

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CORPOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS

Comparative analysis of methods for determining flow rate in surface water bodies


Análisis comparativo de métodos de medición de caudal en aguas superficiales


COSTA, D. J. L.¹; CAMARGO, B. E. M.²; TOLENTINO, A. G. P.³; AKUTSU, J.⁴; PERIOTTO, N.A.⁵; TANAKA, M. O.⁶


Resumo


O conhecimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas é importante para responder questões que abarcam o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. A determinação de vazões em rios e canais é essencial para conhecer a disponibilidade hídrica superficial, com a finalidade de atendimento dos usos múltiplos da água. Diversos instrumentos e métodos podem ser utilizados para a execução de campanhas de medição de vazão. Neste trabalho realizou-se uma análise comparativa de quatro métodos de medição - flutuador, molinete velocimétrico, método acústico e método químico (método do traçador conservativo) – através da aferição de vazão em dois trechos de escoamentos superficiais, com o objetivo de verificar o comportamento e confiabilidade dos métodos aos casos aplicados. Dentre as formas de medição utilizadas, considera-se que o método do traçador químico apresentou maior confiabilidade nas duas situações estudadas. São relatadas as potencialidades e limitações para todos os métodos nos trechos em que eles foram aplicados. A consideração de características geométricas e hidráulicas das seções transversais como largura, profundidade e velocidade do escoamento, são considerados fatores importantes para a escolha dos métodos que podem ser aplicados com maior confiança para a determinação da vazão em condições de campo.


Palavras-chave: Hidrometria; Vazão; Métodos de medição; Análise comparativa


¹Prof. Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana Universidade Federal de São Carlos.  orcid: [0000-0003-1136-7986](https://orcid.org/0000-0003-1136-7986) daniel.costa@ufscar.br

²Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana Universidade Federal de São Carlos.  orcid: [0000-0002-3677-2753](https://orcid.org/0000-0002-3677-2753) bn.camargo@gmail.com

³Engenheiro Civil pela Universidade Federal de São.  orcid: [0009-0002-4327-731X](https://orcid.org/0009-0002-4327-731X) andrepradebon@yahoo.com.br

⁴Prof. Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana Universidade Federal de São Carlos.  orcid: [0009-0008-1206-7727](https://orcid.org/0009-0008-1206-7727) akutsu@ufscar.br

⁵Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais Universidade Federal de São Carlos.  orcid: [0000-0001-5950-5917](https://orcid.org/0000-0001-5950-5917) nataliaperiotto@gmail.com

⁶ Prof. Doutor do Departamento de Ciências Ambientais Universidade Federal de São Carlos.  orcid: [0000-0001-5924-1886](https://orcid.org/0000-0001-5924-1886) marcel@ufscar.br

Data da Submissão:
29junho2022

Data da Aprovação:
07abril2023

Data da Publicação:
22junho2023

COMO CITAR:

COSTA, D. J. L.; CAMARGO, B. E. M.; TOLENTINO, A. G. P.; AKUTSU, J.; PERIOTTO, N.A.; TANAKA, M. O.. ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CORPOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS. **Engenharia Urbana em Debate**. São Carlos, V4, n1, 2023. <https://doi.org/10.59550/engurbdebate.v4i1.69>



Abstract

Understanding the hydrological behavior of watersheds is important to unravel questions that include the planning and management of water resources. Determining flow rate in rivers and channels is essential to determine surface water availability and comply the multiple uses of water. Diverse instruments and methods can be used in field campaigns of flow rate measurement. Here we carried out a comparative analysis of four methods, the float method, current meter, acoustic and chemical (conservative tracer method) methods, by determining flow rate of surface waters in two stream reaches to verify the behavior and reliability of the different methods to the studied reaches. The chemical method was the most reliable of all methods in both reaches. We present strengths and limitations for all methods in the studied reaches. Considering geometric and hydraulic characteristics of the transversal sections such as width, depth, and velocities are fundamental to choose the methods that can be used with greater confidence to determine flow rate in field situations.

Keywords: Hydrometry; Flow rate; Measurement methods; Comparative analysis

Resumen

La comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas es importante para responder preguntas que abarcan la planificación y gestión de los recursos hídricos. La determinación de caudales en ríos y canales de agua es fundamental para conocer la disponibilidad de agua superficial, con el fin de atender los usos múltiples del agua. Se pueden utilizar varios instrumentos y métodos para ejecutar campañas de medición de flujo. En este trabajo se realizó un análisis comparativo de cuatro métodos de medición, flotador, molinete velocimétrico, método acústico y método químico (método trazador conservativo) a través de la medición de caudal en dos tramos de escorrentía superficial, con el fin de verificar el comportamiento y confiabilidad de los métodos a los casos aplicados. Entre los métodos de medición utilizados, el método químico mostró confiabilidad en ambos tramos. En los tramos donde se aplicaron, se reportan las potencialidades y limitaciones de todos los métodos. La consideración de las características geométricas e hidráulicas de las secciones transversales, como el ancho, la profundidad y la velocidad del flujo, es fundamental para elegir los métodos que se pueden aplicar con mayor confianza para determinar el caudal de agua en condiciones de campo.

Palabras clave: Hidrometría; Caudal; Métodos de medición; Análisis comparativo

1. INTRODUÇÃO

O levantamento da disponibilidade de água e o uso dos recursos hídricos de forma racional é um assunto que está cada vez mais em pauta nas agendas das sociedades atuais, diante das circunstâncias climáticas e da crescente demanda mundial por esse recurso. Apesar de ser considerado um país com elevada abundância hídrica, por possuir aproximadamente 13% das reservas de água doce do planeta, o Brasil possui algumas regiões em que a escassez de água está presente, o que pode ser ocasionado por dois principais motivos: problemas climáticos ou consumo populacional elevado (COSTA et al, 2021).

A água é um bem essencial à vida e a sua conservação é de extrema importância para a humanidade. No Brasil, no ano de 1997, com a Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997), foi instituída a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), que define como um de seus fundamentos a água como sendo um recurso

natural limitado e dotado de valor econômico. Além disso, a PNRH tem como objetivo assegurar que a atual geração, assim como as futuras, tenha acesso à água de qualidade em quantidade suficiente através da utilização racional e integrada.

O alcance do objetivo da PNRH tem se tornado cada vez mais desafiador devido ao crescente desequilíbrio entre a disponibilidade e demanda hídrica em muitas bacias hidrográficas brasileiras, principalmente aquelas localizadas em grandes centros urbanos. Em algumas regiões a falta de água já não é mais um risco, mas sim uma realidade (CARVALHO et al, 2021; ONS, 2021; HUNT et al, 2022).

