

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**Luiz Henrique Maldonado**

**Validação experimental de metodologias para quantificação contínua  
de vazão no Ribeirão da Onça.**

**SÃO CARLOS – SP**

**2009**



**LUIZ HENRIQUE MALDONADO**

**Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça.**

**Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.**

**Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento**

**Orientador: Profº Ass. Edson Cezar Wendland**

**SÃO CARLOS - SP**

**2009**



Aos meus familiares que me apoiaram neste passo de minha vida, principalmente ao meu pai Antonio Maldonado Martins e minha mãe Sonia Maria Barrinha Maldonado.



## **Agradecimentos**

A Deus.

Aos familiares, pela compreensão e apoio nos momentos difíceis, em especial ao meu pai Antonio Maldonado, mãe Sonia M. B. Maldonado, irmãos Daniela e Gustavo e vó Hilda.

Ao Professor Edson C. Wendland, pela orientação, apoio, ensinamentos e amizade.

Ao Professor Rodrigo de Melo Porto pelas sugestões e opiniões referentes ao trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial ao Técnico Roberto Bérghamo, pelo apoio e grande ajuda nos trabalhos de campo.

Aos amigos do LHC: Marcuzzo, Mariano, Anderson, Alessandro, Marcelo Cavichia, Luis Gomes, Patrick, Vinicius, Fernanda, Taiana, Ivan, Juliana, Manzione, Cabrera, Chaves, André e dos intercambiários Lijalem, Cristian e Isabela pelo apoio e amizade durante o período do trabalho.

Aos amigos de São Carlos: Caruso, Zozó, Macarrão, Robertinho, Fábio, Eudes, Nilson, Jair, Giovane e Já, Jesner, Zanchetta, Abner, Mun-há, Serginho, Renato, Teia, Marcelo, Marcos, Eudes, Déia, Tina, Rafael, Jorge e a turma da Civil 2002, pela convivência e compartilhamento de momentos memoráveis.

A Milena G. Collodel pela ajuda, companhia, apoio e paciência durante o período do desenvolvimento e conclusão do trabalho.

Aos amigos de mestrado: Julio, Valter, Nayara, Hemerson, André Simões, André Pioltini, Jaque, Thiago, Michele, Thiago, Vitor e Camila.

Aos amigos de Penápolis, pelo apoio e amizade.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos e a Universidade de São Paulo pela infra-estrutura e oportunidade para o desenvolvimento do trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

A todos, que direta ou indiretamente, participaram para a conclusão do trabalho e que não foram mencionados acima.



*“O que fazemos durante as horas de trabalho determina o que temos;  
o que fazemos nas horas de lazer determina o que somos.”*

*Charles M. Schulz*



## RESUMO

Maldonado, L.H. **Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça**, 2009. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Desde 2004, o grupo de estudos do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) estuda as taxas de recargas hidráulicas do Aquífero Guarani, na Bacia do Ribeirão da Onça. Entretanto, não havia se estudado a quantificação do escoamento superficial. Para sanar esta deficiência, este trabalho visou analisar as metodologias de estimativa de vazão com qualidade para a Bacia do Ribeirão da Onça. Para a realização do trabalho, foi adquirido o equipamento Flo-Tote3, capaz de medir velocidade e nível d'água. A princípio, o equipamento foi verificado e comparado em laboratório, medindo velocidades 3% inferiores que o molinete e estimando vazões de 0,5 a 7,2% de diferença que o vertedor triangular. No Ribeirão da Onça, foi escolhida e construída uma seção de controle de vazão e instalado o Flo-Tote. O equipamento mediu velocidades 5% inferiores que o molinete, com variações de 0,3 a 8,7%. Além disso, um vertedor circular foi instalado em 6 ocasiões, resultando em vazões de 3 a 15% inferiores as vazões estimadas pelo molinete, em virtude do vazamento que ocorreu entre o vertedor e a parede de concreto. A partir de dezembro de 2007, foram iniciadas medições de níveis d'água com a construção do linígrafo e estimadas as vazões de modo contínuo com o auxílio de equações teóricas. Como a jusante da seção de controle de vazão existe um sistema de bombeamento, as equações para determinar a vazão sofrem interferências. Entretanto, foi aplicado o método das isotáquias, que utiliza valores de velocidades e níveis d'água para o cálculo da vazão e que não sofre interferências com o represamento e instalações de vertedores. Apesar de ocorrer problemas de falta de energia e de manutenção, o escoamento superficial foi quantificado com qualidade para futuros estudos da área afim.

**Palavras-chave:** Vazão, perfil de velocidades, isotáquias, hidrometria.

## **ABSTRACT**

Maldonado, L.H. **Experimental validation of methodologies for continuous measurement of flow in the Ribeirão da Onça Basin**, 2009. Master of Sciences Degree Dissertation – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

Since 2004, the group of studies of the Computational Hydraulic Laboratory (LHC) studied the rates of water recharge in the Guarani Aquifer recharges water in the Ribeirão da Onça Basin. However, it had not studied the quantification of runoff. To remedy this deficiency, this study aimed to analyze the methodologies for estimation of flow quality for the Ribeirão da Onça Basin. To carry out the work, it was acquired a Flo-Tote3, capable of measuring velocities and water levels. First, this equipment was checked and compared in the laboratory, measuring velocities 3% below, those obtained using flowmeters and 0.5 to 7.2% differences when compared with results using triangular weir. In Ribeirão da Onça, was chosen and built a section of control flow and installed the Flo-Tote. The equipment measured velocities 5% below the current meters, with variations from 0.3 to 8.7%. In addition, a circular weir was installed on 6 occasions, resulting in flow rates from 3 to 15% lower than those estimated by current meters because of the flow that occurred between the bridge and weir. Since December 2007, started the measurements of water levels and the estimated flow on a continuous basis with the aid of theoretical equations. As the downstream section of the control flow is a pumping system, the equations to determine the flow are interfered. However, it was applied the method of the lines of the same velocities, which uses values of velocities and water levels to calculate the flow without interference with the impoundment and installation of weirs. Despite the problems of lack of energy and maintenance, the runoff was quantified with quality for future studies of the area.

**Key-words:** Flow, velocity profile, velocity contour, hydrometer.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Desenvolvimento da camada limite para um canal alimentado por um reservatório. Fonte: Modificado de Chow (1959).....  | 25 |
| Figura 2. Regiões da camada limite. Fonte: Modificado de Yen (1991) .....   | 26 |
| Figura 3. Tubo de Pitot. Fonte: Delmeé (1982).....  | 30 |
| Figura 4. Molinete hidrométrico.....  | 31 |
| Figura 5. Desenho esquemático de decomposição da seção transversal de um curso de água para o cálculo de vazão, a partir de medição com molinete hidrométrico. (Modificado de Barreto, 2006).....   | 33 |
| Figura 6. ADCP WorkHorse Rio Grande de 600 kHz, utilizado pela Itaipu Binacional.....   | 36 |
| Figura 7. Esquema de transmissão e recepção de ondas acústicas pelo ADCP. Fonte: Modificado de Simpson (2001).....  | 36 |
| Figura 8. Componentes das velocidades. Fonte: Modificado Simpson (2001).....  | 36 |
| Figura 9. Escoamento sobre um vertedor retangular: (a) descarregador Bazin; (b) vertedor retangular com contrações laterais. Fontes: (a) Porto (2003), (b) <a href="http://www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt">www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt</a> .....           | 39 |
| Figura 10. Vertedor Triangular de Parede Fina. Fontes: (a) Porto (2003), (b) <a href="http://www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt">www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt</a> .....   | 40 |
| Figura 11. (a) valores de $\mu$ , para contração completa: $h/a < 0,4$ , $a/L < 0,4$ (erro de 1%); (b) valores de $\mu$ , para contração não completa (para $\alpha = 90^\circ$ e erro de 1% a 2%), sendo L - largura do canal e a - altura do vertedor; (c) Valores de $K_h$ .....   | 41 |
| Figura 12. Dimensões para o vertedor circular. Fonte: Bos (1989).....   | 41 |
| Figura 13. Calha Parshall. Modificado de Chow (1959) e Paiva e Paiva (2003).....  | 44 |
| Figura 14. Extrapolação pelo método logarítmico.....  | 47 |
| Figura 15. Extrapolação pelo método de Stevens.....   | 48 |
| Figura 16. Extrapolação por superfície molhada.....   | 49 |
| Figura 17. Isotáquias para a determinação da vazão.....   | 50 |
| Figura 18. Ilustração do campo magnético (dH) e elemento de corrente (I.dL).....  | 51 |
| Figura 19. Efeito da rugosidade do contorno na velocidade para um ponto arbitrário M, de uma seção transversal de um rio.....   | 51 |
| Figura 20. (a) e (b) Canal do Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP.....  | 55 |
| Figura 21. (a) e (b) Ilustrações do equipamento Flo-Tote 3.....   | 56 |
| Figura 22. Croqui da seção transversal do canal do Laboratório do SHS/EESC/USP. (a) Pontos de medição de velocidade: os pontos referem-se a medições feitas pelo Flo-Tote3 e os "x" referem-se a medições feitas pelo molinete (valores em metros); (b) Detalhe das possíveis isolinhas resultantes das medições de velocidade..... | 56 |
| Figura 23. Pontos de medição de velocidades para o canal de 0,40m de largura, para diferentes vazões: $B/H = 1,54$ ; $B/H = 1,29$ (valores em metros).....  | 57 |
| Figura 24. Pontos de medição de velocidades para o canal de 0,40m de largura, para diferentes vazões: $B/H = 1,14$ e $B/H = 1,09$ (valores em metros).....  | 58 |
| Figura 25. Detalhe do equipamento medindo a velocidade do escoamento no canal de 0,40m de largura.....  | 58 |
| Figura 26. Pontos de medição de velocidade para o canal de 0,20m de largura, para diferentes vazões: $B/H = 2,22$ ; $B/H = 1,88$ e $B/H = 1,22$ (valores em metros).....  | 59 |
| Figura 27. Pontos das medições de velocidade para o canal de 0,20m de largura, para a vazão de $13,1 \text{ l.s}^{-1}$ e $B/H = 1,25$ ; $B/H = 1,00$ e $B/H = 0,67$ controlada pela comporta a jusante: (valores em metros).....  | 59 |
| Figura 28. Localização da Bacia do Ribeirão da Onça.....  | 65 |
| Figura 29. Seção de medição de vazão, situada a montante da ponte e a montante da casa de bombas. O hidrometrista está medindo velocidades com um molinete hidrométrico.....  | 67 |
| Figura 30. Bacia do Ribeirão da Onça. Localização dos poços de monitoramento e da estação fluviométrica. Fonte: Gomes (2008).....   | 68 |
| Figura 31. Desenho esquemático da seção fluviométrica no Ribeirão da Onça.....  | 69 |
| Figura 32. Detalhe da instalação do Flo-Tote3.....  | 69 |
| Figura 33. Cravação das toras de eucalipto para estabilização da seção fluviométrica.....   | 70 |
| Figura 34. Instalação das toras transversais.....   | 71 |
| Figura 35. Instalação de sacos de areia.....  | 71 |
| Figura 36. Instalação do seixo rolado e tela no leito do rio.....   | 71 |
| Figura 37. (a) Seção de controle fluvial na Bacia do Ribeirão da Onça; (b) Detalhe da régua linimétrica.....  | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 38. Estimativa de vazão com o auxílio do molinete na seção de estrangulamento, a jusante da ponte, na Fazenda Santa Maria da Fábrica.....  | 73  |
| Figura 39. Estimativas de vazão na Bacia do Ribeirão da Onça, a montante da ponte.....  | 74  |
| Figura 40. Dimensões projetadas para o vertedor. As linhas tracejadas indicam os cortes feitos pela marcenaria em placa de maderite.....  | 75  |
| Figura 41. Croqui do vertedor circular. (a) Detalhes dos perfis metálicos e da fita de borracha; (b) Detalhe do vertedor circular biselado.....   | 75  |
| Figura 42. Trilho. (a) perfil do trilho; (b) detalhe da parte superior do trilho; (c) e (d) detalhes das rodinhas e espaçadores dos trilhos.....  | 76  |
| Figura 43. Processo para a medição de vazão com o vertedor. (a) posicionamento dos trilhos; (b) instalação do vertedor no primeiro tubo; (c) e (d) posicionamento do vertedor; (e) retirada dos trilhos do primeiro vertedor; (f) instalação dos trilhos e do vertedor para o segundo tubo de concreto.....       | 77  |
| Figura 44. (g) e (h) vertedores instalados; (i) medição da distância entre o pé da soleira do vertedor e o ponto superior do tubo de concreto; (j) e (k) vistas do escoamento após a instalação do vertedor; (l) vista a jusante da ponte.....  | 78  |
| Figura 45. (a) Linígrafo em fase de implantação e (b) Linígrafo instalado.....  | 79  |
| Figura 46. Suporte para o sensor (a) e para o Flo-Logger (b).....   | 81  |
| Figura 47. (a) Flo-Tote3 instalado na estação fluviométrica; (b) detalhe do sensor; (c) detalhe da caixa protetora do Flo-Logger.....   | 81  |
| Figura 48. Perfil transversal da seção de medição de vazão, no Ribeirão da Onça e posição do Flo-Tote (dimensões em metros).....  | 82  |
| Figura 49. (a) Fr e Re em relação a B/H para o canal de 0,40 m; (b) Fr e Rey em relação a B/H para o canal de 0,20 m; (c) $u^*$ e Reynolds de rugosidade para o canal de 0,40 m; (d) $u^*$ e Reynolds de rugosidade para o canal de 0,20 m.....   | 86  |
| Figura 50. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,40 m de largura. (a) B/H = 1,54; B/H = 1,29; B/H = 1,14; (b) B/H = 1,09.....   | 87  |
| Figura 51. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,20 m de largura. (a) B/H = 1,88; (b) B/H = 1,22; B/H = 2,22.....   | 87  |
| Figura 52. Perfil de velocidades para o canal de 0,40m de largura, Lei das Potências. (a) B/H = 1,54; (b) B/H = 1,29; (c) B/H = 1,14; (d) B/H = 1,09.....   | 88  |
| Figura 53. Perfil de velocidades para o canal de 0,20m de largura, Lei das Potências. (a) B/H = 1,88; (b) B/H = 1,22.....   | 89  |
| Figura 54. Perfis de velocidades médias obtidas no canal de 0,40 m de largura e dos perfis calculados pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a) B/H = 1,29 e 1,09; (b) B/H = 1,14; (c) B/H = 1,54.....  | 90  |
| Figura 55. Perfis de velocidades: médias empíricas, para cada B/H, no canal de 0,20m de largura e das velocidades obtidas pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a) B/H = 1,22 e (b) B/H = 1,88.....  | 91  |
| Figura 56. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,20m de largura, para a vazão de 13,1 l.s <sup>-1</sup> , mas com controle da comporta a jusante.....   | 92  |
| Figura 57. Perfis de velocidade: médias empíricas, obtidas no canal de 0,20m de largura e velocidades obtidas pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a) B/H = 1,25; (b) B/H = 1,00; (c) B/H = 0,67.....   | 93  |
| Figura 58. Desvios em porcentagem entre as velocidades médias experimentais (potência e logarítmica) e as funções da literatura. (a) equação 42 (LOG – Maghrebi/Rugoso); equação 46 (POT – Chen/Rugoso); (b) equação 41 (LOG – Cheng/Liso); equação 45 (POT – Chen/Liso); equação 47 (POT – Barenblatt/Liso)..... | 94  |
| Figura 59. Relação entre as constantes m e a da Equação 44, em função de B/H.....   | 95  |
| Figura 60. Velocidades medidas com molinete e Flo-Tote3 (FT3) e seus respectivos desvios.....   | 95  |
| Figura 61. Velocidades medidas com molinete e Flo-Tote3 (FT3) em relação à vazão estimada pelo vertedor triangular.....   | 96  |
| Figura 62. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal de 0,20m. B/H = 2,22; 1,88; 1,22; Ordenadas y/H e Abscissas z/B, em que: y - lâmina d'água para um ponto qualquer; H - lâmina d'água total; z - distância de um ponto qualquer até a parede lateral do canal; B - largura total do canal.....      | 98  |
| Figura 63. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal de 0,20m. B/H = 1,25; 1,00; 0,67, Ordenadas y/H e Abscissas z/B, em que: y - lâmina d'água para um ponto qualquer; H - lâmina d'água total; z - distância de um ponto qualquer até a parede lateral do canal; B - largura total do canal.....      | 99  |
| Figura 64. Vazões (l.s <sup>-1</sup> ) calculadas pelo método das isotáquias (Equação 33) usando velocidades medidas com o Flo-Tote3 para B/H = 1,25, aplicando as isotáquias B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67, das Figuras 63 e 64, Ordenadas y/H e Abscissas z/B.....   | 101 |
| Figura 65. Desvio (%) de vazões calculadas pelo método das isotáquias (Eq. 33) com velocidades medidas com o Flo-Tote3 para B/H = 1,25, aplicando as isotáquias B/H=2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67 (Figuras 62 e 63), Ordenadas y/H e Abscissas z/B.....  | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 66 – Comparação das vazões estimadas pelo vertedor circular e pelo molinete hidrométrico. Variação de 1 cm (linha contínua) e 2 cm (linha tracejada) .....  | 106 |
| Figura 67. Vazões estimadas através de equações teóricas e molinete, para o período de 21/11/2007 a 15/5/2009. Os valores que estão inseridos na elipse tracejada referem-se a períodos que houve interferência do represamento da água a jusante da seção.....  | 108 |
| Figura 68. Correlação das vazões estimadas pela Equação 50 e molinete. Os triângulos vermelhos correspondem à situação de represamento a jusante da seção.....   | 109 |
| Figura 69. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Dezembro/2007 a Maio/2008. Linha azul (Bóia e contrapeso), pontos pretos (leituras manuais).....   | 111 |
| Figura 70. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Junho/2008 a Novembro/2008. Linha azul (Bóia e contrapeso), Linha marrom (transdutor de pressão), Linha verde (Flo-Tote3) e pontos pretos (leituras manuais). Setas – Instalação dos vertedores e seta dupla indica o período que houve influencia do represamento a jusante.....  | 112 |
| Figura 71. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Dezembro/2008 a Maio/2009. Linha azul (Bóia e contrapeso), Linha marrom (transdutor de pressão) e Linha verde (Flo-Tote3) e pontos pretos (leituras manuais). Setas – Instalação dos vertedores.....   | 113 |
| Figura 72 - Perfis de velocidade, obtidos pelo molinete, para a seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça .....  | 114 |
| Figura 73. Perfis de velocidade, obtidos pelo Flo-Tote, para a seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça .....   | 115 |
| Figura 74. Comparação entre velocidades obtidas pelo Flo-Tote e molinete.....  | 116 |
| Figura 75. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal do Ribeirão da Onça, Ordenadas y/H e Abscissas B.....   | 117 |
| Figura 76. Batimetria da seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça, entre as datas 10/09/2008 e 24/2/2009.....   | 118 |
| Figura 77. Hidrograma de Dezembro de 2007. Instalação do Linígrafo e do Floater (bóia e contrapeso) no dia 06/12/2007. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias .....                                  | 120 |
| Figura 78. Hidrograma de Janeiro de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....  | 121 |
| Figura 79. Hidrograma de Fevereiro de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....  | 120 |
| Figura 80. Hidrograma de Março de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....  | 123 |
| Figura 81. Hidrograma de Abril de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....  | 124 |
| Figura 82. Hidrograma de Maio de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....   | 125 |
| Figura 83. Hidrograma de Junho de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias.....  | 126 |
| Figura 84. Hidrograma de Julho de 2008. Instalação do Diver (transdutor de pressão) no dia 11/07/2009. As linhas azul e cinza indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater e pelo Diver, respectivamente, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias .....         | 127 |
| Figura 85. Hidrograma de Agosto de 2008. As linhas azul e cinza indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater e pelo Diver, respectivamente, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias .....   | 128 |
| Figura 86. Hidrograma de Setembro de 2008. Instalação do Flo-Tote no dia 12/09/2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e |     |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
|            | <i>as barras vermelhas representam as precipitações diárias. Neste período houve represamento na seção de bombeamento para irrigação</i> .....  | 129 |
| Figura 87. | <i>Hidrograma de Outubro de 2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias. Neste período houve represamento na seção de bombeamento para irrigação</i> ..... | 130 |
| Figura 88. | <i>Hidrograma de Novembro de 2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....   | 131 |
| Figura 89. | <i>Hidrograma de Dezembro de 2008. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....  | 132 |
| Figura 90. | <i>Hidrograma de Janeiro de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....   | 133 |
| Figura 91. | <i>Hidrograma de Fevereiro de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....   | 134 |
| Figura 92. | <i>Hidrograma de Março de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....   | 135 |
| Figura 93. | <i>Hidrograma de Abril de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....   | 136 |
| Figura 94. | <i>Hidrograma de Maio de 2009. A linha cinza indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias</i> .....  | 137 |
| Figura 95. | <i>Detalhe dos sensores sujos do Flo-Tote que afetaram as medições de velocidade</i> .....  | 139 |
| Figura 96. | <i>Valores de velocidade e nível d'água medidos pelo Flo-Tote. (a) Instalação do vertedor; (b) resposta à precipitação</i> .....  | 140 |
| Figura 97. | <i>Hidrograma construído usando as Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 24/10/2008</i> .....  | 141 |
| Figura 98. | <i>Hidrograma construído usando as Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 5/12/2008</i> .....   | 141 |
| Figura 99. | <i>Hidrograma construído pelas Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 6/2/2009</i> .....  | 142 |

