utilizadas para cálculo do intervalo de confiança – análise 2.

Qm	21,76
σ	1,30
n	3,00
μ	20,29
	23,24

Fonte: Elaboração própria

É possível observar que na análise 2, o intervalo de confiança possui uma menor variação, com desvio padrão que decresceu de 7,77 a 1,30. Com isso, pode-se perceber que a vazão calculada através do método de seção média, ADCP e método de proporção de áreas encontram-se dentro do intervalo de confiança de 95%, enquanto que o resultado obtido pelo método do flutuador pode ser descartado

dentro da amostra, e o método de seção média apresentou diferença de menos de 1% do limite inferior da amostra.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise dos resultados obtidos pelos métodos do flutuador, molinete e ADCP para medição de vazão no Arroio Caverá, pode-se concluir que:

- Para obter resultados mais precisos com a medição pelo método do flutuador é necessário que o local apresente em seu comprimento seção uniforme, onde não ocorra afunilamento entre as margens, e é importante verificar as condições do vento no momento da medição, uma vez que possui grande influência na determinação da velocidade do objeto;

- O método do flutuador apresentou resultado de velocidade média igual a 0,956 m/s, sendo aplicado na parte de maior velocidade da seção transversal, e possui diferença de 2% em relação a velocidade encontrada pela vertical 4 do molinete, utilizada na mesma posição. A partir dessa velocidade, o cálculo da vazão obteve o maior valor dentre os três métodos;

- O método do molinete apresentou valores satisfatórios de velocidade, e, se a batimetria for realizada de forma precisa, é possível obter a vazão da seção transversal com grande proximidade quando comparada ao método acústico, considerado pela literatura como o mais confiável;

- O cálculo realizado pelo método da meia seção apresentou menor variância de valores das repetições entre si, enquanto que o método da seção média foi o que mais se aproximou dos resultados de vazão da seção obtidos através da metodologia de proporção de áreas;

- O equipamento ADCP apresentou valores precisos de batimetria e de velocidade média do canal, porém, é imprescindível que todas as suas configurações estejam ajustadas corretamente, bem como o manuseio do aparelho seja realizado com atenção a todos os dados que devem ser fornecidos;

- A metodologia de proporção de áreas tornou-se válida, com diferenças inferiores a 7% quando comparada ao método do molinete e ADCP, e encontrando-se dentro do intervalo de confiança de 95%. Assim, confirma-se que, para se relacionar as vazões de postos fluviométricos sem dados, é necessário que se trate de regiões homogêneas em termos de uso e ocupação do solo, bem como de declividade;

- Todos os objetivos propostos nesse trabalho foram atingidos, mostrando que o método do flutuador pode ser considerado o menos confiável de todos para a

determinação da vazão da seção transversal, porém apresenta uma estimativa da velocidade da água na superfície, que pode ser considerada balizadora no estudo;

- Os métodos do molinete e acústico apresentaram valores de vazão dentro do intervalo de confiança de 95%, podendo-se afirmar que existe a probabilidade de que em um determinado período de tempo a vazão na seção de estudo apresente valores dentro desse intervalo, sendo confirmado pelo método de proporção de áreas.

6. REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água na medida certa**: a hidrometria no Brasil. Brasília: ANA, 2012, 72 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Medição de descargas líquidas em grandes rios**: manual técnico. 2ª edição. Brasília: ANA, 2014, 94 p.

BONIFÁCIO, M. Cássia. Comparação de três métodos para a medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da bacia do Ribeirão Maringá. In: IX Fórum Ambiental da Alta Paulista. **Anais...** v. 9, n. 2, 2013.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. RBGF – **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife/PE. V. 01. 2008.

CRUZ, C.J. **Disponibilidade hídrica para outorga**: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. 2001. 199 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ELETROBRÁS. **Manual de minicentrals hidrelétricas**. Ministério das Minas e Energia: DNAEE, 1985.

FLÓREZ, O. R. **Pequenas centrais hidrelétricas**. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

GARCEZ, N. L. **Hidrologia**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1988. 291 p.

GUADAGNIN, M.P. **Caracterização e mapeamento da vegetação florestal e sua relação com os componentes do relevo na bacia hidrográfica do arroio Caverá – oeste do RS/Brasil**. 2015. 101 p. Dissertação (mestrado em geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

HIDROWEB. ANA. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 12/06/2017.

JOHNSTONE, D.; CROSS, W. P. **Elements of applied hydrology**. Nova Iorque: Ronald Press, 1949. 276 p.

MALDONADO, H. L. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos. **Revista Ambiente & Água**, v.10 n.2, 2015.

MICHAUD, P. J.; WIERENGA, M. **Estimating discharge and stream flows**: a guide for sand and gravel operators. Washington: Ecology Publication, 2005. 37 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Água na medida certa**: a hidrometria no Brasil. Brasília/DF. 2012. 72 p.

OTT C31. OTT. Disponível em: < <http://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c31-958/>>. Acesso em 22 mar. 2017

PALHARES, C. P. J. Medição de vazão em rios pelo método do flutuador. In: Comunicado Técnico, 2007, Concórdia. **Anais eletrônicos...** Concórdia, 2007. Disponível em: < http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_c8p81m4j.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2017.

PEREIRA, S. R.; NETO, S. A.; TUCCI, E.M.C. **Princípios da Hidrometria**. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/princc3adpios-de-hidrometria.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2017

PINTO, N.L.S. et al. **Hidrologia básica**. Rio de Janeiro: Fundação Nacional de Material Escolar, 1976. 278 p.

RICARDO, M., VIANA, A. N. C., SILVA, L. F., BERNARDES, M. E. C. Análise e aplicação de perfiladores acústicos Doppler para medição de vazão de pequenas centrais hidrelétricas. VI Simpósio brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas. **Anais...** Comitê Brasileiro de Barragens: Belo Horizonte, 2008.

RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. **Assembleia Legislativa**, Porto Alegre, RS, 30 dez. 1994. Capítulo IV.

SALBEGO, G. A. **Simulação de cenários de sustentabilidade hídrica da orizicultura na sub-bacia hidrográfica do arroio grande através da implantação de barragens temporárias**. 2010. 157 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: ITD, 2001. 372 p.

TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio et al. **O uso do ADCP em pequenos e médios cursos d'água**. Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica, 5a Reunión. [S.I.]

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. **Three century of scientific hydrology - 1674-1974**. Paris, 1974.

U.S. Department of the Interior. **Bureau of Reclamation**: Water Measurement Manual. Washington/DC, 2001.

WISLER, C. O.; BRATTER, E. F. **Hydrology**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1949.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Manual on Stream Gauging**. Vol 1. Fieldwork. Geneva, 2010.