Há atualmente 223 “zonas de tensão” permanentes de disputas por água no Brasil, sendo que há dez anos, esse número era apenas 30. As “zonas de tensão” são regiões onde existem conflitos de interesse pelo uso da água e, devido à falta de disponibilidade para atendimento de todos os usos, foram abertos aproximadamente 63.000 Boletins de Ocorrência em delegacias do país nos últimos 5 anos (CAMPOREZ, 2020).

Nesse cenário, o entendimento do comportamento hidrológico, tanto em escalas locais e a nível global, é importante para responder questões hídricas que abarcam o planejamento, bem como a gestão dos recursos hídricos em todas as regiões do mundo (YU et al, 2020; DIXON et al, 2020). O entendimento do comportamento hidrológico relacionado à disponibilidade hídrica superficial depende primordialmente do conhecimento da vazão que escoam pelos rios. A aferição da vazão em corpos d’água, tanto naturais como artificiais, é uma atividade

de relativa complexidade devido ao comportamento dinâmico da vazão resultante de alterações que essa grandeza sofre ao longo do tempo e do espaço, na escala da bacia hidrográfica (NGOMA & WANG, 2018; LE COZ, et al, 2016). Além disso, as propriedades viscosas da água em interação com o substrato levam à formação de um perfil não uniforme de velocidades na seção transversal do canal, resultante essencialmente da propriedade viscosa da água (BIRD et al, 2007; COSTA et al, 2018), de modo que se houver deficiência em sua caracterização poderá haver falhas na determinação da vazão do escoamento.

São inúmeros os instrumentos e formas de medição de vazão em canais que podem ser escolhidos para que seja efetuada uma campanha de aferição (BOITEN 2008; WMO, 2010; FULLER, 2020), sendo que cada forma de medição possui vantagens e desvantagens ao se considerar os custos, características operacionais dos equipamentos e a faixa de medição de vazão (DOBRIYAL et al., 2017). Além disso, devem ser considerados para a definição do tipo de equipamento os erros associados ao próprio instrumento, durante a experimentação e tratamento dos dados. A medição da vazão é comumente realizada utilizando-se métodos de velocidade-área, sendo que diferentes estudos comparativos mostram que, dependendo das condições, diferentes métodos são favorecidos (SOUPIR et al., 2009; HUNDT & BLASCH, 2019; SCHUGERL et al., 2019)

A partir de métodos de medição de vazão como o flutuador, o molinete velocimétrico, o método acústico (ADV) e o método químico (traçador conservativo), foi realizado neste

trabalho uma análise comparativa dos resultados obtidos em campanhas de medição de vazão em dois trechos, sendo um em rio natural e outro em canal artificial, com intuito de verificar as potencialidades e limitações dos métodos aos casos aplicados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Critérios adotados para a seleção dos trechos de escoamentos

Os trechos de escoamentos desse trabalho foram selecionados considerando alguns critérios como: facilidade de acesso, trecho não poluído, disposição das margens dos canais predominantemente paralelas e retilíneas, e ausência de zonas de recirculação de água à montante das seções de aferição para reduzir a interferência na qualidade dos dados do método químico, com uso de traçadores conservativos. As zonas de recirculação são regiões do escoamento onde são formados vórtices de água, que podem reter uma parcela de massa do traçador (COSTA et al, 2018; LEVENSPIEL, 1999) e, por consequência, podem ocasionar efeitos deletérios na curva que caracteriza a passagem da pluma do experimento.

O desenvolvimento experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa teve-se o intuito de fazer um teste inicial em um canal natural (trecho do Rio Monjolinho) comparando-se os resultados do método do traçador conservativo (método químico) com o método acústico. O primeiro os autores consideram ser um método que precisa ser mais divulgado, pois é de custo relativamente baixo, apesar de possuir metodologia de aplicação e

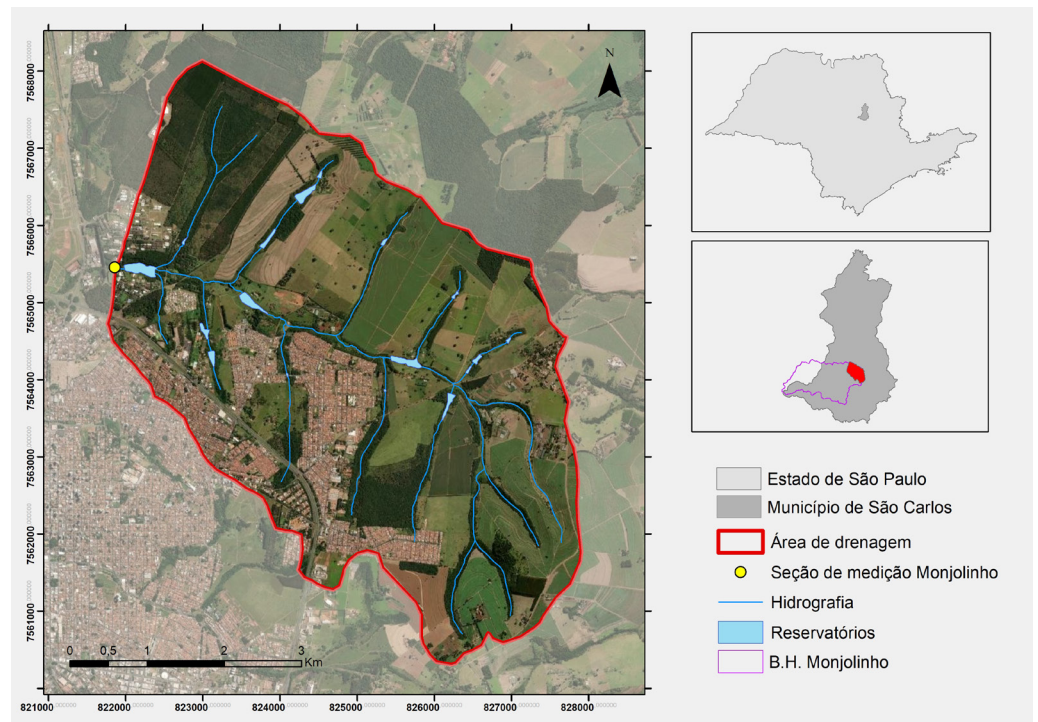
cálculo (tratamento de dados) mais complexa e, por isso, acaba sendo um método menos usual. O segundo (método acústico) por sua vez é mais consolidado no meio técnico, devido a sua facilidade de aplicação e suposta confiabilidade nos resultados obtidos, porém possui um custo relativamente elevado. Havendo a coerência dos resultados nessa primeira etapa, e maior familiaridade com a operação de ambos os equipamentos, os autores optaram por realizarem a segunda etapa do estudo em um canal retilíneo, para eliminar possíveis interferências que podem ser ocasionadas devido a presença de fundos irregulares e zonas de recirculação típicos de canais naturais, e dessa vez comparando-se o uso do traçador conservativo e do método acústico com mais dois métodos, sendo eles o método do flutuador e o molinete velocimétrico.