## Lista de Tabelas

|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabela 1. Parâmetros para o cálculo da velocidade média na vertical.....</i>  | <i>32</i>  |
| <i>Tabela 2. Distância recomendada entre as verticais.....</i>   | <i>32</i>  |
| <i>Tabela 3. Passos para o cálculo da vazão, com a medição com molinete hidrométrico .....</i>   | <i>33</i>  |
| <i>Tabela 4. Valores de <math>\omega</math> e <math>\varphi</math> em função de <math>h/d</math>, para vertedores circulares.....</i>  | <i>42</i>  |
| <i>Tabela 5. Coeficiente de descarga médio para vertedores circulares .....</i>  | <i>43</i>  |
| <i>Tabela 6. Determinação da vazão no vertedor triangular.....</i>   | <i>85</i>  |
| <i>Tabela 7. Vazões estimadas pelo vertedor e Flo-Tote3 (FT3), para velocidades medidas a 60% da profundidade e para todas as velocidades medidas na seção (discretizadas) .....</i> | <i>97</i>  |
| <i>Tabela 8. Velocidades pontuais adimensionais para <math>B/H = 1,25</math> e canal de 0,20 metros de largura .....</i>   | <i>100</i> |
| <i>Tabela 9. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2007.....</i>   | <i>103</i> |
| <i>Tabela 10. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2008.....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Tabela 11. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2009.....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Tabela 12. Medições de vazão com o vertedor circular e o molinete .....</i>   | <i>105</i> |
| <i>Tabela 13. Valores de vazões obtidas pelo molinete e de equações teórica.....</i>   | <i>107</i> |
| <i>Tabela 14. Velocidades medidas pelo Flo-Tote e Molinete no Ribeirão da Onça.....</i>  | <i>116</i> |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |   |
|-------|---|
| ADCP  | Acoustic Doppler Current Profiler               |
| ADP   | Acoustic Doppler Profiler                       |
| CRHEA | Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada |
| FT3   | Flo-Tote3                                       |
| GPS   | Sistema de Posicionamento Global                |
| LHC   | Laboratório de Hidráulica Computacional         |
| PI    | Ponto Inicial                                   |
| PF    | Ponto Final                                     |
| SL    | Side Looking                                    |
| SW    | Side Wide                                       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $Q_e$                    | vazão de entrada   |
| $Q_s$                    | vazão de saída   |
| $V$                      | volume armazenado na bacia   |
| $\Delta V_p$             | volume precipitado   |
| $\Delta V_s$             | volume armazenado na superfície  |
| $\Delta V_{\text{solo}}$ | volume armazenado no solo  |
| $\Delta V_Q$             | volume escoado superficialmente  |
| $\Delta V_E$             | volume percolado   |
| $\Delta V_{ET}$          | volume evapotranspirado  |
| $y, s$                   | direção vertical e transversal do escoamento   |
| $I_y$ e $I_s$            | vetores unitários nas mesmas direções  |
| $\varepsilon$            | distância entre o ponto de máxima velocidade e a superfície d'água   |
| $\delta$                 | camada limite  |
| $\delta_o$               | subcamada laminar  |
| $\tau$                   | tensão de cisalhamento   |
| $\rho$                   | massa específica   |
| $l$                      | comprimento de mistura   |
| $dv/dy$                  | gradiente de velocidade a uma distância normal $y$ da superfície do leito  |
| $k$                      | constante de von Karman  |
| $u_*$                    | velocidade de atrito   |
| $C$                      | constante da integração  |
| $v(y)$                   | velocidade no ponto $y$  |
| $v_{\text{max}}$         | velocidade máxima da seção   |
| $h$                      | lâmina d'água  |
| $k_s$                    | altura de rugosidade   |
| $u$                      | velocidade local para uma distância $y$ do fundo do canal  |
| $u_{\text{max}}$         | máxima velocidade da seção transversal   |
| $y$                      | distância normal   |
| $m$                      | expoente que varia entre 4 a 12, dependendo da intensidade da turbulência.   |
| $a$                      | constante que varia com o número de Reynolds para escoamento turbulento hidraulicamente liso ou com a rugosidade relativa, $k_s/R_h$ para escoamento turbulento hidraulicamente rugoso |

|            |  |
|------------|--|
| $R_h$      | raio hidráulico  |
| $\nu$      | viscosidade cinemática   |
| $\Delta h$ | carga hidráulica   |
| $g$        | constante de aceleração da gravidade                                 |
| $C_F$      | coeficiente de pressão   |
| $v_{med}$  | velocidade média para uma seção transversal de um escoamento         |
| $v_{sup}$  | velocidade na superfície para uma seção transversal de um escoamento |
| $L$        | comprimento  |
| $L_i$      | largura de cada segmento de área                                     |
| $A_i$      | áreas de cada segmento   |
| $A$        | área   |
| $Q$        | vazão  |
| $\bar{v}$  | velocidade média   |
| $N$        | número e rotações  |
| $q$        | vazão da injeção do traçador   |
| $c$        | concentração inicial do traçador                                     |
| $C$        | concentração das amostras depois da diluição no rio                  |
| $V$        | volume de solução despejado  |
| $C_s$      | concentração da solução  |
| $C_r$      | concentração variável do sal no rio                                  |
| $T$        | tempo  |
| $L_s$      | largura da soleira   |
| $h$        | carga sobre a soleira  |
| $C_d$      | coeficiente de descarga  |
| $L_c$      | largura da garganta da Calha Parshall                                |
| $H_m$      | altura do nível d'água medido a montante da garganta                 |
| $H_j$      | altura do nível d'água medido a jusante da garganta                  |
| $I$        | corrente elétrica  |
| $dL$       | comprimento infinitesimal  |
| $dH$       | intensidade do campo magnético                                       |
| $r$        | distância (m) para um ponto M  |
| $\hat{r}$  | vetor unitário orientado para o ponto M                              |
| $U_0$      | permeabilidade magnética do meio                                     |

|            |  |
|------------|--|
| $du$       | diferença de velocidade  |
| $ds$       | elemento de contorno   |
| $c_1$      | constante relativa à rugosidade da superfície de contorno do canal     |
| $f(r)$     | função da velocidade para uma distância $r$                            |
| $\theta$   | ângulo entre o vetor do ponto M e o vetor do elemento do contorno $ds$ |
| P          | perímetro molhado da seção transversal                                 |
| $c_2$      | constante função da rugosidade do contorno e da natureza do escoamento |
| $c_i$      | velocidade padronizada   |
| $U(x,y)$   | velocidade padronizada para a velocidade medida $u(x,y)$               |
| $v_m$      | velocidade média   |
| $v_{60\%}$ | velocidade medida a 60% de profundidade na vertical                    |
| $v_i$      | velocidade para cada segmento  |
| Re         | número de Reynolds   |
| Fr         | número de Froude   |
| n          | coeficiente de rugosidade de Manning                                   |
| $B_i$      | constante de integração  |
| $C_i$      | constante de integração  |
| $u_{\max}$ | velocidade máxima  |
| $\beta$    | constante empírica   |
| $\gamma$   | constante empírica   |
| $A_c$      | Área molhada para escoamento crítico                                   |
| $v_c$      | velocidade crítica   |
| D          | diâmetro do bueiro   |
| B          | largura do topo da seção   |
| $\theta$   | ângulo de abertura da lâmina d'água para o bueiro                      |
| $H_m$      | altura média ou altura hidráulica                                      |
| $y_{lin}$  | altura d'água no linígrafo   |
| $E_c$      | energia específica mínima  |
| $S_o$      | declividade do canal   |



## SUMÁRIO

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b>                | <b>19</b>  |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                 | <b>21</b>  |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                     | <b>23</b>  |
| 3.1      | CICLO HIDROLÓGICO                                | 23         |
| 3.2      | PERFIS DE VELOCIDADE NOS CORPOS D'ÁGUA           | 23         |
| 3.2.1    | <i>Distribuição Logarítmica</i>                  | 26         |
| 3.2.2    | <i>Distribuição em Lei de Potência</i>           | 28         |
| 3.3      | QUANTIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL          | 29         |
| 3.3.1    | <i>Tubo de Pitot</i>                             | 29         |
| 3.3.2    | <i>Flutuador</i>                                 | 30         |
| 3.3.3    | <i>Molinete Hidrométrico</i>                     | 31         |
| 3.3.4    | <i>Método Químico</i>                            | 34         |
| 3.3.5    | <i>Método Acústico</i>                           | 35         |
| 3.3.6    | <i>Método Eletromagnético</i>                    | 37         |
| 3.3.7    | <i>Vertedor</i>                                  | 39         |
| 3.3.8    | <i>Calha Parshall</i>                            | 43         |
| 3.3.9    | <i>Equacionamento</i>                            | 45         |
| <b>4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>                        | <b>55</b>  |
| 4.1      | LABORATÓRIO                                      | 55         |
| 4.1.1    | <i>Canal de 0,40 metros de largura</i>           | 57         |
| 4.1.2    | <i>Canal de 0,20 metros de largura</i>           | 59         |
| 4.1.3    | <i>Isotáquias</i>                                | 60         |
| 4.1.4    | <i>Cálculo Hidráulico</i>                        | 61         |
| 4.2      | TRABALHO DE CAMPO                                | 64         |
| 4.2.1    | <i>Ribeirão da Onça</i>                          | 64         |
| 4.2.2    | <i>Estabilização da seção</i>                    | 67         |
| 4.2.3    | <i>Molinete</i>                                  | 73         |
| 4.2.4    | <i>Vertedor</i>                                  | 74         |
| 4.2.5    | <i>Equação Bueiro (linígrafo)</i>                | 79         |
| 4.2.6    | <i>Flo-Tote</i>                                  | 81         |
| 4.2.7    | <i>Aplicação do método das isotáquias</i>        | 83         |
| 4.2.8    | <i>Volume Drenado</i>                            | 83         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b>                                | <b>85</b>  |
| 5.1      | LABORATÓRIO                                      | 85         |
| 5.1.1    | <i>Vazão variável</i>                            | 87         |
| 5.1.2    | <i>Vazão constante</i>                           | 92         |
| 5.1.3    | <i>Comparativo Flo-Tote, Molinete e Vertedor</i> | 95         |
| 5.1.4    | <i>Isotáquias</i>                                | 98         |
| 5.1.5    | <i>Aplicação do método das isotáquias</i>        | 100        |
| 5.2      | RIBEIRÃO DA ONÇA                                 | 103        |
| 5.2.1    | <i>Molinete</i>                                  | 103        |
| 5.2.2    | <i>Vertedor</i>                                  | 105        |
| 5.2.3    | <i>Equações teóricas</i>                         | 106        |
| 5.2.4    | <i>Flo-Tote3</i>                                 | 114        |
| 5.2.5    | <i>Método das isotáquias</i>                     | 117        |
| 5.2.6    | <i>Aplicações</i>                                | 119        |
| 5.2.7    | <i>Volume Drenado</i>                            | 142        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                | <b>145</b> |
| 6.1      | CONCLUSÕES                                       | 145        |
| 6.2      | RECOMENDAÇÕES                                    | 147        |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                | <b>149</b> |



## 1 Introdução e Justificativa

A água doce é vastamente aproveitada como recurso essencial no uso doméstico, industrial e para irrigação. Dentre todo o volume de água presente na Terra, apenas 2,5% é relativo à água doce e apenas 0,006% do total corresponde aos rios. Como o consumo global de água dobra a cada 20 anos, mais de duas vezes a taxa de crescimento da população e com o aumento das taxas de poluição e a sobre-exploração, tem-se reduzido a disponibilidade de água em muitas regiões do mundo (Borghetti *et al.*, 2004). Com o exposto, observa-se a importância do gerenciamento dos recursos hídricos.

Com o objetivo de estudar as variáveis hídricas para aquíferos, a partir de 2004 o grupo de estudos do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) estuda a recarga hidráulica do Aquífero Guarani, na Bacia Piloto do Ribeirão da Onça, área de afloramento do aquífero.

Barreto (2006) iniciou os estudos com a instrumentação da bacia em 2004, com reativações e construções de poços para estimar a recarga direta e a recarga profunda do Aquífero Guarani, através do método de balanço hídrico.

Posteriormente, Gomes (2008) estudou a recarga profunda do Aquífero Guarani, estimando o valor médio do rendimento específico ( $S_y$ ) e aplicando o balanço hídrico na Bacia do Ribeirão da Onça.

Entretanto, para os estudos citados acima, a qualidade dos dados de escoamento superficial não foram satisfatórios, devido à mudança do leito do rio e da influência de um sistema de bombeamento a jusante das medições de vazão.

Para sanar a deficiência de dados de escoamento superficial, este trabalho propôs a construção de uma seção de controle de vazão e uma análise dos métodos de estimativa de vazão com equipamentos de baixo custo, para o monitoramento contínuo do escoamento superficial da Bacia do Ribeirão da Onça.



## 2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é quantificar o escoamento superficial com confiabilidade na Bacia do Ribeirão da Onça.

Como objetivos específicos a serem atingidos no desenvolvimento da pesquisa são listados as seguintes atividades:

- 1) Instalar seção de medição de vazão, na Bacia do Ribeirão da Onça;
- 2) Comparar técnicas de quantificação do escoamento superficial: linígrafo, molinete, vertedor, bueiro;
- 3) Estudar viabilidade do Flo-Tote (equipamento medidor de velocidade de baixo custo) e do método das isotáquias;
- 4) Analisar a funcionalidade do método em laboratório e na Bacia do Ribeirão da Onça.



### 3 Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Ciclo Hidrológico

É denominado Ciclo Hidrológico o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção, escoamentos superficiais e fluviais, infiltração, percolação da água no solo e nos aquíferos e suas interações (RIGHETTO, 1998). Balanços Hídricos são comumente utilizados para analisar as componentes do Ciclo Hidrológico em uma determinada bacia, Equação 1:

$$Q_e - Q_s = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

sendo:  $Q_e$  a vazão de entrada,  $Q_s$  a vazão de saída e  $V$  o volume armazenado na bacia.