2.2 Área de estudo: trechos selecionados

Para o desenvolvimento experimental foram utilizados dois trechos de cursos d'água localizados na região norte da área urbana do município de São Carlos, no estado de São Paulo. Um trecho se encontra no Rio Monjolinho, localizado à jusante da represa do *campus* da Universidade Federal de São Carlos. A seção de medição para esse trecho está localizada no mapa apresentado na Figura 1, e possui uma área de drenagem de aproximadamente 26,7 Km².

Uma imagem onde foi definida a seção de medição no Rio Monjolinho está apresentada na Figura 2.

Figura 1. Mapa com a localização da seção de medição no Rio Monjolinho



Fonte: autoria própria.

Figura 2. Imagem do Rio Monjolinho.



Fonte: autoria própria.

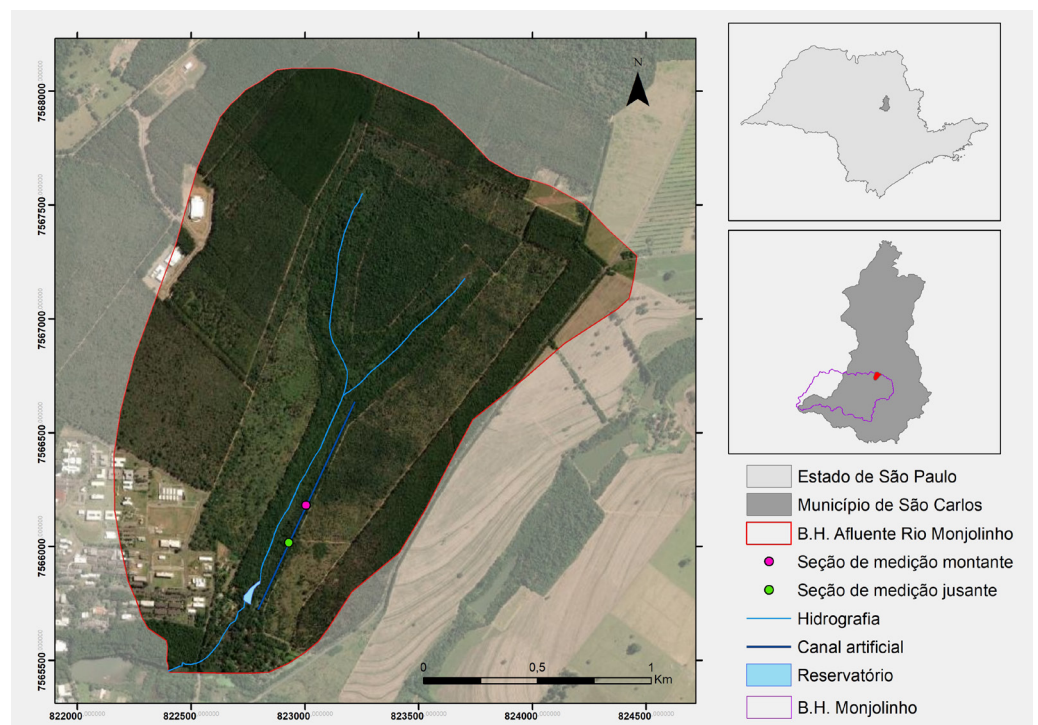
Para esse canal foram utilizados os seguintes métodos de medição da vazão: método químico e método acústico.

O outro trecho que foi definido para esse estudo se encontra em um canal artificial, construído em alvenaria, e está localizado de forma adjacente a um afluente do Rio Monjolinho, que por sua vez possui área de drenagem de aproximadamente 4Km². No trecho do canal artificial, as análises foram divididas em

dois sub-trechos de medição, formados por características bastante distintas quanto à sua rugosidade e composição do fundo. Um sub-trecho está localizado na região de montante e o outro na região de jusante. A localização das seções de medições nos sub-trechos, de montante e de jusante, está apresentada no mapa da Figura 3.

Na Figura 4 estão apresentadas as imagens dos sub-trechos de montante e de jusante.

Figura 3. Mapa com localização das seções de medições nos sub-trechos de montante e jusante.



Fonte: autoria própria.

Figura 4. Imagem do sub-trecho de montante (4a) e sub-trecho de jusante (4b).



Fonte: autoria própria.

Havia a presença de algas no fundo na região montante (Figura 4a), enquanto na região de jusante as algas estavam ausentes e, portanto, o fundo era composto somente pela alvenaria (Figura 4b).

Por ser um canal construído, ou seja, do tipo artificial, o seu fundo e paredes laterais são uniformes. Para esse trecho foram aplicados os seguintes métodos de medição de vazão: flutuador, molinete velocimétrico, método químico e método acústico.

2.3 Métodos e instrumentos de aferição utilizados

Os métodos de medição da vazão diferem em relação à forma de determinar a velocidade média da água que passa por uma seção transversal de um canal. Considerando as dimensões fundamentais comprimento [L] e tempo [T], todos os métodos de medição realizados

nesse estudo utilizam a relação entre velocidade [L/T] e área [L²] para o cálculo da vazão [L³/T]. Desta forma foi primordial conhecimento das áreas das seções transversais em que foram realizadas as aferições, visto que a vazão (Q) pode ser obtida por meio do produto entre a área (A) e a velocidade média do escoamento (V), como apresentado nas Equações 1 e 2:

$$[L^3/T] = [L^2] \cdot [L/T] \quad [1]$$

$$Q = A \cdot V \quad [2]$$

A área da seção transversal é determinada por meio da medição da largura do rio e da profundidade em um número significativo de pontos ao longo da seção, que são chamados de verticais, que determinam os polígonos que compõem a seção transversal. Por outro lado, a velocidade média da água é estimada pelos diferentes métodos descritos a seguir.

2.3.1 Método do flutuador

Essa técnica envolve a medição do tempo de percurso de um objeto flutuante entre duas seções de um trecho previamente demarcado, para obter as grandezas necessárias para o cálculo da velocidade, como o comprimento e o tempo. Boiten (2008) sugere que os objetos utilizados como flutuadores fiquem no máximo 25% submersos, sendo preferível imersões menores do que 10% de sua área. Considerando a existência de um perfil não uniforme de velocidades nos escoamentos reais (BIRD et al, 2007), e que o flutuador será arrastado pelas linhas de corrente superficiais, que possuem predominância de velocidades relativamente maiores no âmbito desse perfil, o tratamento de dados provenientes do uso do método do flutuador tem como etapa final a aplicação do fator de correção (EPA, 1997; CETESB/ANA, 2011), com a tentativa de eliminar o efeito de superestimativa da velocidade média aferida. Cetesb/ANA (2011), recomenda o valor de 0,85 como fator corretivo para a estimativa de velocidade média na seção transversal. EPA (1997), por sua vez, recomenda utilizar um coeficiente de correção igual a 0,9 para rios com fundo barrento, e 0,8 para rios com fundo pedregoso. O uso de valores da literatura pode ser aceito quando as características do ambiente analisado, como a composição do fundo do canal, forem semelhantes as características imposta na literatura consultada. No entanto, a estimativa do fator de correção de forma empírica, através de estudos de aferição de vazão é a maneira mais confiável e, portanto, a mais recomendada. Nesse trabalho foi realizada uma análise considerando essas duas formas, onde pôde-se verificar que o uso estrito de consulta

à literatura pode levar a erros de estimativa de vazão significativos.

2.3.2 Método do molinete velocimétrico

Este método utiliza a determinação da velocidade de um fluido, por meio de sua correlação com o número de rotações de uma hélice ou conchas de um dispositivo chamado molinete (ABNT/NBR 13403, 1995). Cada rotação do molinete está relacionada com uma distância percorrida por uma partícula de água. O número de rotações medidos em determinada quantidade de tempo resulta na velocidade, de acordo com a curva de calibração do molinete.

Conforme a BS EN ISO 748 (2021), os molinetes devem ser produzidos, calibrados e mantidos de acordo com as normas locais ou do fabricante. Além disso, eles devem ser utilizados apenas para o intervalo em que foram calibrados e com equipamentos complementares similares aos que foram usados no processo de calibração.

Em cada vertical também é realizada a medição da velocidade com molinete hidrométrico, em um número adequado de pontos a diferentes profundidades, que por sua vez irão originar a velocidade média na vertical (SANTOS et al, 2001). O espaçamento e o número de verticais são importantes para a precisão do método de medição de vazão (FULLER, 2020). O número de verticais é estabelecido pelo tamanho, formato e regularidade do perfil de velocidade do corpo d'água.

Os números de posicionamentos do molinete com relação à profundidade da lâmina de água (p), foi definida em função da profundidade total

da vertical, conforme metodologia proposta por Santos et al (2001) e Boiten (2008). Por exemplo, a definição "velocidade a 0,2p", significa a que a velocidade foi aferida a 20% de profundidade naquela vertical.

O molinete utilizado nesse trabalho foi o da marca General Oceanics, modelo 2030R, o qual possui rotor de alta velocidade (0,16 – 2,4m/s) (GENERAL OCEANICS, 2018).

2.3.3 Método acústico (Doppler)

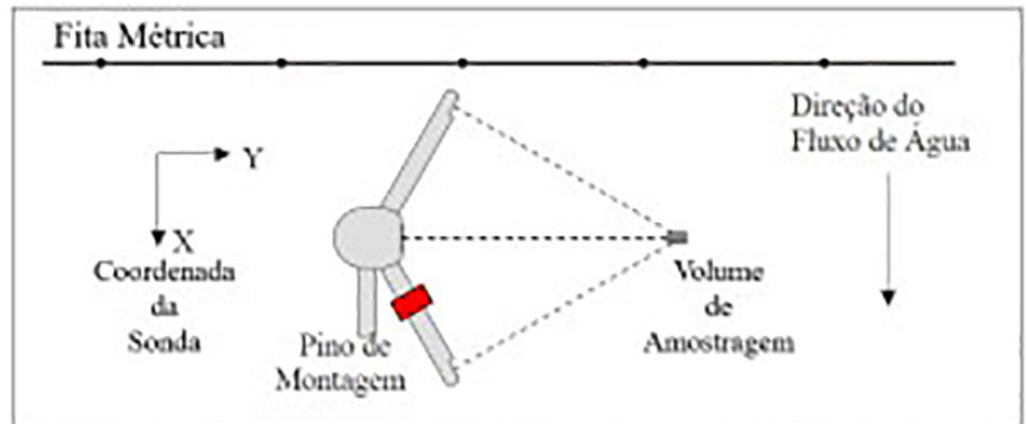
Para esse método foi utilizado o micro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) FlowTracker® fabricado pela YSI, que faz uma aferição pontual no campo de velocidades e, por isso, possui algumas similaridades com relação aos molinetes velocimétricos quanto ao procedimento experimental em sua aplicação. Por meio da

seção transversal, deve-se realizar medições pontuais nas verticais previamente definidas. Sempre que possível deve ser realizado mais de uma medição em cada ponto, em diferentes profundidades, com o intuito de tornar o resultado mais confiável.

Esse sensor realiza a aferição pontual da velocidade em uma região denominada de "volume de amostragem", que fica localizada a 10 cm do transmissor acústico (SonTek/YSI, 2009), conforme esquema apresentado na Figura 5.

Considerando como referência a direção do fluxo de água, é importante garantir que a fita vermelha presente em um dos transmissores acústicos fique posicionada conforme o esquema apresentado na Figura 5.

Figura 5. Vista superior da sonda FlowTracker com orientação relativa ao fluxo de água.



Fonte: SonTek/YSI (2009).

2.3.4 Método químico (Método do traçador conservativo)

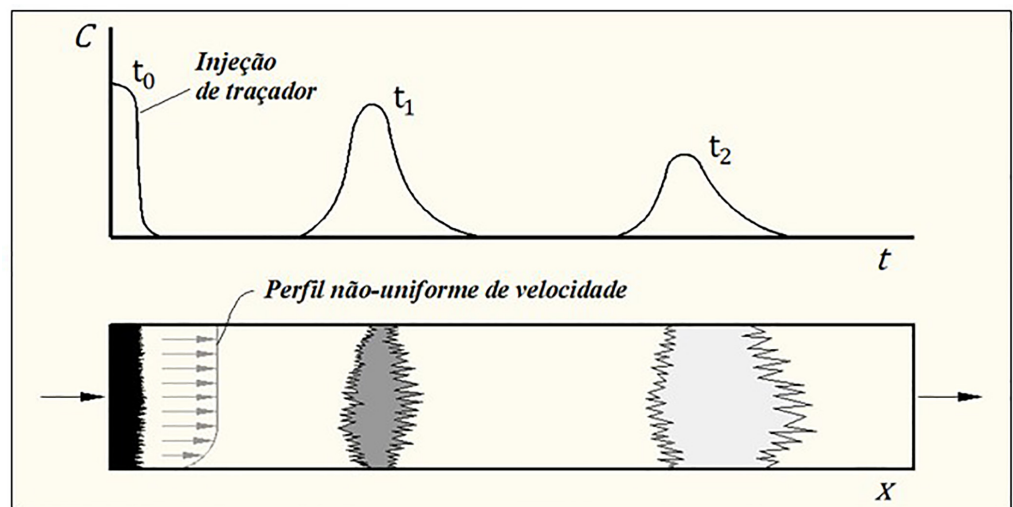
O uso de traçadores para a medição de vazão exige o entendimento dos princípios que envolvem a transferência de massa de substâncias conservativas em escoamentos. Os mecanismos de advecção, difusão molecular e difusão turbulenta governam esse tipo de transporte, e juntos formam o que é denominado de dispersão hidrodinâmica (BIRD et al, 2007; GIORGETTI, 2015). Esse é um método adequado para caracterizar escoamentos não-ideais, principalmente em situações onde há a presença de caminhos preferenciais e zonas de recirculação (LEVENSPIEL, 1999; METCALF & EDDY, 2014).