Com a Equação 1 para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , tem-se:

$$\Delta V_p = \Delta V_s + \Delta V_{\text{solo}} + \Delta V_Q + \Delta V_E + \Delta V_{\text{ET}} \quad (2)$$

sendo,  $\Delta V_p$  o volume precipitado,  $\Delta V_s$  o volume armazenado na superfície,  $\Delta V_{\text{solo}}$  o volume armazenado no solo,  $\Delta V_Q$  o volume escoado superficialmente,  $\Delta V_E$  o volume percolado e  $\Delta V_{\text{ET}}$  o volume evapotranspirado (RIGHETTO, 1998).

O volume percolado alcança o aquífero, adicionando-lhe um volume de água, sendo o principal responsável pela recarga de aquíferos (VRIES e SIMMERS, 2002).

#### 3.2 Perfis de velocidade nos corpos d'água

Segundo Silva *et al.* (2007), do ponto de vista da Hidráulica Fluvial, os rios e canais podem ser definidos como cursos d'água, com superfície livre, advindos de precipitações ou da contribuição de águas subterrâneas. O escoamento é composto basicamente por uma fase

liquida e uma fase sólida, que interagem devido a processos de erosão, transporte e sedimentação.

A propriedade geométrica mais utilizada como referência de um curso d'água é a sua seção transversal. Esta seção é definida como a intersecção do curso d'água com um plano perpendicular à direção principal do escoamento (SILVA *et al.*, 2007).

A variação das velocidades pontuais em uma seção transversal ocorre pela ação das tensões tangenciais no leito e pela ação das tensões internas na massa do fluido, que por atrito viscoso, diminuem a velocidade do escoamento. Segundo Chow (1959), a distribuição de velocidades em uma seção transversal de um canal depende do formato da seção, da rugosidade e da presença de curvas.

Assim, estas distribuições de velocidades, podem ser expressas segundo a Equação (SILVA *et al.*, 2007):

$$V = v(y)I_y + v(s)I_s \quad (3)$$

em que  $y$  e  $s$  indicam a direção vertical e transversal do escoamento e  $I_y$  e  $I_s$  são vetores unitários nas mesmas direções.

Segundo Schlichting<sup>1</sup> (1955 *apud* SILVA *et al.*, 2007), a camada limite é definida como a região do escoamento, na qual a velocidade varia desde o valor nulo no leito até aquele valor correspondente ao escoamento externo sem atrito, ou seja, onde a ação do leito é desprezível. No caso de escoamentos com superfície livre, esta camada limite ocupa toda a profundidade do canal e define três regiões com diferentes distribuições de velocidades (Figura 1), (SILVA *et al.*, 2007).

---

<sup>1</sup> Schlichting, H. (1955) Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York.

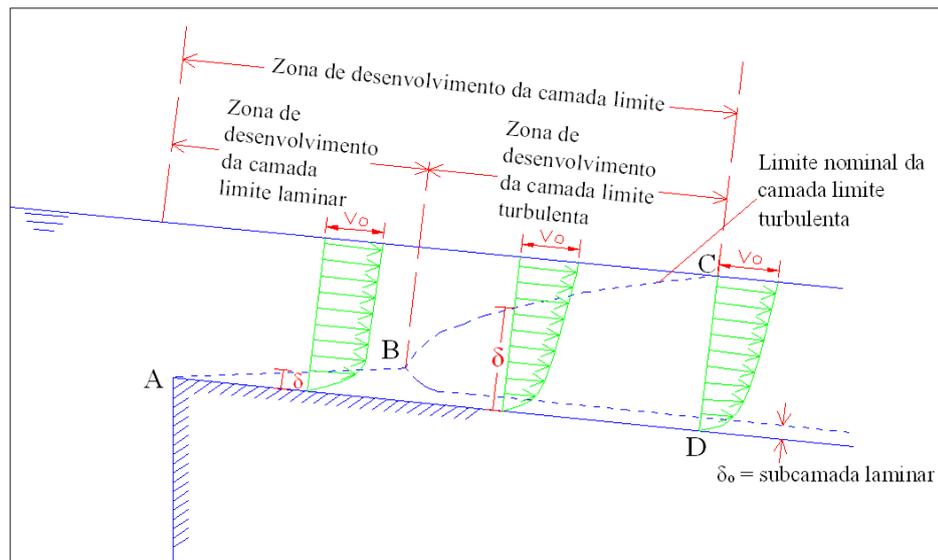


Figura 1. Desenvolvimento da camada limite para um canal alimentado por um reservatório.

Fonte: Modificado de Chow (1959)

Neste canal, o efeito da distribuição das velocidades devido à rugosidade do contorno é indicado pela linha ABC. A região abaixo da linha ABC é chamada camada limite ( $\delta$ ) e é dividida em: subcamada laminar ( $\delta_0$ ), região inferior próxima ao leito onde os efeitos viscosos são preponderantes, cujo perfil de velocidades na direção principal do escoamento é praticamente linear (PORTO, 2003); região de transição, onde há efeitos viscosos e turbulentos e região superior, onde o escoamento é totalmente turbulento, embora ainda possam existir efeitos do atrito viscoso (SILVA *et al.*, 2007).

A Figura 2 ilustra as regiões da camada limite ( $\delta$ ) mais detalhadamente:

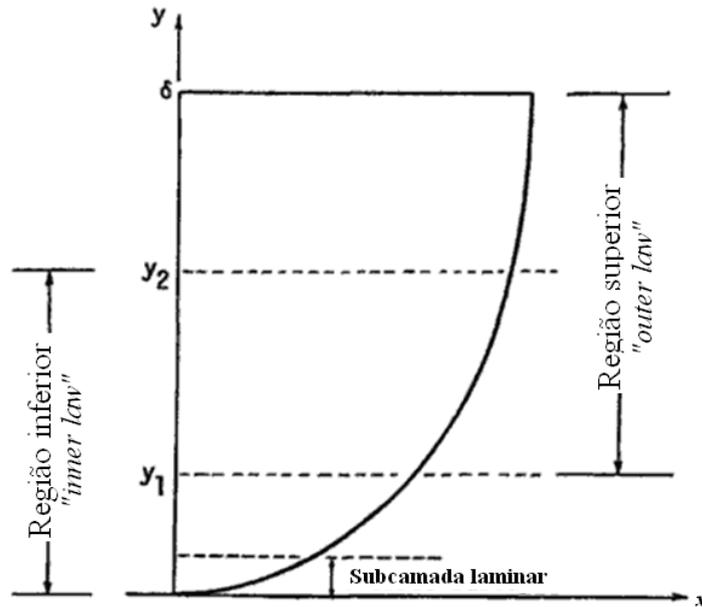


Figura 2. Regiões da camada limite. Fonte: Modificado de Yen (1991)

Para escoamentos turbulentos e para a interseção entre as regiões inferiores e superiores, descritas pelas “*inner and outer laws*”, a distribuição das velocidades pode seguir a Lei de Potência e Logarítmica (YEN, 2002).

### 3.2.1 Distribuição Logarítmica

Segundo Prandtl<sup>2</sup> (1926 *apud* CHOW, 1959), a tensão de cisalhamento,  $\tau$  (N.m<sup>2</sup>), para qualquer ponto de um escoamento turbulento é dada pela Equação:

$$\tau = \rho l^2 \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (4)$$

sendo  $\rho$  a massa específica (kg.m<sup>-3</sup>),  $l$  o comprimento de mistura (m),  $dv/dy$  o gradiente de velocidade a uma distância normal  $y$  (m) da superfície do leito.

Para a região próxima ao contorno da seção, Prandtl propôs que o comprimento de mistura,  $l$ , fosse proporcional à lâmina  $y$ , multiplicada por um coeficiente  $k$  e que a tensão tangencial permanecesse constante na vertical, mantendo-se igual à tensão junto ao leito (CHOW, 1959).

<sup>2</sup> Prandtl, L.: Über die ausgebildete Turbulenz (On fully developed turbulence), Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress of Applied Mechanics, Zürich, pp.62-74, 1926.

A constante  $k$  é uma constante adimensional universal e foi introduzida por von Karman (1910). Seu valor, encontrado a partir de medições efetuadas em laboratório por Nikuradse, foi 0,4 para água limpa e este valor é utilizado com frequência para escoamentos turbulentos (SILVA *et al.*, 2007, PORTO, 2003).

Integrando a Equação 4, considerando a velocidade de atrito ( $u_*$ ) como  $\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$ , obtém-se a Equação 5, equação da distribuição logarítmica de velocidades:

$$v_{(y)} = \frac{u_*}{k} \ln(y) + C \quad (5)$$

sendo  $C$  a constante da integração e  $u_*$  a velocidade de atrito ( $m.s^{-1}$ ).

Para obter o valor da constante  $C$  da integração, admite-se teoricamente que na Eq. 5 a velocidade máxima ocorra na superfície livre,  $y = h$  (m). Subtraindo a equação de velocidade máxima da Eq. 5 obtém-se a equação universal de distribuição de velocidades:

$$\frac{v_{(y)} - v_{\max}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{h} \quad (6)$$

sendo  $v_{(y)}$  a velocidade ( $m.s^{-1}$ ) no ponto  $y$  (m),  $v_{\max}$  a velocidade máxima da seção e  $u_*$  a velocidade de atrito ( $m.s^{-1}$ ).

Nikuradse, em 1933, realizou vários experimentos em laboratório utilizando tubulações circulares de diferentes dimensões, nas quais grãos de areia com diâmetros uniformes foram colados na parede. Nestes experimentos, supôs-se que a rugosidade fosse função unicamente do material do leito. O limite inferior de integração da Eq. 5 pode ser definido como proporcional a  $k_s$ , altura de rugosidade ou rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ), resultando em (CHOW, 1959); (SILVA *et al.*, 2007):

$$v(y) = 5,75.u_* \cdot \log\left(\frac{30,1.y}{k_s}\right) \quad (7)$$

Segundo Silva *et al.* (2007), a Equação 7 constitui-se na equação mais empregada até o presente para o ajuste da distribuição de velocidades nos modelos de qualidade d'água e transporte de sedimentos.

### 3.2.2 Distribuição em Lei de Potência

A distribuição das velocidades segundo a Lei de Potência, para canais abertos, pode ser representada como (CHEN, 1991); (CHENG, 2007):

$$\frac{v}{v_{\max}} = a \left( \frac{y}{h} \right)^{1/m} \quad (8)$$

em que:

$v$  é a velocidade local ( $\text{m.s}^{-1}$ ) para uma distância  $y$  (m) do fundo do canal;

$v_{\max}$  é a máxima velocidade da seção transversal ( $\text{m.s}^{-1}$ );

$y$  é a distância normal (m);

$h$  é a lâmina d'água (m);

$m$  é o expoente que varia entre 4 e 12, dependendo da intensidade da turbulência.

$a$  é uma constante que varia com o número de Reynolds para escoamento turbulento hidraulicamente liso ou com a rugosidade relativa,  $k_s/R_h$ , sendo  $k_s$  a altura de rugosidade e  $R_h$  o raio hidráulico, para escoamento turbulento hidraulicamente rugoso (CHEN, 1991).

Se a Lei da Potência é aplicada próxima à região de fundo, então  $u_{\max}$  pode ser substituído pela velocidade de atrito  $u_*$  e a lâmina d'água  $h$  deve ser substituída por  $\frac{\nu}{u_*}$ , sendo  $\nu$  a viscosidade cinemática para leitos lisos ou pela altura de rugosidade  $k_s$  para leitos rugosos (CHENG, 2007).

Segundo Chen (1991), o expoente  $1/m$  da Lei da Potência não deve ser maior que  $1/7$  para escoamentos turbulentos lisos, nas quais há a influência da viscosidade. Quanto maior o valor de  $1/m$ , maior o erro da Lei da Potência, comparado com a Lei Logarítmica.

A Lei da Potência possui a desvantagem de ser válida apenas para os trechos para os quais os parâmetros foram ajustados, enquanto a Lei Logarítmica pode ser extrapolada para profundidades superiores àsquelas testadas em laboratório (SILVA *et al.*, 2007).

### 3.3 Quantificação do escoamento superficial

Para o monitoramento hidrológico, vários métodos para a determinação do escoamento estão disponíveis na literatura. Segundo Santos *et al.* (2001), estes métodos baseiam-se em uma série de grandezas características, como:

- grandezas geométricas da seção (área, perímetro molhado, raio hidráulico, largura, profundidade média, profundidade máxima, cota linimétrica, distância entre Ponto Inicial (PI) e Ponto Final (PF), distância entre duas verticais, área entre duas verticais, etc.); e

- grandezas referentes ao escoamento (velocidade média na seção, vazão total da seção, vazão em um segmento da seção, velocidade em um ponto na vertical, velocidade na superfície, velocidade no fundo, velocidade média na vertical, vazão unitária, etc.).

Segundo Paiva e Paiva (2003), os métodos podem ser classificados em não-estruturais e estruturais.

## MÉTODOS NÃO-ESTRUTURAIS

### 3.3.1 Tubo de Pitot

O primeiro instrumento para medir velocidade de líquidos foi o tubo de Pitot, proposto por Henri Pitot, em 1732. O tubo era composto de um tubo de vidro curvado em ângulo reto, cujo ramal vertical era mantido fora d'água, enquanto o ramal horizontal era colocado dentro da corrente d'água. A velocidade ( $v$ ) do escoamento é calculada pela medição da pressão diferencial  $\Delta h$  (Equação 9). Na Figura 3, caso (a), a pressão diferencial  $\Delta h$  é medida entre o nível do rio e o nível no tubo de vidro. No caso (b), um tubo de referência ajuda a execução da leitura. O bulbo P serve para diminuir a pressão em ambos os ramais do tubo em U invertido, elevando o nível nos mesmos tubos (DELMEÉ, 1982).

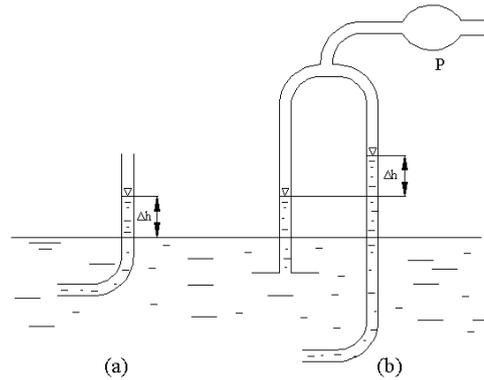


Figura 3. Tubo de Pitot. Fonte: Delmeé (1982)

$$v = C_F \sqrt{2g\Delta h} \quad (9)$$

sendo  $C_F$  um coeficiente de pressão.

A velocidade multiplicada pela área da seção correspondente resulta na vazão que se pretendia estimar (AZEVEDO NETTO e VILLELA, 1970). O tubo de Pitot não tem sido adotado a baixas velocidades por causa das variações do coeficiente de pressão,  $C_F$ , a números de Reynolds menores que 100, e da influência do formato do início do tubo no escoamento (BOETCHER e SPARROW, 2007).

### 3.3.2 Flutuador

O flutuador é um método de baixo custo para estimativa de vazão, que consiste em determinar a velocidade de deslocamento de um objeto flutuante, medindo o tempo necessário para que o flutuador se desloque em um trecho de rio, de comprimento conhecido. O flutuador é utilizado na ausência de equipamentos de medição de vazão mais preciso ou quando a vazão do rio é muito alta, o que pode colocar em risco a vida dos hidrometrístas (SANTOS *et al.*, 2001). Os flutuadores são divididos em:

- simples ou superficiais: medem a velocidade na superfície da corrente,  $v_{med} = 0,80$  a  $0,90$  de  $v_{sup}$ . Entretanto, são muito influenciados pelo vento, correntes secundárias e ondas;

- duplos ou sub-superficiais, flutuador na superfície ligado, por um cordel, a um corpo submerso, situado a cerca de seis décimos da profundidade;

- bastões flutuantes ou flutuadores lastrados. São tubos metálicos ocos ou de madeira, acoplados a um lastro de chumbo em sua parte inferior, de modo que seu comprimento  $L$  seja de aproximadamente  $0,85 h$ , sendo  $h$  a profundidade do canal (AZEVEDO NETTO e VILLELA, 1970).

Para estimar a vazão com flutuadores, é necessário a existência de um trecho retilíneo do curso d'água de seção regular. Além disso, são utilizados vários flutuadores, distribuídos pela seção transversal, sendo que a vazão é o resultado do somatório do produto das velocidades de cada flutuador pela sua área transversal correspondente (AZEVEDO NETTO e VILLELA, 1970).

### 3.3.3 Molinete Hidrométrico

O método mais convencional para estimativa de vazão baseia-se em medições de velocidades em vários pontos da seção transversal de um corpo d'água com o molinete hidrométrico. Para medir velocidades, o equipamento é dotado de um hélice e um conta-giros (Figura 4). Para cada revolução do hélice do molinete, um impulso é transmitido, acionando o contador de impulsos (eletromecânico ou eletrônico), acoplado a um cronômetro de contagem regressiva. Após um tempo pré-determinado, o cronômetro regressivo atinge o zero e o contador para, indicando o número de rotações do molinete no período. Estas rotações estão relacionadas de acordo com uma curva de calibração, expressa geralmente pela equação:

$$v = e.N + f \quad (10)$$

sendo  $v$  a velocidade no ponto da seção,  $e$  e  $f$  constantes características do aparelho e  $N$  o número de rotações (SANTOS *et al.*, 2001).



Figura 4. Molinete hidrométrico

Além da determinação das velocidades para estimar a vazão, determina-se a largura do rio e as profundidades ao longo da seção, chamadas de verticais, para o cálculo da área da seção. As Tabelas 1 e 2 apresentam expressões e parâmetros práticos para a determinação da velocidade média em uma vertical e as distâncias mínimas entre as verticais, respectivamente (SANTOS *et al.*, 2001).

Tabela 1. Parâmetros para o cálculo da velocidade média na vertical

| Nº. pontos | Posição na vertical em relação à profundidade (a partir da superfície) <sup>(*)</sup> | Cálculo da velocidade média ( $v_m$ ), na vertical                       | Profundidade (m) |
|------------|---|--|------------------|
| 1          | 0,6h  | $v_m = v_{0,6}$  | 0,15 - 0,6       |
| 2          | 0,2h e 0,8h   | $v_m = (v_{0,2} + v_{0,8})/2$  | 0,6 - 1,2        |
| 3          | 0,2h; 0,6h; 0,8h  | $v_m = (v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8})/4$                                 | 1,2 - 2,0        |
| 4          | 0,2h; 0,4h; 0,6h; 0,8h  | $v_m = (v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + v_{0,8})/6$                      | 2,0 - 4,0        |
| 6          | S; 0,2h; 0,4h; 0,6h; 0,8h; F  | $v_m = (v_S + 2 \cdot (v_{0,2} + v_{0,4} + v_{0,6} + v_{0,8}) + v_F)/10$ | > 4,0            |

<sup>(\*)</sup> S = superfície, F = Fundo

Tabela 2. Distância recomendada entre as verticais

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

Segundo Walker (1988), geralmente a vazão é calculada a partir de medições das velocidades nos pontos referentes a 20 e 80% da lâmina d'água ou no ponto a 60% da lâmina d'água. Para as medições de velocidades a partir de dois pontos na vertical de uma seção transversal, outras combinações podem ser feitas além de 20 e 80% da profundidade total, cujos resultados são satisfatórios, com uma discrepância de 1 a 2% (WALKER, 1988).

Para a determinação da vazão, são utilizados os métodos da seção média e da meia seção. Os passos para estes métodos estão representados na Tabela 3, baseados na Figura 5.

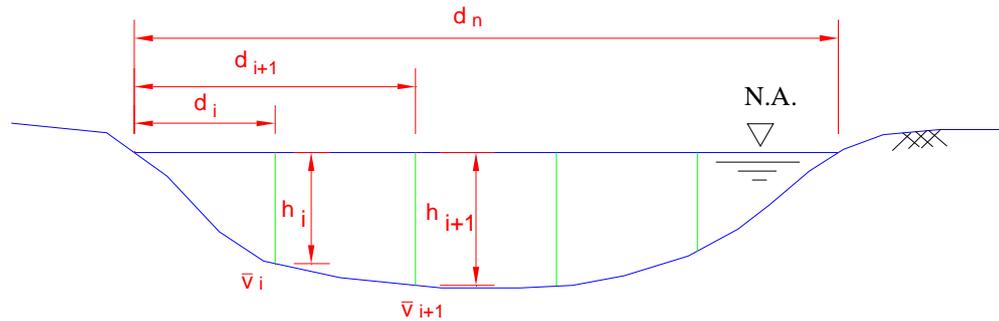


Figura 5. Desenho esquemático de decomposição da seção transversal de um curso de água para o cálculo de vazão, a partir de medição com molinete hidrométrico. (Modificado de Barreto, 2006)

Tabela 3. Passos para o cálculo da vazão, com o método de seção média e meia seção

| Método da Seção Média  | Método da Meia Seção                |
|--|-------------------------------------|
| 1. Cálculo das velocidades médias em cada segmento de área ( $\bar{v}_i^s$ ) |                                     |
| $\bar{v}_i^s = \left( \frac{\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1}}{2} \right)$           | $\bar{v}_i^s = \bar{v}_i$           |
| 2. Cálculo da largura de cada segmento de área ( $L_i$ )                     |                                     |
| $L_i = d_i - d_{i-1}$  | $L_i = \frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2}$ |
| 3. Cálculo das áreas de cada segmento ( $A_i$ )                              |                                     |
| $A_i = L_i \frac{(h_{i-1} + h_i)}{2}$  | $A_i = L_i h_i$                     |
| 4. Cálculo das vazões de cada segmento                                       |                                     |
|  | $Q_i = \bar{v}_i^s A_i$             |
| 5. Cálculo da vazão total  |                                     |
|  | $Q = \sum_i Q_i$                    |
| 6. Cálculo da área total   |                                     |
|  | $A = \sum_i A_i$                    |
| 7. Cálculo da velocidade média   |                                     |
|  | $\bar{v} = \frac{Q}{A}$             |

Fonte: Paiva e Paiva (2003)

O método da seção média utiliza a média das velocidades entre 2 verticais adjacentes e a área resultante da multiplicação da largura entre as 2 verticais com a média das

profundidades das mesmas verticais. O método da meia seção utiliza a velocidade medida na vertical e a área resultante da multiplicação da profundidade da vertical com a média das larguras entre as verticais adjacentes. Multiplicando a velocidade média pela área correspondente a cada subtrecho, determina-se a vazão parcial. Finalmente, somando as vazões parciais, determina-se a vazão total.

Assim, relacionando as rotações do hélice do molinete com velocidades pontuais e aplicando o método da seção média ou meia seção, obtém-se a vazão do escoamento.

### 3.3.4 Método Químico

Para velocidades d'água muito altas ou escoamentos muito turbulentos, para um leito irregular, como nos rios de montanhas, tem-se a possibilidade de medir a vazão utilizando a diferença de concentração de um traçador, chamado método químico.

Basicamente, existem dois modos de realizar a estimativa de vazão com o método químico: método de injeção contínua ou com o método da integração.

No primeiro modo, injeta-se um traçador químico, com vazão constante e concentração conhecida, e retira-se uma amostra a jusante do ponto da injeção, para a determinação da concentração do traçador. Dividindo-se a concentração da amostra coletada a jusante do ponto da injeção, pela concentração da amostra injetada e multiplicada pela vazão da injeção do traçador, determina-se a vazão do escoamento:

$$Q = q \cdot \frac{C}{c} \quad (11)$$

sendo  $q$  a vazão da injeção do traçador ( $\text{l.s}^{-1}$ );  $c$  a concentração inicial do traçador ( $\text{g.l}^{-1}$ );  $C$  a concentração das amostras depois da diluição no rio ( $\text{mg.l}^{-1}$ );  $Q$  a vazão do rio ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) (Santos *et al* 2001; Chevallier, P. In TUCCI, 2002).

Para o método químico, alguns cuidados devem ser tomados, como:

- o traçador não deve reagir quimicamente com a água ou com substâncias contidas na água e no leito;

- o produto não pode ser tóxico, corrosivo e deve ser facilmente solúvel;

Os produtos mais utilizados para este método são o bicromato de sódio e a rodamina (SANTOS *et al.*, 2001); (CHEVALLIER, P. In TUCCI, 2002).

Segundo Santos *et al.* (2001), diversos trabalhos indicaram que o erro na medição de vazão pelo método químico está na faixa de 1% a 7%, em comparação com molinetes.

O segundo método químico, método de integração, consiste em verter um volume conhecido de solução no rio e coletar amostras a jusante, durante todo o período de passagem da solução diluída. Assim:

$$Q = \frac{V \cdot C_s}{\int_0^T C_r dt} \quad (12)$$

sendo, Q a vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); V o volume de solução despejado (l);  $C_s$  a concentração da solução ( $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ );  $C_r$  a concentração variável do traçador no rio ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) e T é o tempo.

### 3.3.5 Método Acústico

O método acústico originou-se da necessidade de medições de velocidades em correntes marítimas, onde não existiam equipamentos capazes de determinar as direções das velocidades. Com o método acústico, é possível medir velocidades a grandes profundidades, sendo uma grande vantagem comparada aos molinetes hidrométricos (medição convencional).

O método acústico baseia-se no efeito *Doppler*, descoberto por Christian Johann Doppler (1842), para o cálculo da velocidade do escoamento. O princípio Doppler relaciona a mudança de frequência de uma fonte com a velocidade relativa de uma fonte e o observador, Equação 13.

$$F_D = F_S \left( \frac{V}{C} \right) \quad (13)$$

sendo,  $F_S$  a frequência emitida pela fonte,  $F_D$  a mudança de frequência, V a velocidade relativa entre a fonte e o observador e C é a velocidade do som no meio ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

O ADCP, “*Acoustic Doppler Current Profiler*” (Figura 6) possui porcelanas piezoelétricas que emitem ondas acústicas de alta frequência, sob o nível d’água, na direção do leito do escoamento. As ondas acústicas, em contato com partículas em suspensão na massa líquida e com a superfície sólida do fundo do escoamento, sofrem reflexões e os ecos das ondas acústicas são interpretados pelo ADCP.



Figura 6. ADCP WorkHorse Rio Grande de 600 kHz, utilizado pela Itaipu Binacional

O eco das partículas é interpretado em forma de frequência (counts ou decibéis). Conhecendo-se a frequência emitida, calcula-se a mudança da frequência e, a partir do efeito Doppler, a velocidade do escoamento. Como o efeito Doppler ocorre na transmissão e na recepção do transdutor (ADCP), a Equação 13 é multiplicada por 2 (Figura 7).

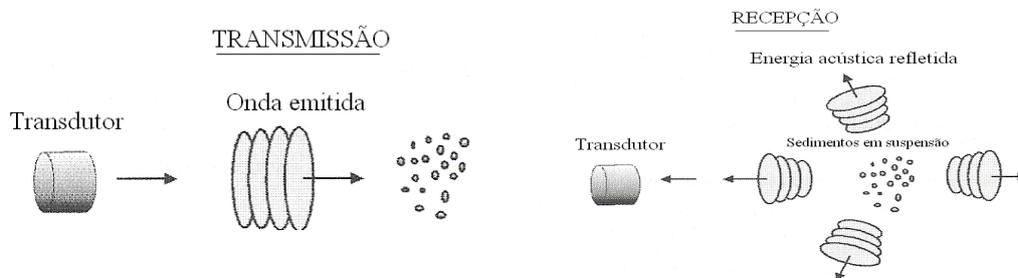


Figura 7. Esquema de transmissão e recepção de ondas acústicas pelo ADCP. Fonte: Modificado de Simpson (2001)

Além disso, a velocidade é projetada para a direção principal do escoamento, sendo  $\phi$  o ângulo entre a direção da velocidade do feixe acústico e a direção principal do escoamento.

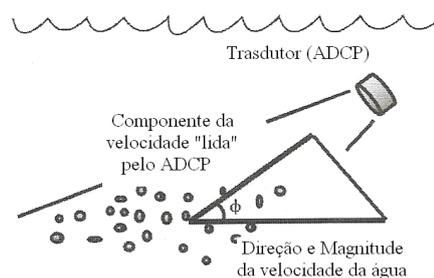


Figura 8. Componentes das velocidades. Fonte: Modificado Simpson (2001)

O método acústico pode medir três componentes de velocidade de um escoamento. Para isto, o ADCP utiliza dois pares de transdutores: por exemplo, um alinhado na direção leste-oeste e outro alinhado na direção norte-sul. Com a utilização de quatros transdutores é possível identificar erros de equipamento, processamento e não-homogeneidade do escoamento (SANTOS *et al.*, 2001).

Os equipamentos acústicos emitem ondas sonoras com frequência pré-estabelecida: de 300 a 5000 kHz. Quanto maior a frequência do equipamento, maior a capacidade de medir velocidades em pequenas profundidades.

As vantagens da tecnologia ADCP são a rapidez e precisão da medição de vazão. Para uma vertical, o equipamento é capaz de medir velocidades a cada 10 centímetros, por exemplo, em um curto período de tempo, quando comparado ao molinete hidrométrico.

Para calcular as vazões, o ADCP necessita ser deslocado, por meio de barco, por exemplo, de uma margem para a margem oposta, de uma estação fluviométrica. Cada movimento, de margem a margem, é chamado de travessia. Como o equipamento estima vazões em movimento, o ADCP mede a velocidade da água e a velocidade do barco. Para determinar a velocidade do barco, o ADCP emite ondas sonoras até o fundo do leito, e conhecendo a velocidade do som na água e a diferença de tempo do pulso sonoro emitido e refletido, determina-se a velocidade do barco. Outro método para se determinar a velocidade do barco é utilizando um Sistema de Posicionamento Global (GPS) diferencial (DGPS). O GPS transmite, em tempo real (a cada segundo), a posição do barco, por meio de satélites, e assim a velocidade do barco é determinada (Simpson, 2001).

Além do ADCP, outros equipamentos acústicos são utilizados para a medição de vazão: ADP (Acoustic Doppler Profiler), SL (Side Looking), SW (Side Wide). Os SLs e SWs são equipamentos estáticos, que são fixados nas estações fluviométricas, para a determinação de velocidades e vazão continuamente. Neste caso, não existem possíveis erros relacionados à velocidade do barco, porém como são estáticos, medem velocidades em somente uma faixa da seção transversal ao escoamento, sendo necessário calcular correlações entre as velocidades medidas pelo equipamento e as velocidades médias do escoamento (Gamaro, 2008).

### **3.3.6 Método Eletromagnético**

O método eletromagnético para estimativa de vazão baseia-se na lei de Faraday: a força eletromotriz induzida para um circuito elétrico é igual à variação do fluxo magnético conectado ao circuito. Como o fluxo d'água comporta-se como condutor, resulta na mudança do campo magnético criado por sensores. A variação do campo magnético criado pelo escoamento induz uma força eletromotriz, sendo proporcional à velocidade do fluxo d'água:

$$E = K_1 \cdot B \cdot L \cdot v \quad (14)$$

sendo E a força eletromotriz induzida,  $K_1$  uma constante, B o campo magnético, L a distância entre os sensores e v a velocidade.

Para a medição de velocidade, os equipamentos eletromagnéticos têm 2 sensores que ficam em contato com o fluxo. Como o fluxo interfere no campo magnético, são induzidas voltagens proporcionais à velocidade do fluxo e detectadas pelos sensores do equipamento (Herschy e Newman, 1974).

A princípio, o método baseia-se na correlação da velocidade medida pelo equipamento eletromagnético com a velocidade média do escoamento e na correlação da área molhada com o nível d'água. O produto da área pela velocidade média resulta em vazão (Rantz, 1982).

O método resulta em erros geralmente de 2% ou 3% na medição da velocidade devido à perda de carga causada pela intrusão do equipamento no escoamento. Assim, quanto maior a velocidade, menor a interferência do equipamento e menor o erro da medição (Rantz, 1982) (Tallaksen, L. M. e Lanen, J. van, 2004).

Segundo Rantz (1982) o equipamento eletromagnético é capaz de medir baixas velocidades, apresenta baixo custo e pode ser utilizado em escoamentos não permanentes.

O equipamento Flo-Tote3 utilizado no presente trabalho utiliza o princípio eletromagnético e foi utilizado para medições de velocidades e estimativas de vazão.

## MÉTODOS ESTRUTURAIS

Os métodos estruturais são métodos que utilizam dispositivos de geometrias simples e bem definidas, como vertedores e calhas.

### 3.3.7 Vertedor

Vertedor ou descarregador é um orifício de grandes dimensões conhecidas, sem aresta no topo, instalado perpendicularmente à corrente d'água. A presença do vertedor eleva o nível d'água a montante até atingir uma cota que produza uma lâmina sobre o obstáculo, compatível com a vazão descarregada. Os vertedores são divididos em vertedores com soleira delgada e espessa, sendo que os mais utilizados são os vertedores retangulares e triangulares de parede fina (PORTO, 2003).

Um tipo de vertedor retangular de parede fina sem contrações laterais é conhecido como *descarregador Bazin*, Figura 9 (a), composto de uma placa delgada, com soleira horizontal e biselada, instalada perpendicularmente ao escoamento, ocupando toda a largura do canal (PORTO, 2003).

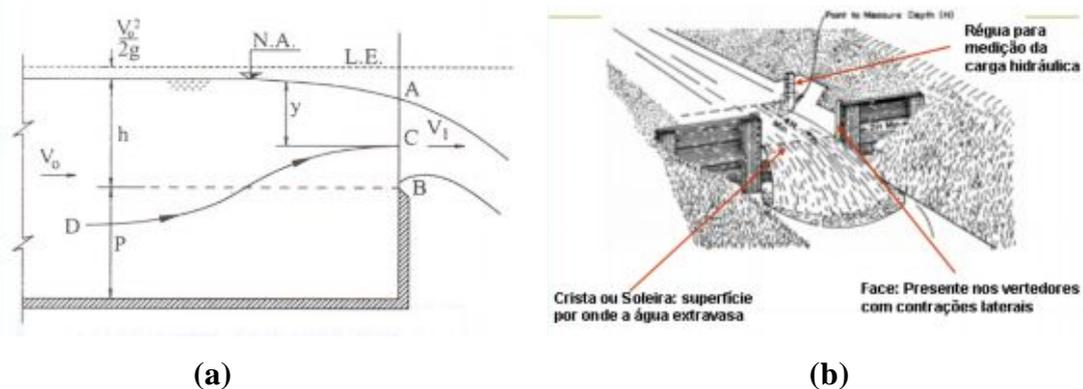


Figura 9. Escoamento sobre um vertedor retangular: (a) descarregador Bazin; (b) vertedor retangular com contrações laterais. Fontes: (a) Porto (2003), (b) [www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula\\_vertedores2.ppt](http://www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt)

Considerando que as dimensões do vertedor são fixas, a única variável a ser medida é a carga sobre a soleira,  $h$ . Assim, a vazão será dada por:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \cdot L_s \cdot h^{3/2} \quad (15)$$

sendo  $Q$  a vazão em ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $L_s$  a largura da soleira (m),  $h$  a carga sobre a soleira (m) e  $C_d$  é o coeficiente de descarga.