Neste trabalho o traçador foi lançado na forma de pulso, a partir

de uma solução salina de cloreto de sódio. A concentração utilizada foi de 20 gNaCl/L, sendo esse um valor significativamente abaixo da solubilidade desse sal, que é de 360 gNaCl/L a 20°C. Valores baixos de concentração são recomendados para que seja evitado o efeito de densidade do mesmo ao longo do escoamento, que pode prejudicar a qualidade da curva de curva de passagem da pluma de traçador a ser obtida durante o processo de medição (COSTA, 2015).

Na Figura 6 está apresentado um desenho esquemático típico da concentração (Figura 6a) e do comportamento visual da dispersão do traçador (Figura 6b) ao longo de escoamentos em canais, após a injeção ou despejo de traçador na forma de pulso.

Figura 6. Vista em perfil da seção longitudinal de um escoamento com a representação teórica da variação da concentração (C) do traçador ao longo do tempo (t) (6a) e do comportamento da massa de traçador ao longo do espaço (X) (6b), após a sua injeção ou despejo na forma de pulso.



Fonte: autoria própria.

Como procedimento experimental para esse método obteve-se a velocidade média do escoamento [L/T], por meio da seguinte relação:

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Distância}}{\text{Tempo (t)}} \quad [3]$$

A distância refere-se ao comprimento entre a seção de lançamento do traçador até a seção de aferição de passagem do mesmo, t é o tempo médio de passagem do traçador. No Rio Monjolinho o lançamento da solução salina ocorreu a uma distância de 39,4 metros da seção de medição de vazão. No canal artificial, a distância entre o lançamento do traçador e a seção de aferição foi de 10 metros.

Com a determinação da área (A) da seção transversal, a Equação 3 pode ser utilizada da seguinte forma:

$$A \cdot \text{Velocidade} = \frac{\text{Distância}}{\text{Tempo (t)}} \cdot A \quad [4]$$

A equação 4 é similar à Equação 5:

$$\text{Vazão (Q)} = \text{Velocidade} \cdot A \quad [5]$$

O tempo médio (t) de passagem da pluma de traçador em uma seção transversal pode ser definido pela Equação 6 ou 7:

$$t = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C \cdot dt}{\int_0^{\infty} C \cdot dt} \quad [6]$$

Sendo C a concentração do traçador no instante de tempo. A equação 6, se discretizada, tem a seguinte forma:

$$t = \frac{\sum t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} \quad [7]$$

A forma de aferição da passagem da pluma durante a execução do ensaio foi realizada de modo contínuo, com intervalos de tempo de 5s para o sensor Vernier e 30s para o sensor YSI. Com relação ao tempo total de amostragem recomenda-se que a definição desse período seja equivalente a aproximadamente três vezes o tempo médio estimado de passagem da pluma, para que o declínio da curva seja devidamente caracterizado (COSTA, 2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Trecho do Rio Monjolinho

A seção analisada apresentava uma largura de 2,65 m, profundidade média de 0,19 m e declividade do trecho de 0,022 m/m. Para o método acústico foram definidas 9 verticais, o que representa uma quantidade maior do que a mínima recomendada por Santos et al (2001) e Boiten (2008). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1. A vazão encontrada foi de 24,3 L/s.

Para o método químico, foram estipuladas 2 verticais, de modo que a seção transversal foi dividida em 2 sub-seções iguais, sendo utilizado um condutivímetro para cada sub-seção, posicionados a 0,6p. As verticais foram alocadas a 1/3 de distância da margem mais próxima. Os condutivímetros foram utilizados simultaneamente durante a passagem da pluma. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2. A vazão encontrada foi de 24,7 L/s.

Tabela 1. Resultados do método acústico no Rio Monjolinho.

Vertical	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
Distância da margem (m)	0,15	0,4	0,7	1	1,3	1,6	2	2,24	2,5	2,5
Profundidade (m)	0,18	0,22	0,24	0,24	0,25	0,26	0,2	0,13	0	NA
Largura da vertical (m)	0,2	0,275	0,3	0,3	0,3	0,35	0,32	0,25	desprezad	NA
Área da sub-seção (m ²)	0,036	0,060	0,072	0,072	0,075	0,091	0,064	0,032	desprezad	0,503
Velocidade a 0.2p (m/s)	0,09	0,102	0,084	0,081	0,089	0,051	0,021	0,018	0	NA
Velocidade a 0.8p (m/s)	0,056	0,017	0,02	0,023	0,046	0,029	0,024	0,007	0	NA
Velocidade média na vertical (m/s)	0,073	0,059	0,052	0,052	0,067	0,04	0,022	0,012	0	NA
Vazão na sub-seção (m ³ /s)	0,002	0,003	0,003	0,003	0,005	0,003	0,001	0,000	0	0,0243
Vazão na sub-seção (L/s)	2,63	3,60	3,74	3,74	5,06	3,64	1,44	0,41	0	24,3

NA = não se aplica.

Fonte: autoria própria.

Tabela 2. Resultados do método químico no Rio Monjolinho.

Condutivímetro	Área da sub-seção (m ²)	Tempo médio de passagem da pluma: t (s)	Velocidade (m/s)	Vazão (m ³ /s)	Vazão média na seção total (L/s)
YSI	0,2515	803,6	0,0490	24,66	24,7
Vernier	0,2515	803,1	0,0491	24,68	

Fonte: autoria própria.