Os vertedores retangulares são precisos na faixa de 30 a 300  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ , e os triangulares são precisos para vazões abaixo de 30  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  e para cargas variando de 0,06 a 0,50 m. Na prática, os vertedores triangulares (Figura 10) são utilizados com ângulo de abertura  $\alpha = 90^\circ$  e as fórmulas empíricas mais utilizadas são:

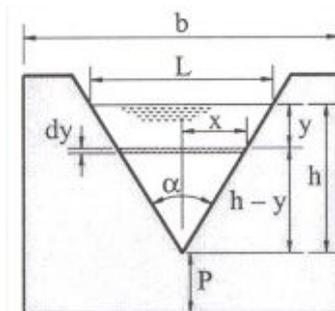
- Thomson:

$$Q = 1,40 \cdot h^{5/2} \quad (16)$$

- Gouley e Crimp

$$Q = 1,32 \cdot h^{2,48} \quad (17)$$

As Equações 16 e 17 são válidas para  $0,05 < h < 0,38$  m,  $P > 3h$ ,  $b > 6h$ .



(a)



(b)

Figura 10. Vertedor Triangular de Parede Fina. Fontes: (a) Porto (2003), (b) [www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula\\_vertedores2.ppt](http://www.cca.ufsc.br/~aaap/hidraulica/hidrometria/aula_vertedores2.ppt)

Segundo Lencastre (1996), para o cálculo da vazão para vertedores triangulares utiliza-se a fórmula de Kindsvater e Carter (1957), recomendada pela Organização Internacional de Normalização (ISO):

$$Q = \mu \frac{8}{15} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} (h + K_h)^{5/2} \quad (18)$$

em que:  $Q$  - vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\mu$  - coeficiente de vazão que corresponderia à contração completa, (Figura 11(a) (b));  $\alpha$  - ângulo de abertura;  $h$  - carga sobre a soleira (m);  $K_h$  - coeficiente que sofre influência da tensão superficial e da viscosidade (Figura 11(c)).

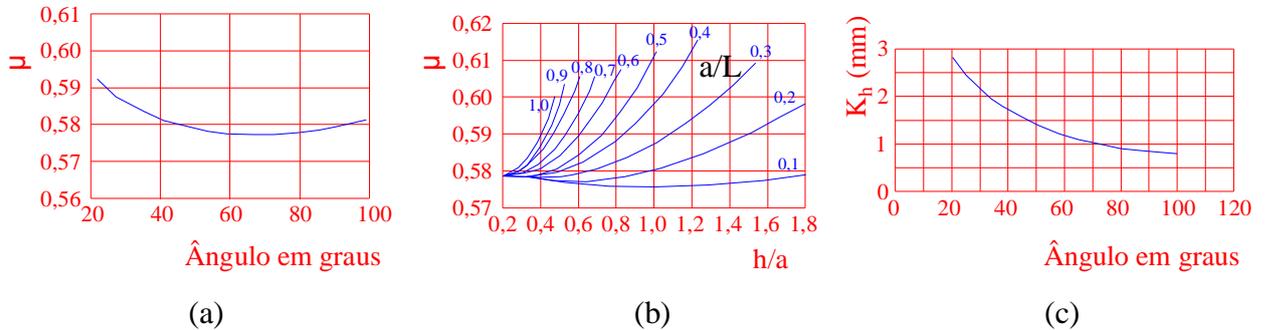


Figura 11. (a) valores de  $\mu$ , para contração completa:  $h/a < 0,4$ ,  $a/L < 0,4$  (erro de 1%); (b) valores de  $\mu$ , para contração não completa (para  $\alpha = 90^\circ$  e erro de 1% a 2%), sendo  $L$  - largura do canal e  $a$  - altura do vertedor; (c) Valores de  $K_h$

A desvantagem dos vertedores é a alteração das condições naturais do rio, que modifica a circulação natural de sedimentos, nutrientes e vida aquática. Segundo Neves<sup>3</sup> (1960 *apud* PAIVA e PAIVA, 2003) deve-se tomar alguns cuidados, como:

- o canal de aproximação ao vertedor deve ser razoavelmente retilíneo, para regularizar o movimento da água;
- a distância entre a crista do vertedor e o fundo do canal e entre a crista e os lados do canal devem ter dimensões maiores que  $2 a 3h$  e, no mínimo, 20 a 30 cm;
- a medida da carga hidráulica  $h$  deve ser realizada a uma distância mínima de  $5 h$  a montante do vertedor. A carga deve ser no mínimo de 5 cm (para evitar o gotejamento) e não ultrapassar 60 cm;
- o comprimento da soleira de ser no mínimo de  $3 h$ .

Os vertedores circulares (Figura 12) são utilizados com uma frequência menor, porém não necessitam serem nivelados para o cálculo da vazão.

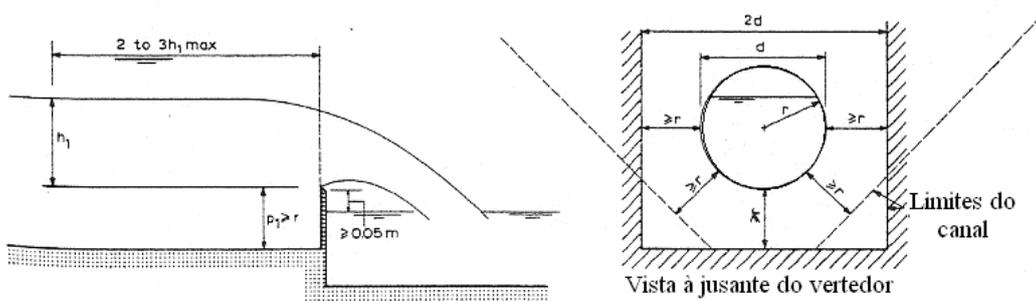


Figura 12. Dimensões para o vertedor circular. Fonte: Bos (1989)

<sup>3</sup>NEVES, E. T. Curso de Hidráulica, Editora Globo, Porto Alegre, 1960, 578 p.

O cálculo da vazão, para o vertedor circular, depende da carga sobre a soleira (h) e do diâmetro (D) (BOS, 1989):

$$Q = C_e \cdot \omega \cdot \frac{4}{15} \sqrt{2 \cdot g} \cdot D^{2,5} = C_e \cdot \phi \cdot D^{2,5} \quad (19)$$

sendo  $\omega$  uma relação da carga sobre a soleira (h) e o diâmetro do vertedor circular (D). Os valores de  $\phi$  estão representados na Tabela 4,  $C_e$  é o coeficiente de descarga, que varia com a relação h/D de acordo com a Tabela 5.

Tabela 4 – Valores de  $\omega$  e  $\phi$  em função de h/D, para vertedores circulares

| h/D   | $\omega$ | $\phi$                            | h/D   | $\omega$ | $\phi$                            | h/D   | $\omega$ | $\phi$                            |
|-------|----------|-----------------------------------|-------|----------|-----------------------------------|-------|----------|-----------------------------------|
| Adim. | Adim.    | m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> | Adim. | Adim.    | m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> | Adim. | Adim.    | m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> |
| 0,01  | 0,0004   | 0,0005                            | 0,36  | 0,3451   | 0,4076                            | 0,71  | 1,1804   | 1,3943                            |
| 0,02  | 0,0013   | 0,0015                            | 0,37  | 0,3633   | 0,4291                            | 0,72  | 1,2085   | 1,4275                            |
| 0,03  | 0,0027   | 0,0032                            | 0,38  | 0,3819   | 0,4511                            | 0,73  | 1,2368   | 1,4609                            |
| 0,04  | 0,0046   | 0,0054                            | 0,39  | 0,4009   | 0,4735                            | 0,74  | 1,2653   | 1,4946                            |
| 0,05  | 0,0071   | 0,0084                            | 0,40  | 0,4203   | 0,4965                            | 0,75  | 1,2939   | 1,5284                            |
| 0,06  | 0,0102   | 0,0120                            | 0,41  | 0,4401   | 0,5199                            | 0,76  | 1,3226   | 1,5623                            |
| 0,07  | 0,0139   | 0,0164                            | 0,42  | 0,4603   | 0,5437                            | 0,77  | 1,3514   | 1,5963                            |
| 0,08  | 0,0182   | 0,0215                            | 0,43  | 0,4809   | 0,5681                            | 0,78  | 1,3802   | 1,6303                            |
| 0,09  | 0,0231   | 0,0273                            | 0,44  | 0,5019   | 0,5929                            | 0,79  | 1,4091   | 1,6644                            |
| 0,10  | 0,0286   | 0,0338                            | 0,45  | 0,5233   | 0,6182                            | 0,80  | 1,4380   | 1,6986                            |
| 0,11  | 0,0346   | 0,0409                            | 0,46  | 0,5451   | 0,6439                            | 0,81  | 1,4670   | 1,7328                            |
| 0,12  | 0,0412   | 0,0487                            | 0,47  | 0,5672   | 0,6700                            | 0,82  | 1,4960   | 1,7671                            |
| 0,13  | 0,0483   | 0,0571                            | 0,48  | 0,5896   | 0,6965                            | 0,83  | 1,5250   | 1,8013                            |
| 0,14  | 0,0560   | 0,0661                            | 0,49  | 0,6123   | 0,7233                            | 0,84  | 1,5540   | 1,8356                            |
| 0,15  | 0,0642   | 0,0758                            | 0,50  | 0,6354   | 0,7506                            | 0,85  | 1,5830   | 1,8699                            |
| 0,16  | 0,0728   | 0,0860                            | 0,51  | 0,6588   | 0,7782                            | 0,86  | 1,6120   | 1,9041                            |
| 0,17  | 0,0819   | 0,0967                            | 0,52  | 0,6825   | 0,8062                            | 0,87  | 1,6410   | 1,9384                            |
| 0,18  | 0,0914   | 0,1080                            | 0,53  | 0,7064   | 0,8344                            | 0,88  | 1,6699   | 1,9725                            |
| 0,19  | 0,1014   | 0,1198                            | 0,54  | 0,7306   | 0,8630                            | 0,89  | 1,6988   | 2,0066                            |
| 0,20  | 0,1119   | 0,1322                            | 0,55  | 0,7551   | 0,8920                            | 0,90  | 1,7276   | 2,0407                            |
| 0,21  | 0,1229   | 0,1452                            | 0,56  | 0,7799   | 0,9212                            | 0,91  | 1,7561   | 2,0743                            |
| 0,22  | 0,1344   | 0,1588                            | 0,57  | 0,8050   | 0,9509                            | 0,92  | 1,7844   | 2,1077                            |
| 0,23  | 0,1464   | 0,1729                            | 0,58  | 0,8304   | 0,9809                            | 0,93  | 1,8125   | 2,1409                            |
| 0,24  | 0,1589   | 0,1877                            | 0,59  | 0,8560   | 1,0111                            | 0,94  | 1,8403   | 2,1738                            |
| 0,25  | 0,1719   | 0,2030                            | 0,60  | 0,8818   | 1,0416                            | 0,95  | 1,8678   | 2,2063                            |
| 0,26  | 0,1854   | 0,2190                            | 0,61  | 0,9079   | 1,0724                            | 0,96  | 1,8950   | 2,2384                            |
| 0,27  | 0,1994   | 0,2355                            | 0,62  | 0,9342   | 1,1035                            | 0,97  | 1,9219   | 2,2702                            |
| 0,28  | 0,2139   | 0,2527                            | 0,63  | 0,9608   | 1,1349                            | 0,98  | 1,9484   | 2,3015                            |
| 0,29  | 0,2289   | 0,2704                            | 0,64  | 0,9876   | 1,1666                            | 0,99  | 1,9744   | 2,3322                            |
| 0,30  | 0,2443   | 0,2886                            | 0,65  | 1,0147   | 1,1986                            | 1,00  | 2,0000   | -                                 |
| 0,31  | 0,2601   | 0,3072                            | 0,66  | 1,0420   | 1,2308                            |       |          |                                   |
| 0,32  | 0,2763   | 0,3264                            | 0,67  | 1,0694   | 1,2632                            |       |          |                                   |
| 0,33  | 0,2929   | 0,3460                            | 0,68  | 1,0969   | 1,2957                            |       |          |                                   |
| 0,34  | 0,3099   | 0,3660                            | 0,69  | 1,1246   | 1,3254                            |       |          |                                   |
| 0,35  | 0,3273   | 0,3866                            | 0,70  | 1,1524   | 1,3612                            |       |          |                                   |

Tabela 5 – Coeficiente de descarga médio para vertedores circulares

| h/D  | C <sub>e</sub> | h/D  | C <sub>e</sub> | h/D  | C <sub>e</sub> |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|
| 1,00 | 0,606          | 0,65 | 0,595          | 0,30 | 0,600          |
| 0,95 | 0,604          | 0,60 | 0,594          | 0,25 | 0,604          |
| 0,90 | 0,602          | 0,55 | 0,593          | 0,20 | 0,610          |
| 0,85 | 0,600          | 0,50 | 0,593          | 0,15 | 0,623          |
| 0,80 | 0,599          | 0,45 | 0,594          | 0,10 | 0,650          |
| 0,75 | 0,597          | 0,40 | 0,595          | 0,05 | 0,750          |
| 0,70 | 0,596          | 0,35 | 0,597          | 0    | -              |

Os limites de aplicação da Equação 19, para o cálculo de vazão em vertedores circulares, são:

- A distância entre o pé do vertedor e o leito não deve ser menor que o raio de abertura do vertedor, ou no mínimo de 0,10 m;
- A distância entre as laterais e a abertura do vertedor deve ser no mínimo o valor do raio da abertura do vertedor;
- a relação h/D deve ser igual ou maior que 0,10 m;
- o valor mínimo de h deve ser de 0,03 m;
- a distância entre o nível d'água a jusante do vertedor e o jato d'água deve ser no mínimo de 0,05 m.

### 3.3.8 Calha Parshall

Outro método estrutural para medição de vazão é realizado através de calhas, como a calha Parshall (Figura 13).

A calha Parshall, desenvolvida em 1920 por R. L. Parshall é uma das calhas de medição em regime crítico mais utilizada, sendo a profundidade crítica posicionada na seção de contração lateral e o ressalto hidráulico na seção à saída da calha (CHOW, 1959).

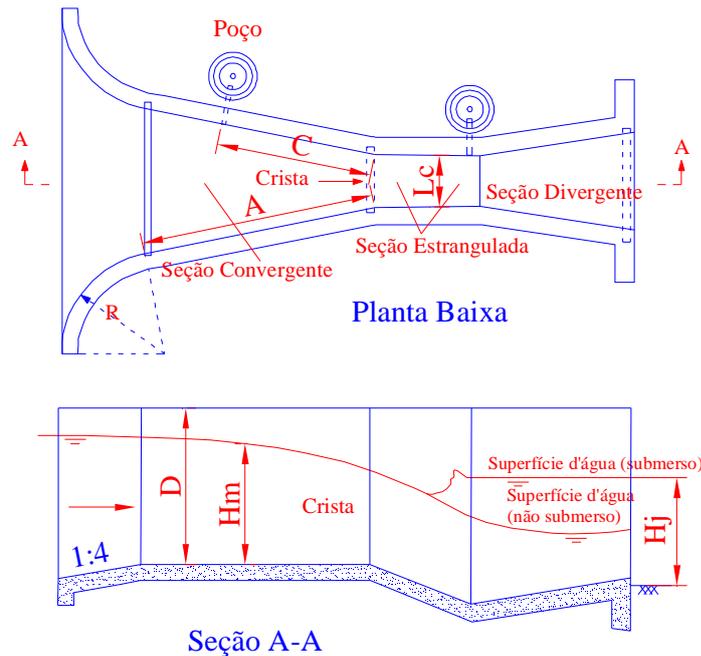


Figura 13. Calha Parshall. Modificado de Chow (1959) e Paiva e Paiva (2003)

O escoamento pode ser livre ou submerso. No primeiro caso, a descarga se faz livremente como nos vertedores, em que a veia vertente independe das condições de jusante. No segundo caso, o nível d'água a jusante é suficientemente elevado para influenciar e retardar o escoamento através do medidor. Este afogamento é causado por condições de jusante, como obstáculos e falta de declividade ou níveis obrigados em trechos ou unidades subseqüentes (AZEVEDO NETTO e VILLELA, 1970).

No caso do escoamento ser livre, a vazão dos medidores Parshall pode ser calculada aproximadamente por:

$$Q = 2,2.L_c.H_m^{3/2} \quad (20)$$

em que  $L_c$  é a largura da garganta e  $H_m$  é a altura do nível d'água medido a montante da garganta do medidor (PAIVA e PAIVA, 2003).

A relação entre  $H_j/H_m$ , expressa em porcentagem, determina a submersão ou afogamento do escoamento, sendo  $H_m$  a altura do nível d'água medido a montante da garganta do medidor e  $H_j$  o nível d'água de jusante. Quando a submersão é maior que 60% (para  $L_c$ , comprimento da largura da garganta, de até 9") ou 70% (para  $L_c$ , comprimento da largura da garganta, de 1 pé ou mais), deve-se fazer uma correção no cálculo da vazão. Para este fator de correção devem-se utilizar ábacos apresentados por Delmeé (1982) ou Paiva e Paiva (2003).

Segundo Santos *et al.* (2001), a calha Parshall apresenta como principal desvantagem o custo elevado na sua construção. Dentre as vantagens pode-se dizer que a calha Parshall não altera, significativamente, as condições naturais do rio e com uma única estrutura permite-se medir uma ampla faixa de vazões (SANTOS *et al.*, 2001).

### 3.3.9 Equacionamento

#### 3.3.9.1 Curva-chave

Curva-chave é uma relação entre valores de nível d'água e vazão. Esta equação depende de valores de vazão medido e seu nível d'água correspondente, que pode ser medida através de réguas limnimétricas ou por instrumentos de registro contínuo, como os linígrafos. As leituras em réguas são, em geral, realizadas duas vezes ao dia em horas fixas, necessitando de um operador para fazê-las (PAIVA e PAIVA, 2003).

Os linígrafos podem funcionar de duas formas:

- registro das oscilações de um flutuador, como o método de bóia e contra peso;
- registro da variação de pressão da água e do ar sobre o aparelho.

Estes aparelhos são dotados de “data loggers”, capazes de armazenar as variações dos níveis d'água. Este recurso registra milhares de medições, diminuindo os custos de campanhas e coletas de dados e tornando os dados mais completos, comparados a medidas manuais.

Para o cálculo da vazão, a partir de dados de níveis d'água, é utilizada a equação cota-descarga, ou chamada curva-chave. Para traçar uma curva-chave são necessárias medições de nível e vazão em diferentes situações, como em épocas de cheias e seca. Quanto maior o número de registros de níveis e vazões, menor a faixa de extrapolação da curva-chave (PAIVA e PAIVA, 2003).

A curva-chave de uma seção pode ser representada de três formas: a forma gráfica, a equação matemática e a tabela de calibragem. Conhecida a curva-chave, o cálculo indireto da vazão, na referida seção, é permitido a partir da leitura de uma cota num dado momento (ALMEIDA NETO, 2007).

A representação gráfica é a forma mais utilizada e mais conhecida, sendo a relação cota/vazão representada por uma curva traçada em um sistema de eixos retangulares:

- representar as cotas (h), utilizando a relação sob a forma  $h = f(Q)$ ;
- representar as descargas (Q), segundo a relação sob a forma  $Q = (h)$ .

A formulação matemática é baseada na fórmula de Manning:

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot A \quad (21)$$

De modo geral, toda relação h/Q pode ser representada, na sua totalidade ou por trechos sucessivos, pela forma exponencial, Equação 22 e pela forma polinomial, Equação 23:

$$Q = a \cdot (h - h_0)^n \quad (22)$$

$$Q = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + \dots + a_n h^n \quad (23)$$

sendo, Q a vazão ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), a e n coeficientes de ajuste para a curva chave, h (m) a cota referente a uma vazão (Q) e  $h_0$  (m) a cota referente a vazão nula.

Dentre as formas polinomiais, as mais frequentes são de segundo grau (parabólica) e terceiro grau (cúbica).

A tabela de calibragem é a forma representativa final, usual e prática da relação h/Q. Em uma tabela estão dispostas de modo crescente, as cotas e as descargas correspondentes. Dependendo da unidade utilizada para as leituras de cota, a tabela pode ser centimétrica ou milimétrica. A tabela é estabelecida a partir do gráfico que representa a curva da calibragem ou pela utilização das fórmulas matemáticas ajustadas a esta curva (Jacon e Cudo, 1989).

A primeira etapa para construir uma curva-chave é fazer sua calibração:

- calibragem unívoca: para seções estáveis (geometria regular ou irregular), com um só controle e com vários controles de vazão.
- calibragem não-unívoca: para seção ou controle instável, controle de jusante variável, declividade hidráulica diferente entre cheia e vazante e inversão da declividade hidráulica (influência de maré, declividade do leito nula, enchimentos de lagos, etc.).

A plotagem dos pontos relativos às medições de descargas líquidas é precedida de um inventário e de uma crítica dos dados, assim como, da escolha do formato do papel e das escalas gráficas. Após a análise das causas da dispersão dos pontos, a curva de calibragem é traçada por trechos, começando-se por aquele que possui maior número de medições confiáveis. Na maioria dos casos, a ausência de medições em cotas altas ou baixas, impõe uma extrapolação da curva em suas extremidades (Jacon e Cudo, 1989).

### 3.3.9.1.1 Extrapolação logarítmica

O método de extrapolação logarítmica é aplicável para as seguintes condições:

- relações unívocas de cota e vazão;
- medições existentes até uma cota suficientemente elevada para que a direção da reta seja bem definida;
- perfil transversal sem descontinuidade de forma no intervalo de cotas extrapoladas;
- controle de jusante permanente entre cotas médias e altas.

O procedimento usual consiste em plotar as medições de descarga líquidas e os valores de  $(h - h_0)$ , em papel bilogarítmico, e verificar se os pontos se alinham, segundo um ou mais segmentos de reta (Figura 14). Se houver alinhamento, o valor de  $h_0$  é nulo. Se houver curvatura, procura-se determinar o valor de  $h_0$  que retifica a curva. A determinação de  $h_0$  pode ser feita graficamente, por tentativas sucessivas e pelo processo analítico:

$$h_0 = \frac{h_1 \cdot h_2 - h_3^2}{h_1 + h_2 - 2 \cdot h_3} \quad (24)$$

Sendo,  $h_1$  e  $h_2$  as cotas de dois pontos extremos do trecho da curva, correspondentes às vazões  $Q_1$  e  $Q_2$ ;  $h_3$  a cota correspondente à descarga  $Q_3$ .

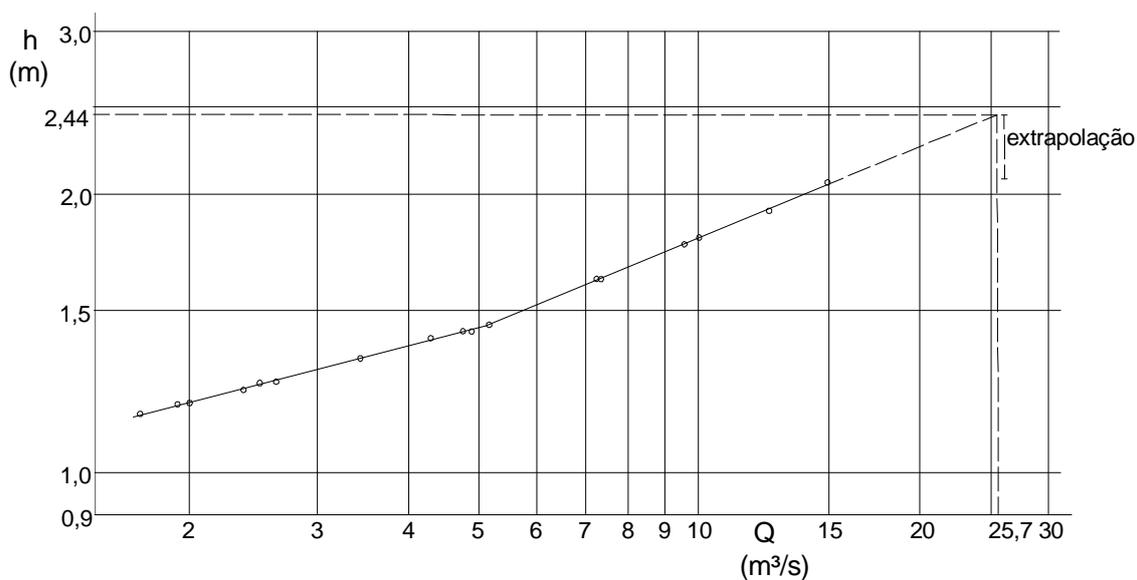


Figura 14. Extrapolação pelo método logarítmico

## 3.3.9.1.2 Método de Stevens

O método de Stevens é um método gráfico, que utiliza a fórmula de Chezy, Equação 25, para escoamentos quase uniformes em canais.

$$Q = C.A.(R_H I)^{1/2} \quad (25)$$

Os termos  $A.\sqrt{R_H}$  e  $C.\sqrt{I}$  são considerados fatores geométrico e de declividade, respectivamente.

Como a relação vazão/fator geométrico é constante, significa que a vazão é função do fator geométrico. Assim, constrói-se um gráfico com valores de  $A.\sqrt{R_H}$  na ordenada e valores de cotas e descargas nas abscissas, sobre 2 semi-eixos opostos e traçam-se as retas, a partir das medições disponíveis.

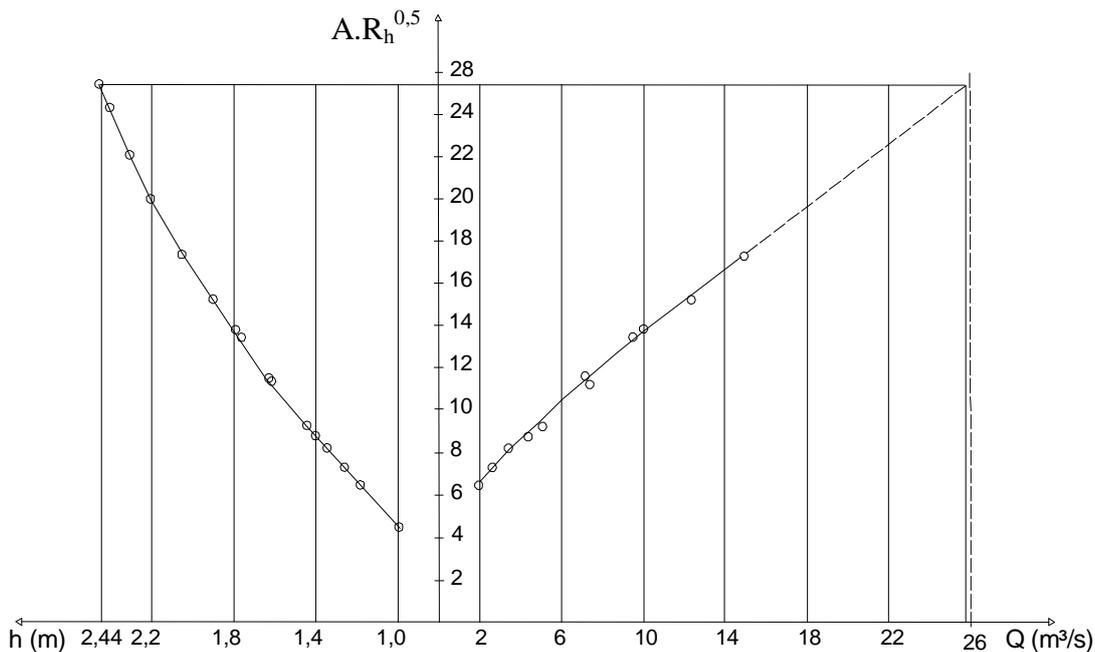


Figura 15. Extrapolação pelo método de Stevens

O método de Stevens é aplicável, se o perfil for estável (o fator geométrico não deve variar entre a cheia e a depleção), e se há um número suficiente de medições corretamente alinhadas.

### 3.3.9.1.3 Extrapolação por superfície molhada e velocidade média

A extrapolação da curva  $Q(h)$  é feita considerando a área molhada ( $A$ ) e a velocidade média do escoamento ( $v$ ), separadamente. São construídos gráficos da área molhada e da velocidade média do escoamento, em função da cota ( $h$ ). A curva  $A(h)$  é associada uma curva  $v(h)$ , traçada a partir de todas as medições ou descargas estimadas.

A velocidade média do escoamento pode ser determinada pelas medições de vazões ou pela fórmula de Manning.

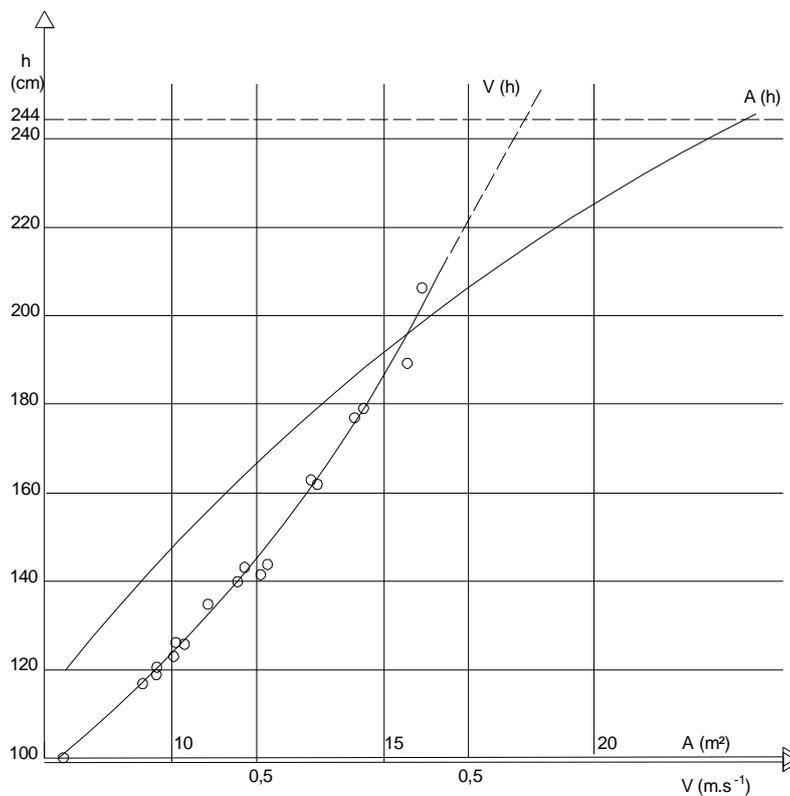


Figura 16. Extrapolação por superfície molhada

### 3.3.9.2 Metodologia das Isotáquias

A metodologia das isotáquias para a determinação da vazão envolve a analogia entre campo eletromagnético e velocidade em curso d'água. Este método baseia-se em isolinhas de velocidades padronizadas, isotáquias, de forma a obter a vazão, a partir de um único ponto de velocidade medida (Figura 17) A origem das isotáquias, linhas padrões de mesma velocidade, está relacionada à influência da rugosidade da superfície do contorno do canal para uma seção conhecida. (MAGHREBI, 2006).

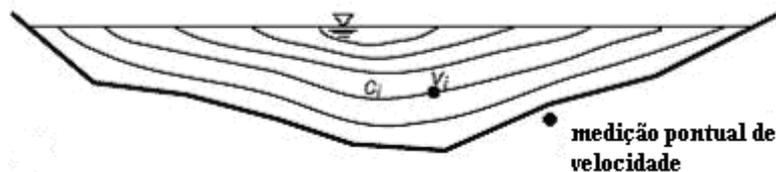


Figura 17. Isotáquias para a determinação da vazão

Este método baseia-se na lei de Biot-Savart, (TIPPLER, 1995), na qual um campo magnético em um ponto  $M$  é produzido a partir do elemento de corrente  $I.dL$ , sendo  $I$  a corrente elétrica e  $dL$  um comprimento infinitesimal (Figura 18). A intensidade do campo magnético  $dH$  é perpendicular ao elemento de corrente  $I.dL$  e é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$ , para um ponto  $M$

$$dH = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dL \cdot \hat{r}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (26)$$

$\hat{r}$  é um vetor unitário orientado para o ponto  $M$ .

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do meio

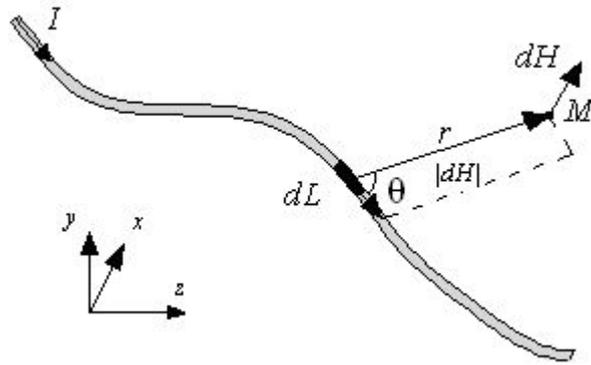


Figura 18. Ilustração do campo magnético ( $dH$ ) e elemento de corrente ( $I.dL$ )

A intensidade do campo magnético devido a um elemento de corrente elétrica e a magnitude da velocidade de uma seção transversal devido ao contorno do canal, são inversamente relacionadas. Isto ocorre porque o campo magnético aumenta com a proximidade de sua fonte, o elemento de corrente elétrica; e no caso hidráulico, quanto mais próximo da superfície de contorno do canal, menor será a velocidade do escoamento. Analogamente a Eq. 26, a influência de um comprimento infinitesimal do contorno  $ds$  na velocidade, em um ponto arbitrário é:

$$dv = f(r).c_1.ds \quad (27)$$

em que:

$dv$  é a variação de velocidade no ponto M, devido ao elemento de contorno  $ds$  (Figura 19);

$c_1$  é uma constante relativa à rugosidade da superfície de contorno do canal;

$f(r)$  é uma função da velocidade para uma distância  $r$ .

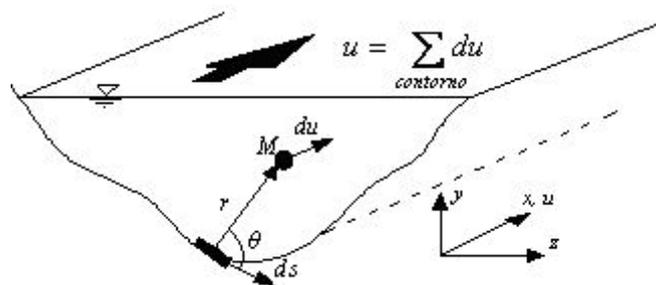


Figura 19. Efeito da rugosidade do contorno na velocidade para um ponto arbitrário M, de uma seção transversal de um rio

Para a determinação da velocidade  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), influenciada por toda a superfície de contorno, integra-se a Eq. 27 para o perímetro molhado da seção. Assim:

$$v = \int_M f(r) \cdot c_1 \cdot ds \cdot \text{sen } \theta \quad (28)$$

em que:

$\theta$  é o ângulo entre o vetor do ponto M e o vetor do elemento de contorno  $ds$ ;

P é o perímetro molhado da seção transversal.