A curva de sólidos dissolvidos totais adimensional (SD_{adm}) para cada sensor foi obtida através da equação 8:

$$SD_{adm} = \frac{SD}{SD_{máximo}} \quad [8]$$

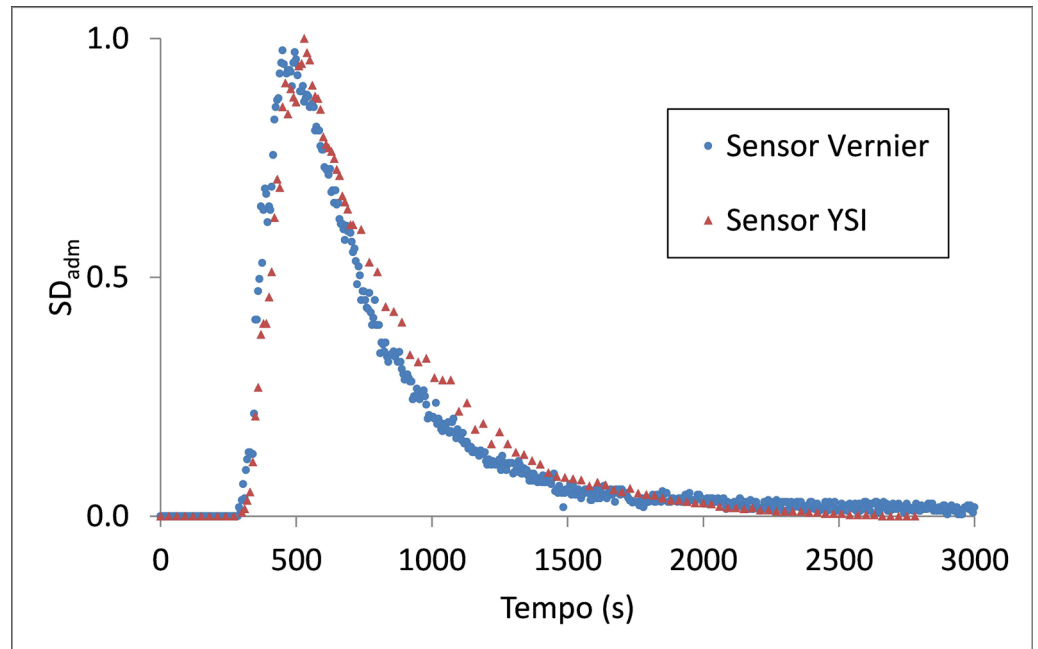
Em que SD se refere a quantidade de sólidos dissolvidos totais (mg/L) aferida no instante de tempo, e SD_{máximo} se refere ao valor máximo de sólidos dissolvidos totais (mg/L) que foi encontrado durante o tempo total de amostragem.

As curvas de passagem com a concentração dos sólidos dissolvidos totais adimensional (SD_{adm}) da pluma do traçador conservativo para os dois sensores foram muito similares, e podem ser verificadas na Figura 7. A vazão encontrada

pele método químico foi de 24,7 L/s, uma diferença de apenas 1,6% em relação à aferição usando-se o método acústico.

Ambos métodos apresentam resultados muito próximos dos valores de vazão, especialmente considerando-se canais mais homogêneos e de maior profundidade, como o analisado aqui (NORD et al., 2014; SCHUGERL et al., 2019). Entretanto, em situações de campo com maiores números de eventos de medição, o método da diluição pode apresentar grande erro relativo, enquanto em alguns casos o método acústico pode superestimar a vazão mensurada (SOUPIR et al., 2009). Desta forma, comparamos estes métodos com dois outros métodos adicionais em situações de diferentes composições do substrato e profundidade, conforme descrito abaixo.

Figura 7. Curvas de passagem do traçador conservativo para os dois condutivímetros utilizados.



Fonte: autoria própria.

A diferença encontrada para os valores de vazão com uso do método acústico (24,3 L/s) e do método químico (24,7 L/s) foi de apenas 1,6%, indicando haver aderência entre os resultados.

Trecho do Canal Artificial

O canal é definido com seção retangular com largura de 43 cm e declividade média de 0,032 m/m. No sub-trecho de montante, com a presença de algas, a profundidade da lâmina de água encontrada foi de 11 cm. No sub-trecho de jusante, sem a presença de algas, foi encontrada uma profundidade de 7 cm. Como a distância entre o início do sub-trecho de montante e o final do sub-trecho de jusante foi de apenas 20 metros, foram desconsiderados, para efeito de cálculos, as perdas por evaporação ou contribuições subterrâneas ao

longo do escoamento. Assim, a partir dessas considerações, considerou-se como válida a aplicação da equação da continuidade, nos sub-trechos de montante e de jusante, da seguinte forma:

$$V. A_{\text{sub-trecho de montante}} = V. A_{\text{sub-trecho de jusante}} \quad [9]$$

Deste modo, uma maneira de checar a confiabilidade dos resultados de medição de vazão para cada método aplicado no canal artificial, considerando o princípio da conservação da massa pressuposto na Equação 9, é que os valores de vazão obtidos à montante e a jusante devem ser iguais.

Os resultados encontrados para os métodos aplicados nos sub-trechos do canal artificial estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das medições de velocidade e vazão no canal artificial.

Sub-trecho de montante			Sub-trecho de jusante		
(com algas)			(sem algas)		
Método	Velocidade Média (m/s)	Vazão média (L/s)	Método	Velocidade Média (m/s)	Vazão média (L/s)
Químico	0,169	8,0	Químico	0,263	7,9
Flutuador (sem fator de correção)	0,318	15,0	Flutuador (sem fator de correção)	0,357	10,8
Flutuador (fator de correção 0,85)	0,270	12,8	Flutuador (fator de correção 0,85)	0,303	9,2
Molinete	0,153	7,3	Molinete	0,193	5,8
Hidrométrico Acústico	0,196	9,3	Hidrométrico Acústico	0,191	5,7

Fonte: autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, com relação ao método acústico houve divergências entre os resultados de vazão encontrados para os dois sub-trechos, sendo 9,3 L/s para o sub-trecho de montante e 5,7 L/s para o sub-trecho de jusante, uma diferença de 38,7%, quando espera-se encontrar equivalência nos resultados considerando os princípios que regem a equação da continuidade, na forma apresentada pela Equação 9. Dentre os motivos que podem ter ocasionado essa diferença relatam-se as dificuldades operacionais inerentes encontradas em campo, quanto a certeza do posicionamento do equipamento na seção transversal do canal. De acordo com a metodologia empregada, deve-se haver um posicionamento

preciso do "volume de amostragem" (Figura 5) do FlowTracker durante a medição, principalmente por se tratar de um canal com pequenas dimensões como esse pois, devido ao perfil não-uniforme de velocidades, o posicionamento inadequado do equipamento pode ocasionar importantes desvios na idealidade dos resultados. Ressalta-se que o "volume de amostragem" do FlowTracker não é possível de ser visualizado, sendo esse um fator que pode contribuir para os erros de medição, principalmente em se tratando de canais ou rios de pequeno porte. Em comparação com o método do traçador, SCHUGERL et al. (2019) verificaram que o ADV pode resultar em maiores ou menores estimativas de velocidade média, dependendo

das condições do fluxo de água e homogeneidade do canal. Por outro lado, NORD et al. (2014) verificaram que equipamentos do tipo Doppler podem subestimar as velocidades do fluxo na presença de sedimentos e partículas finas sendo transportados pela água. Desta forma, diferentes métodos podem ser mais precisos dependendo das condições de campo, como a presença de vegetação aquática ou outros obstáculos que dificultem a obtenção de medições com o ADV, ou diluição e transporte corretos ao se usar o método do traçador.