O perfil da velocidade para um canal aberto,  $f(r)$ , varia de acordo com o tipo do escoamento: para escoamento laminar, o perfil dominante da velocidade é a distribuição parabólica, para escoamento turbulento, a Lei de Potência e logarítmica (“*Power and logarithmic laws*”) podem ser aplicadas. Maghrebi (2006) sugere a utilização da Lei de Potência (*Power Law*), Equação 8.

A Eq. 8 pode ser reescrita como:

$$f(r) = u_* (c_2 \cdot y^{1/m}) \quad (29)$$

em que:

$c_2$  é uma função da rugosidade do contorno e da natureza do escoamento;

$u_*$  é a velocidade de atrito (cisalhamento) ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

Aplicando a Eq. 29 na Eq.28, a velocidade local em um ponto de posição arbitrária,  $v(z,y)$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), é:

$$v(z,y) = \int_M c_1 \cdot c_2 \cdot \text{sen } \theta \cdot u_* \cdot (r^{1/m}) \cdot ds \quad (30)$$

A velocidade média,  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), da seção é calculada pela divisão da integração das velocidades dos pontos arbitrários,  $v(z,y)$ , para a área molhada, pela área total, conforme a seguinte expressão:

$$v = \frac{\int_A v(z,y) dA}{A} = \frac{\int_A \left( \int_M c_1 \cdot c_2 \cdot \text{sen } \theta \cdot u_* \cdot (r^{1/m}) \cdot ds \right) dA}{A} \quad (31)$$

A velocidade padronizada,  $V(z,y)$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), é dada pela relação entre as Eq.30 e Eq. 31:

$$V(z,y) = \frac{v(z,y)}{v} = \frac{\int_M c_1 \cdot c_2 \cdot \text{sen } \theta \cdot u_* \cdot (r^{1/m}) \cdot ds}{\frac{1}{A} \int_A \int_M \left( c_1 \cdot c_2 \cdot \text{sen } \theta \cdot u_* \cdot (r^{1/m}) \cdot ds \right) dA} \quad (32)$$

Assim, determinam-se várias curvas padronizadas de mesma velocidade, isotáquias, para uma seção. A partir da medição de velocidade de um ponto, determina-se a vazão do canal (MAGHREBI & RAHIMPOUR, 2006); (MAGHREBI, 2006); (MAGHREBI & BALL, 2006). Se a velocidade medida em um ponto é  $v_{med}$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e a velocidade padronizada

referente à posição do ponto medido é  $c_i$ , então a vazão total,  $Q$  ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ), para uma seção transversal de um canal de área  $A$  ( $\text{m}^2$ ), é de:

$$Q = A \left( \frac{v_{med}}{c_i} \right) \quad (33)$$

em que  $c_i = \frac{v_{med}}{v}$ , sendo  $v$  a velocidade média ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ), determinada em uma campanha de medição.



## 4 Material e Métodos

O trabalho foi dividido em duas etapas: Laboratório, para analisar o funcionamento do equipamento medidor de velocidade e dos métodos de estimativa de vazão; Ribeirão da Onça, para obter os valores do escoamento superficial na bacia.

### 4.1 Laboratório

Os experimentos foram realizados no canal do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (Figura 20). O canal apresenta trechos com seção transversal de 0,20m de largura por 0,50m de altura e com seção transversal de 0,40m de largura por 0,50m de altura.



Figura 20. (a) e (b) Canal do Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP

Para a realização dos experimentos foi utilizado o equipamento Flo-Tote 3, Figura 21 (a) e (b) e o molinete hidrométrico, para a aferição das velocidades, Figura 22 (a) e (b). O equipamento Flo-Tote 3 foi importado dos EUA e tem a capacidade de medir velocidades e nível d'água do escoamento, baseando-se na Lei de Faraday: se um condutor movimenta-se por um campo magnético, este produz uma força eletromotriz. O líquido em movimento comporta-se como um condutor e, ao atravessar um campo magnético, induz uma força

eletromotriz, o que gera uma corrente elétrica proporcional à velocidade do escoamento. O sensor do Flo-Tote3 mede a força eletromotriz, por eletrodos, e mede a pressão total, que subtraída da pressão atmosférica resulta em pressão hidrostática, transformando em lâmina d'água (Marsh McBirney Inc., 2003).



Figura 21. (a) e (b) Ilustrações do equipamento Flo-Tote 3

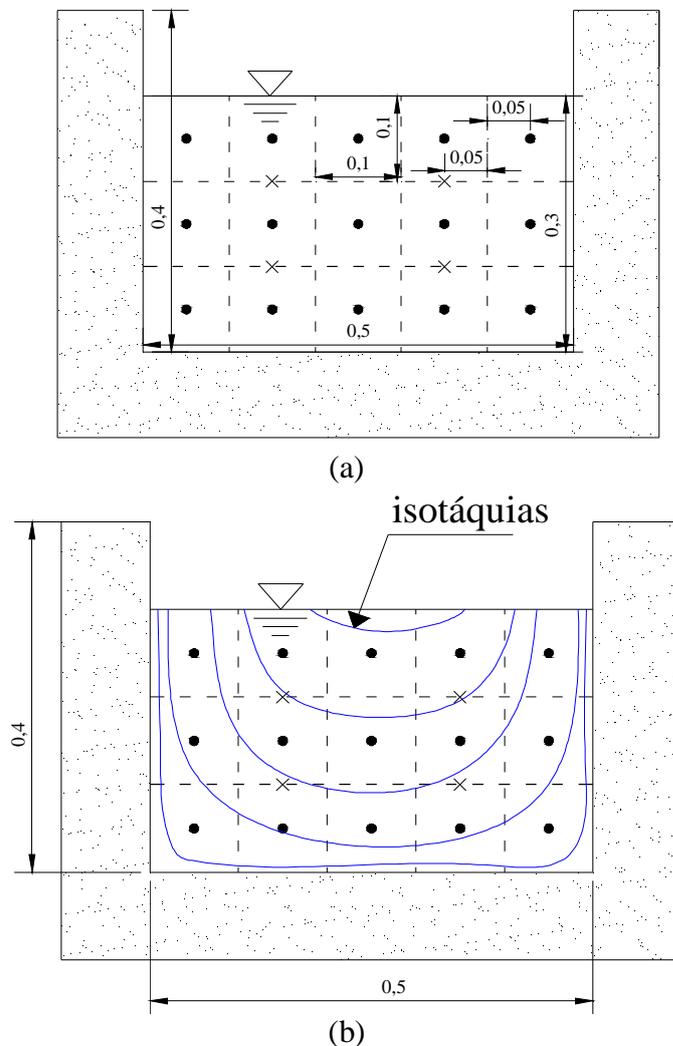


Figura 22. Croqui da seção transversal do canal do Laboratório do SHS/EESC/USP. (a) Pontos de medição de velocidade: os pontos referem-se a medições feitas pelo Flo-Tote3 e os "x" referem-se a medições feitas pelo molinete (valores em metros); (b) Detalhe das possíveis isolinhas resultantes das medições de velocidade

Como o Flo-Tote3 possui um cabo lateral, para a comunicação com o Flo-Logger (parte integrante do Flo-Tote3 que armazena os dados), os sensores aproximam-se das paredes do canal em distâncias diferentes nas laterais esquerda e direita. Assim, as verticais de medições de velocidades não foram simétricas. Foram medidas velocidades para os canais de 0,20 e 0,40 metros de largura com o auxílio do Flo-Tote3 e molinete hidrométrico.

#### 4.1.1 Canal de 0,40 metros de largura

Para as medições de velocidade com o Flo-Tote, a seção transversal do canal de 0,40 m de largura (Figura 23, 24 e 25) foi dividida em 7 verticais, sendo que as verticais 1 e 7 referem-se às paredes do canal. Para cada vertical, a cada 5 cm a partir do fundo do canal até a superfície livre, foram medidas as velocidades, para quatro vazões diferentes e, conseqüentemente, quatro relações B/H, sendo B a largura do canal (m) e H a lâmina d'água (m).

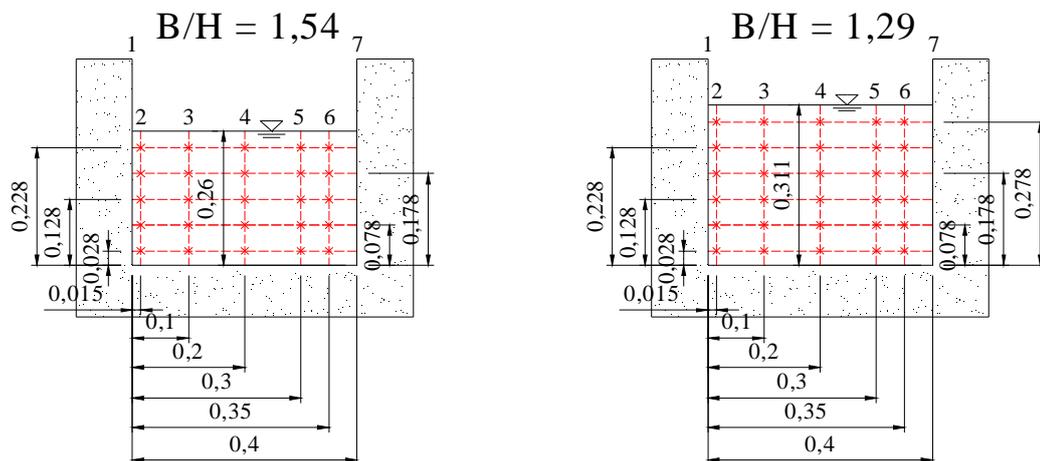


Figura 23. Pontos de medição de velocidades para o canal de 0,40m de largura, para diferentes vazões:  $B/H = 1,54$ ;  $B/H = 1,29$  (valores em metros)

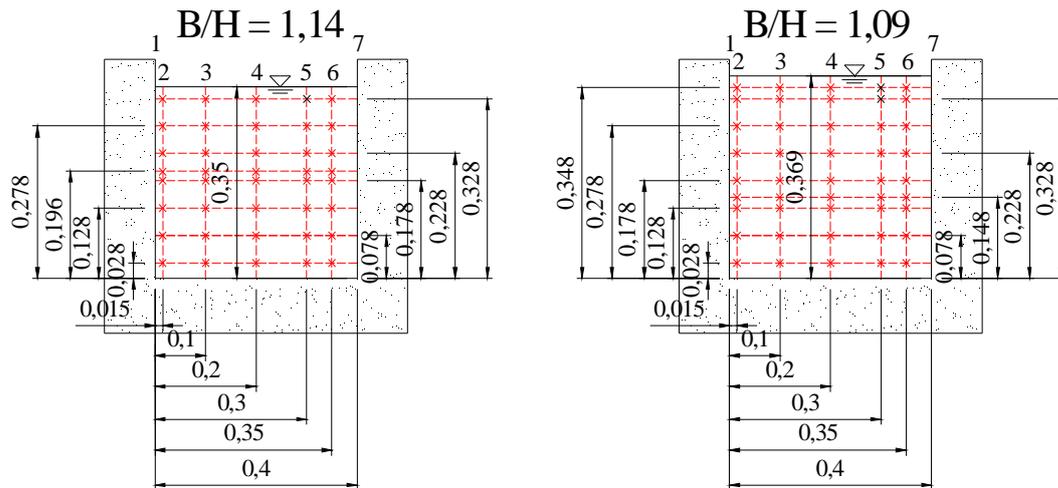


Figura 24. Pontos de medição de velocidades para o canal de 0,40m de largura, para diferentes vazões:  $B/H = 1,14$  e  $B/H = 1,09$  (valores em metros)



Figura 25. Detalhe do equipamento medindo a velocidade do escoamento no canal de 0,40m de largura

O molinete hidrométrico foi utilizado para  $B/H = 1,29$ ,  $1,14$  e  $1,09$ , sendo  $B/H = 1,54$  descartado devido a baixa lâmina d'água e velocidade. Para  $B/H = 1,14$  e  $1,29$  foram medidas as velocidades nas posições 0,15 e 0,30 metros da parede do canal e a 60% da profundidade. Para  $B/H = 1,09$  foram medidas velocidades nas posições 0,10, 0,20 e 0,30 metros da parede do canal e a 60% da profundidade. As restrições do uso do molinete hidrométrico foram causadas devido ao tamanho do hélice que gera interferência no escoamento.

#### 4.1.2 Canal de 0,20 metros de largura

Para o canal de 0,20 metros de largura, foram medidas as velocidades com o Flo-Tote, para as mesmas vazões do canal de 0,40m de largura. As medições de velocidade foram realizadas em 4 verticais na seção transversal (Figura 26). As velocidades foram medidas a cada 2,5 cm, quatro vezes menor que a distância adotada para o canal de 0,40 metros de largura, devido à menor dimensão do canal.

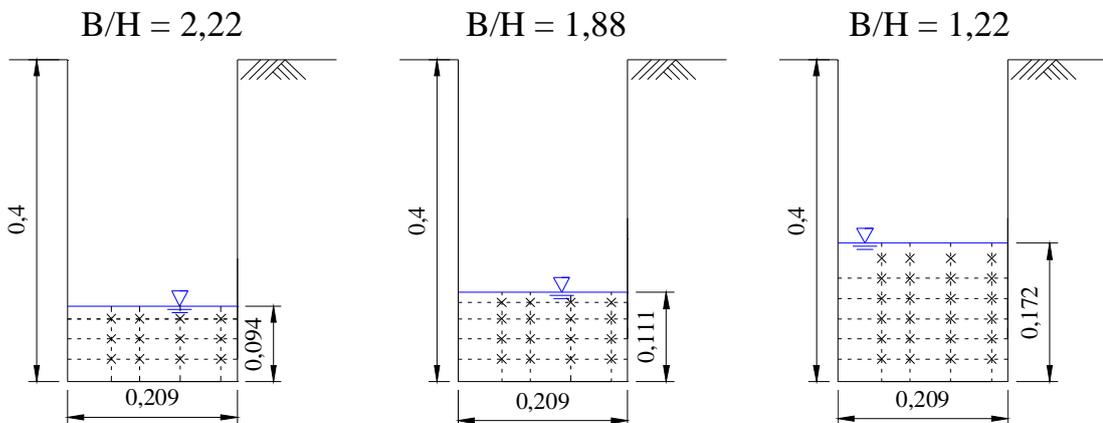


Figura 26. Pontos de medição de velocidade para o canal de 0,20m de largura, para diferentes vazões:  $B/H = 2,22$ ;  $B/H = 1,88$  e  $B/H = 1,22$  (valores em metros)

Como a jusante do canal de 0,20 m de largura existe uma comporta, variou-se a lâmina d'água para a vazão de  $13,1 \text{ l.s}^{-1}$  ( $B/H = 1,88$ ) fixa para as medições de velocidades nas proporções de  $B/H$  igual a 0,67; 1,00 e 1,25 (Figura 27).

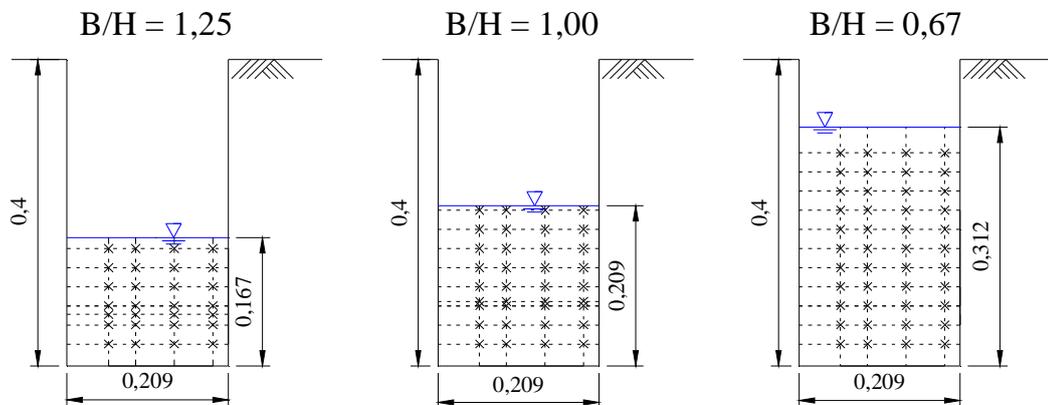


Figura 27. Pontos das medições de velocidade para o canal de 0,20m de largura, para a vazão de  $13,1 \text{ l.s}^{-1}$  e  $B/H = 1,25$ ;  $B/H = 1,00$  e  $B/H = 0,67$  controlada pela comporta a jusante: (valores em metros)

Para o canal de 0,20 metros de largura não foram realizadas medições de velocidade com o molinete hidrométrico para todas as vazões, pois o molinete é grande para o canal e gera interferências, impossibilitando a medição de velocidade. As medições com molinete somente foram possíveis para  $B/H = 1,00$  e  $0,67$ , a 7 e 12 centímetros de distância da parede do canal, e 60% da profundidade.

### 4.1.3 Isotáquias

Conhecendo-se as velocidades em cada vertical e sabendo-se que no contorno do canal a velocidade é nula, foram construídas isolinhas de velocidades (isotáquias) em função de  $B/H$ . Para esta construção, utilizou-se o software *Surfer*<sup>4</sup> para interpolar os valores de velocidade e para a visualização gráfica. Como as verticais não se situam simetricamente em relação à metade da seção transversal ao escoamento, foram efetuados os rebatimentos das velocidades nas verticais, baseado na simetria teórica das velocidades no canal. Nas isotáquias, os valores de velocidade e dimensões são adimensionais. Deste modo, a velocidade é calculada com a divisão da velocidade medida pontual com a velocidade média da seção. Para o cálculo da velocidade média foram utilizados três modos:

- vertedor: calcula-se a vazão a partir do vertedor triangular e a divide pela área molhada do canal,

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (34)$$

- 0,6.h: calcula-se a vazão como o produto das velocidades situadas a 60% da lâmina d'água para cada vertical com sua respectiva área de influência. A relação da vazão calculada com a área molhada na seção de medição resulta na velocidade média;

$$v_m = \frac{\sum v_{60\%} \cdot A_i}{A} \quad (35)$$

- discretizada: calcula-se a vazão como o produto das velocidades pontuais, de 3 a 7 pontos por vertical, com suas respectivas áreas de influência. A relação da vazão calculada com a área molhada na seção de medição resulta na velocidade média.