Com relação ao flutuador, verifica-se que este foi o método que apresentou a maior discrepância entre os resultados obtidos, comparando-se os sub-trechos de montante e jusante para o mesmo método. Isso se justifica pelo fato de que ao realizar a sua trajetória na superfície da água, o flutuador se encontra em uma região com elevados valores de velocidades, que geralmente são próximos ou iguais à velocidade máxima da seção. Considerando ainda a particularidade de haver algas presentes no fundo do canal no sub-trecho de montante, que ocupavam em torno de 50% do perfil inferior da lâmina de água, isso favoreceu bastante a resistência ao escoamento na região inferior da seção, havendo o efeito compensatório de velocidades muito elevadas na região superior da seção transversal por onde o objeto flutuante se posicionou. Em estudos de campo, o método dos flutuadores pode apresentar alta acurácia quando comparado a medições diretas da vazão em cursos d'água, especialmente considerando-se maiores profundidades (HUNDT & BLASCH, 2019; SOUPIR et al., 2009). O método dos flutuadores possui a vantagem de ter um

custo relativamente muito baixo, entretanto necessita ser aplicado mediante estudos que determinem ou preveem o fator de correção da vazão do escoamento que está sendo analisado, para que não ocorra a superestimativa dos valores encontrados. Neste trabalho, no sub-trecho de montante, em que houve a presença de algas no fundo do canal, o fator de correção encontrado para o método do flutuador foi de 0,53. No sub-trecho de jusante, com o fundo limpo construído em alvenaria, o fator de correção encontrado para o método flutuador foi de 0,73. Esses fatores de correção foram calculados tomando-se como referência os resultados obtidos com o uso do método químico, pois verifica-se que este foi o método que mais obteve confiabilidade em seus resultados, considerando o princípio de conservação da massa. Esses fatores de correção encontrados, tanto para o sub-trecho de jusante quanto para o sub-trecho de montante, foram menores do que os sugeridos na literatura por CETESB/ANA (2011) (fator de correção 0,85) e EPA (1997) (fator de correção 0,9 a 0,8). Isso significa que, para o caso do canal artificial, se a correção de vazão for realizada a partir de valores de referência da literatura consultada, ainda assim haverá a superestimativa da mesma. Na Tabela 3, não foi apresentado o cálculo de correção da vazão a partir do fator proposto por EPA (1997), pois as características do fundo do canal artificial estudado não se assemelham com os dois tipos de formação propostos nessa referência.

Os resultados obtidos com o molinete velocimétrico também não foram similares ao comparar os sub-trechos de montante e jusante, não atendendo ao princípio da equação

de continuidade. Relata-se que durante o seu posicionamento e medição nas seções transversais do canal, o equipamento não realizou as rotações da hélice de maneira adequada, pois houveram algumas colisões do mesmo com o fundo do canal na lâmina de 7 cm, o que possivelmente contribuiu com a subestimativa da velocidade. Também foi possível observar que no outro trecho, com 11 cm de lâmina, as algas reduziram significativamente a velocidade do escoamento na região inferior da seção, podendo ter ficado abaixo do limite de sensibilidade do equipamento. Dentre os métodos de medição utilizados nesse trabalho, o uso do molinete velocimétrico é um método relativamente de baixo custo, quando comparado com o método acústico, porém de custo mais elevado que o flutuador, e com custo similar ao método químico. Ressalta-se que o molinete utilizado possui elevada confiabilidade relatada em literatura (SOUPIR et al., 2009) e também conforme verificado pelos autores do presente trabalho em outras condições experimentais. A partir das observações realizadas em campo, os autores entendem que a condição ideal para aplicação do molinete utilizado é que o mesmo seja aplicado com lâmina líquida mínima do escoamento a partir de 10 cm. Entende-se que o seu uso em condições de lâminas menores do que 10 cm deve estar condicionado a uma análise de seu comportamento por meio de processos de validação.

Com relação ao método químico, a diferença encontrada para os valores de vazão, nos sub-trechos de montante (8,0 L/s) e de jusante (7,9 L/s), foi de 1,3%. Assumindo os possíveis erros que podem existir em uma campanha de medição de vazão, essa diferença é consideravelmente

pequena ou insignificante. Assim, verifica-se que, dentre os métodos utilizados, o método químico foi o que mais se aproximou da condição de atender o princípio da equação de continuidade. Esse método tem como vantagem ser capaz de aferir escoamentos com velocidades muito baixas, em faixas geralmente não detectáveis por molinetes velocimétricos. Em escoamentos com velocidades elevadas ele também pode ser utilizado, entretanto, nesses casos deve-se ter o cuidado para que a frequência de amostragem seja compatível com o tempo de passagem da pluma de traçador. Em ambas as condições (baixa e alta velocidade), o método da diluição apresentou menos erros que o ADV em condições de campo (SU & LANGHAMMER, 2014). Como diretriz inicial pode-se considerar que será necessário um tempo total de aferição em torno de três vezes o tempo médio de passagem da pluma. O método químico possui como desvantagens a necessidade de preparação da solução contendo o traçador conservativo e também, durante sua aplicação no campo, é necessária a atenção sobre duas seções transversais, sendo a de lançamento do traçador e, mais a jusante, a de sua aferição onde deve ser posicionado o sensor ou amostrador. Essas condições podem exigir a necessidade de mais pessoas do que quando comparado com o método do molinete velocimétrico. Quanto à instrumentação envolvida, o seu custo é equivalente ao método do molinete.

De acordo com a revisão de DOBRIYAL et al. (2017), os diferentes métodos usados no presente estudo apresentam diferenças em diversos aspectos. Estes autores consideraram que os métodos químico e do

flutuador teriam menor acurácia que os métodos acústico e do molinete velocimétrico, mas teriam menor custo. O método químico teria maior impacto no ambiente (dependendo da composição do traçador) e maior dificuldade operacional para obtenção de dados de campo. Por outro lado, diferentes estudos comparativos que avaliaram diferentes métodos em campo chegaram a conclusões diversas, como descrito acima. Desta forma, dependendo das condições de campo e dos recursos disponíveis, diferentes métodos podem ser mais efetivos para medições adequadas da vazão de cursos d'água.

4. CONCLUSÕES

Com os ensaios realizados nesse trabalho foi possível conhecer potencialidades e limitações sobre os métodos utilizados. Mediante os pressupostos assumidos e condições analisadas, o método químico apresentou confiabilidade de aplicação nos dois tipos de escoamentos que ocorreram no canal artificial e no rio natural.

Nos estudos desenvolvidos, para o método simplificado do flutuador, recomenda-se o uso do fator de correção 0,73, para canal com fundo em alvenaria e 0,53, para canal com fundo em alvenaria com a presença de algas.

Verifica-se que para o planejamento experimental de campanhas de medição de vazão é importante que na fase de seleção dos métodos sejam considerados os custos envolvidos com a instrumentação, a viabilidade de sua aplicação considerando as características da seção de medição como largura e profundidade da lâmina de água, e também, as faixas de velocidade do escoamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação tecnológica concedida ao terceiro autor; à Profa Dra. Sonia Maria Couto Buck do Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos por viabilizar a realização de alguns ensaios deste trabalho; à Dra. Débora Bessi do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos pela ajuda na coleta de dados do Rio Monjolinho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13403: *Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores - Escoamento livre - Procedimento*. Rio de Janeiro. 1995.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E. & LIGHTFOOT, E.N. *Transport phenomena*, 2nd ed, 2007.

BOITEN, W. *Hydrometry: A Comprehensive Introduction to the Measurement of Flow in Open Channels*. CRC Press/Balkema, 3rd Edition, 2008.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1997.

BS EN ISO 748. *Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels – Velocity area methods using point velocity measurements*, 2021.

CAMPOREZ, P. Sede, escassez e

- mortes no interior do Brasil. *Jornal: O Estado de S. Paulo, São Paulo*, 02 de fev. de 2020.
- CARVALHO, A. P. P. et al. Potential water demand from the agricultural sector in hydrographic sub-basins in the southeast of the state of São Paulo-Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 319, n. January, p.1-15, 2021.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO/ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimentos, comunidade aquáticas e efluentes líquidos*. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.
- COSTA, D.J.L. *Modelo Matemático para Avaliação Hidrodinâmica de Escoamentos em Regime Não-permanente*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- COSTA D.J.L. et al. Hydrodynamic evaluation of retention time in non-steady state reactors using the N-CSTR model and numerical simulation. *Desalination and Water Treatment*, v.132, p.30-41, 2018.
- COSTA, D.J.L. et al. Medição do consumo de água em propriedades rurais: desafios e alternativas tecnológicas. In: PALHARES, J.C.P., *Produção animal e recursos hídricos: uso da água nas dimensões quantitativa e qualitativa e cenários regulatórios e de consumo*. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 97 – 156.
- DIXON, H. et al. Intergovernmental cooperation for hydrometry – what, why and how? *Hydrological Sciences Journal*, Special Issue: Hydrological data: Opportunities and barriers, 2020.
- Dobriyal, P., Badola, R., Tuboi, C., & Hussain, S. A. A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Applied Water Science*, 7(6), 2617-2628, 2017.
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Stream Flow. In: *Office Of Water: Monitoring Water Quality. Volunteer stream monitoring: a methods manual*. Washington: EPA, 1997.
- FULLER, D. *Hydrometry: Principles and Practice*. Callisto Reference, 2020.
- GENERAL OCEANICS. *Operators Manual: Digital Flowmeter Mechanical and Electronic 2030 and 2031 Series*, 2018.
- GIORGETTI, M.F. *Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia*. 1ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- HUNT, J. D. et al. Energy crisis in Brazil: Impact of hydropower reservoir level on the river flow. *Energy*, v. 239, 2022.
- HUNDT, S., & BLASCH, K. Laboratory assessment of alternative stream velocity measurement methods. *PloS One*, 14(9), e0222263.019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222263>. Acesso em 12 jun. 2022.
- LE COZ, J. et al. Estimating the Uncertainty of Streamgauging Techniques Using In Situ Collaborative Interlaboratory Experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142 (7),

2016. DOI: <https://doi.org/10.1061/29HY.1943-7900.0001109>. Acesso em 12 jun. 2022
- LEVENSPIEL, O. *Chemical reaction engineering*, 3rd ed., New York: Wiley & Sons Inc., 1999.
- METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. McGraw-Hill, 5ª ed., 2014.
- NGOMA, D.; WANG, Y. Hhaynu micro hydropower scheme: Mbulu – Tanzania comparative river flow velocity and discharge measurement methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 62, p 135-142. 2018.
- NORD, G. et al. Applicability of acoustic Doppler devices for flow velocity measurements and discharge estimation in flows with sediment transport. *Journal of Hydrology*, 509, 504-518, 2014.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Nota à Imprensa - Esclarecimentos em relação à nota técnica sobre avaliação das condições de atendimento eletroenergético do sistema interligado nacional - Estudo prospectivo junho a novembro de 2021*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Nota-a-imprensa-Esclarecimentos-em-relacao-a-nota-tecnica-Avaliacao-das-Condicoes-de-Atendimento-Eletroenergetico-do-SIN.aspx>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- SANTOS, I. et al. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.
- SCHUGERL, R., VELISKOVA, Y., & KIMLICKOVA, T. Comparison of the discharge and flow velocity values determined by ADV device and indicator method. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 362, No. 1, p. 012056). IOP Publishing, 2019.
- SONTEK/YSI. *Manual do usuário do ADV® de mão do FlowTracker®*. YSI Environmental Company, 2009.
- SOUPIR, M. L., MOSTAGHIMI, S., & MITCHEM, JR, C. E. A comparative study of stream-gaging techniques for low-flow measurements in two Virginia tributaries 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(1), 110-122, 2009.
- SU, Y. & LANGHAMMER, J. (2014). Feasibility of using a salt tracer dilution method to estimate stream flow in small mountainous catchments in the Sumava Mountains. *Proceedings of the 2nd Biannual CER Comparative European Research Conference*. p. 106-109.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Manual on Stream Gauging*. Chairperson, Publications Board, Geneva 2, Switzerland, 2010.
- YU, Z. et al. Preface: Hydrological processes and water security in a changing world. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, v. 383, n. 4, p. 3-4, 2020.