<sup>4</sup> Surfer Version 8.0 – Surface Mapping System, Golden Software, Inc.

$$v_m = \frac{\sum v_i \cdot A_i}{A} \quad (36)$$

Com a construção das isotáquias verifica-se o cálculo de vazão utilizando o método das Isotáquias, Equação 33.

Deste modo, foram utilizadas as velocidades medidas para  $B/H = 1,25$  nas isotáquias  $B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67$ , para o canal de 0,20 metros de largura. Para cada velocidade medida de  $B/H = 1,25$ , a vazão é calculada para cada isotáquia. Assim, são determinados os desvios de vazão, para cada ponto de medição de velocidade.

#### 4.1.4 Cálculo Hidráulico

Com as velocidades medidas pelo Flo-Tote nos canais do laboratório, são calculadas as seguintes variáveis:

- número de Reynolds ( $Re$ ):

$$Re = vR_h / \nu \quad (37)$$

em que:  $v$  - velocidade média do escoamento ( $m.s^{-1}$ );  $R_h$  - raio hidráulico do canal (m);  $\nu$  - viscosidade cinemática do fluido (água a  $20^\circ C$ ,  $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6}$  m/s). O escoamento é considerado laminar para  $Re < 500$ , turbulento para  $Re > 2000$  e de transição para  $500 < Re < 2000$ ;

- número de Froude ( $Fr$ ):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H_m}} \quad (38)$$

O escoamento é fluvial para  $Fr < 1$ , torrencial para  $Fr > 1$  e crítico para  $Fr = 1$ ;

- velocidade de atrito ( $u_*$ ), obtida em função da equação de Manning:

$$u_* = \frac{\sqrt{g \cdot v \cdot n}}{R_h^{1/6}} \quad (39)$$

em que:  $v$  - velocidade média do escoamento ( $m.s^{-1}$ );  $n$  - coeficiente de rugosidade de Manning ( $n = 0,011$  para a superfície de argamassa de cimento).

$$\text{- número de Reynolds de rugosidade} = \frac{u_* \varepsilon}{\nu} \quad (40)$$

em que:  $\varepsilon$  - rugosidade absoluta do canal (cimento novo:  $\varepsilon = 0,025$  mm).

Se o número de Reynolds de rugosidade for menor que 5, o escoamento é considerado turbulento hidraulicamente liso, para valores maiores que 70, o escoamento é considerado turbulento hidraulicamente rugoso, e turbulento hidraulicamente misto ou de transição, para valores entre 5 e 70.

Além disso, com os valores de velocidade medidos, foram determinados os perfis de velocidade, baseando-se nas leis logarítmica e potencial, para o escoamento turbulento hidraulicamente rugoso e hidraulicamente liso.

Segundo Cheng (2007), a Lei Logarítmica, para escoamento turbulento hidraulicamente liso, na região inferior do escoamento, é expressa como:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{u_* y}{\nu}\right) + B_i \quad (41)$$

em que:  $y$  - lâmina d'água (m);  $u$  - velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) na posição  $y$  (m);  $u_*$  - velocidade de atrito ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $\kappa$  - constante de Von-Karman ( $\kappa = 0,40$ );  $\nu$  - viscosidade cinemática do fluido ( $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ , para água a  $20^\circ\text{C}$ );  $B_i$  - constante de integração ( $B_i = 5$ , segundo Kundu e Cohen, 2004).

Segundo Chen (1991), Maghrebi (2006) e Cheng (2007), a distribuição de velocidade para o escoamento hidraulicamente rugoso e para a região comum à região inferior e superior da camada limite (“*overlap region*”) é dada por:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (42)$$

$$y_0 = k_s e^{-k C_i} \quad (43)$$

em que:  $k_s$  - constante de Nikuradse ( $k_s = 0,5$  mm, como valor mínimo para canais de concreto (Yen, 2002));  $C_i$  - constante de integração ( $A = 8,5$ , segundo Chen e Chiew, 2003).

A distribuição de velocidade para canais abertos segundo a Lei de Potência pode ser representada como (Chen, 1991 e Cheng, 2007):

$$\frac{u}{u_{\max}} = a \left(\frac{y}{h}\right)^{1/m} \quad (44)$$

sendo “ $a$ ” e “ $m$ ” variáveis segundo a turbulência do escoamento.

Se a Lei da Potência é aplicada próximo ao fundo,  $u_{\max}$  pode ser substituído pela velocidade de atrito  $u^*$  e a lâmina d'água  $h$  deve ser substituída por  $\frac{y}{u^*}$  para leitos lisos, ou pela altura de rugosidade  $k_s$  para leitos rugosos (Cheng, 2007).

Assim, a Equação 44 para o escoamento hidraulicamente liso é (Chen, 1991):

$$\frac{u}{u^*} = \frac{a}{\beta^m} \cdot \left( \frac{u^* \cdot y}{\nu} \right)^{1/m} \quad (45)$$

em que:  $\beta$  - constante empírica ( $\beta = 0,111$  para escoamento hidraulicamente liso).

Para o escoamento hidraulicamente rugoso (Chen, 1991):

$$\frac{u}{u^*} = \frac{a}{\gamma^m} \cdot \left( \frac{y}{k_s} \right)^{1/m} \quad (46)$$

em que:  $\gamma$  - constante empírica ( $\gamma = 0,0333$  para escoamento hidraulicamente rugoso).

Para escoamento hidraulicamente liso, a lei das potências pode ser derivada como (Barenblatt<sup>5</sup>, 1993 *apud* Cheng, 2007):

$$\frac{u}{u^*} = \beta \cdot \left( \frac{u^* \cdot y}{\nu} \right)^{1/m} \quad (47)$$

em que:  $\beta$  e  $m$  - constantes empíricas que dependem do número de Reynolds ( $Re$ ):

$$\beta = 0,577 \cdot \ln Re + 2,5 \quad (48)$$

$$m = 0,667 \cdot \ln Re \quad (49)$$

---

<sup>5</sup> Barenblatt G.I. "Scaling laws for fully-developed turbulent shear flows".1. Basic hypotheses and analysis. J. Fluid Mech 1993; 248: 513-520.

## **4.2 Trabalho de Campo**

### **4.2.1 Ribeirão da Onça**

O estudo experimental ocorreu na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça, localizada na região do município de Brotas-SP, centro-leste do estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste. O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçú, afluente do Rio Tietê pela margem direita, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 28. Em trabalhos anteriores foram construídos poços de monitoramento: poços piezométricos semi-penetrantes, Contin Neto (1987), poços de observação para a caracterização do padrão transversal de escoamento de água na interação entre rio e aquífero subterrâneo, Arantes (2003), quatro piezômetros situados em linha, ortogonal e próximos ao ribeirão, o que permitiu estudos da interação rio-aquífero, Barreto (2006).

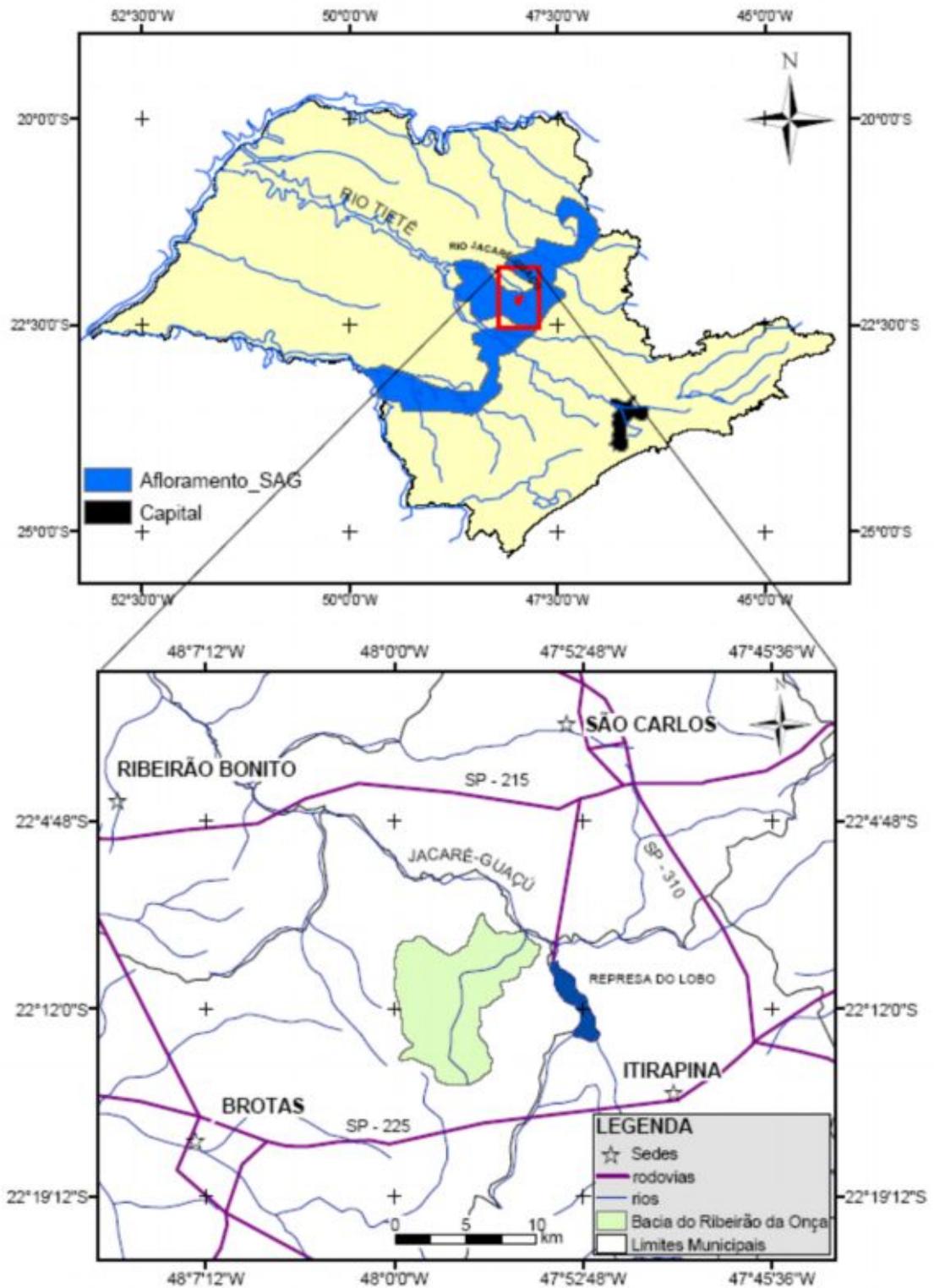


Figura 28. Localização da Bacia do Ribeirão da Onça

Segundo Mattos *et al.*<sup>6</sup> (1984 *apud* Pompêo, 1990) e Preto Filho<sup>7</sup> (1985 *apud* Pompêo, 1990) as características físicas da bacia são:

|                                     |                    |
|-------------------------------------|--------------------|
| Área de drenagem                    | 65 km <sup>2</sup> |
| Perímetro                           | 42 km              |
| Comprimento axial                   | 11 km              |
| Extensão do curso d'água principal  | 16 km              |
| Comprimento total dos cursos d'água | 55 km              |
| Altitude máxima                     | 840 m              |
| Altitude mínima                     | 640 m              |
| Declividade média                   | 7,6 m/km           |

A proximidade da Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP) permite a inclusão de dados históricos de precipitação no estudo.

Visando quantificar o escoamento superficial com confiabilidade na Bacia do Ribeirão da Onça, foi definida a localização da seção de controle de vazão e foram realizadas estimativas de vazão usando o molinete hidrométrico, flo-tote, vertedor e equações para bueiro.

---

<sup>6</sup> Mattos, A.; Righetto, A. M.; Contin Neto, D. e Pompêo, C.A (1984) – Relações Hidrológicas e Hidrometeorológicas em Bacia Experimental na Região de Afloramento do Aquífero Botucatu. Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP. Relatório apresentado à FAPESP. São Carlos.

<sup>7</sup> Preto Filho, V.O. (1985) – Implantação de uma Bacia Experimental para Estudos Hidrogeológicos e Hidrometeorológicos. Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP. Primeiro relatório semestral jan-ago., apresentado à FAPESP. 16p., São Carlos.

#### 4.2.2 Estabilização da seção

Visando definir a seção de controle de vazão para um local de fácil acesso, seguro e que apresentasse uma calha estável, foi escolhida uma seção a montante da ponte situada na Fazenda Santa Maria da Fábrica (Figura 29) apesar de situar-se próxima ao ponto de bombeamento de água para irrigação.



Figura 29. Seção de medição de vazão, situada a montante da ponte e a montante da casa de bombas. O hidrometrista está medindo velocidades com um molinete hidrométrico

A estação fluviométrica definida para este trabalho (Figura 30) situa-se próxima à seção utilizada em trabalhos anteriores na bacia (Barreto, 2006 e Gomes, 2008). Entretanto, devido às chuvas ocorridas em 2007, a ponte sobre o córrego foi derrubada e uma nova ponte foi construída sobre 2 tubos de concreto de 1,5 metros de diâmetro. Com esta nova disposição, a ponte funciona como controle de jusante, represando o ribeirão e separando o escoamento em fluvial a sua montante e torrencial a sua jusante. Como o acesso à seção é fácil e não ocorre extravasamento do escoamento em épocas de cheias, a seção apresentou grandes vantagens.

Na seção foram realizadas estimativas de vazão com molinete hidrométrico, vertedor circular e por equações teóricas baseadas em dados de níveis e de velocidade do escoamento,

obtidas por equipamentos instalados no linígrafo e na seção de medição de vazão, respectivamente.

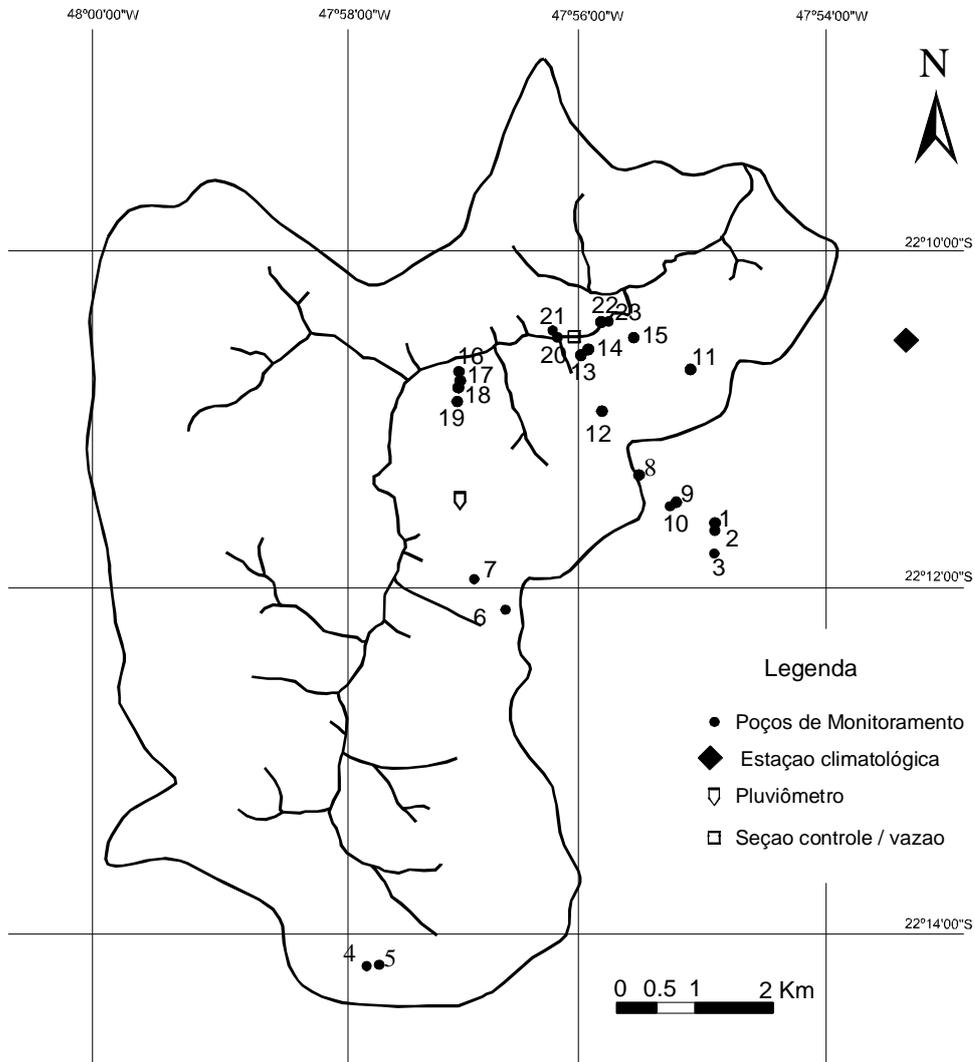


Figura 30. Bacia do Ribeirão da Onça. Localização dos poços de monitoramento e da estação pluviométrica. Fonte: Gomes (2008)

O desenho esquemático da seção de medição está representado nas Figuras 31 e 32.

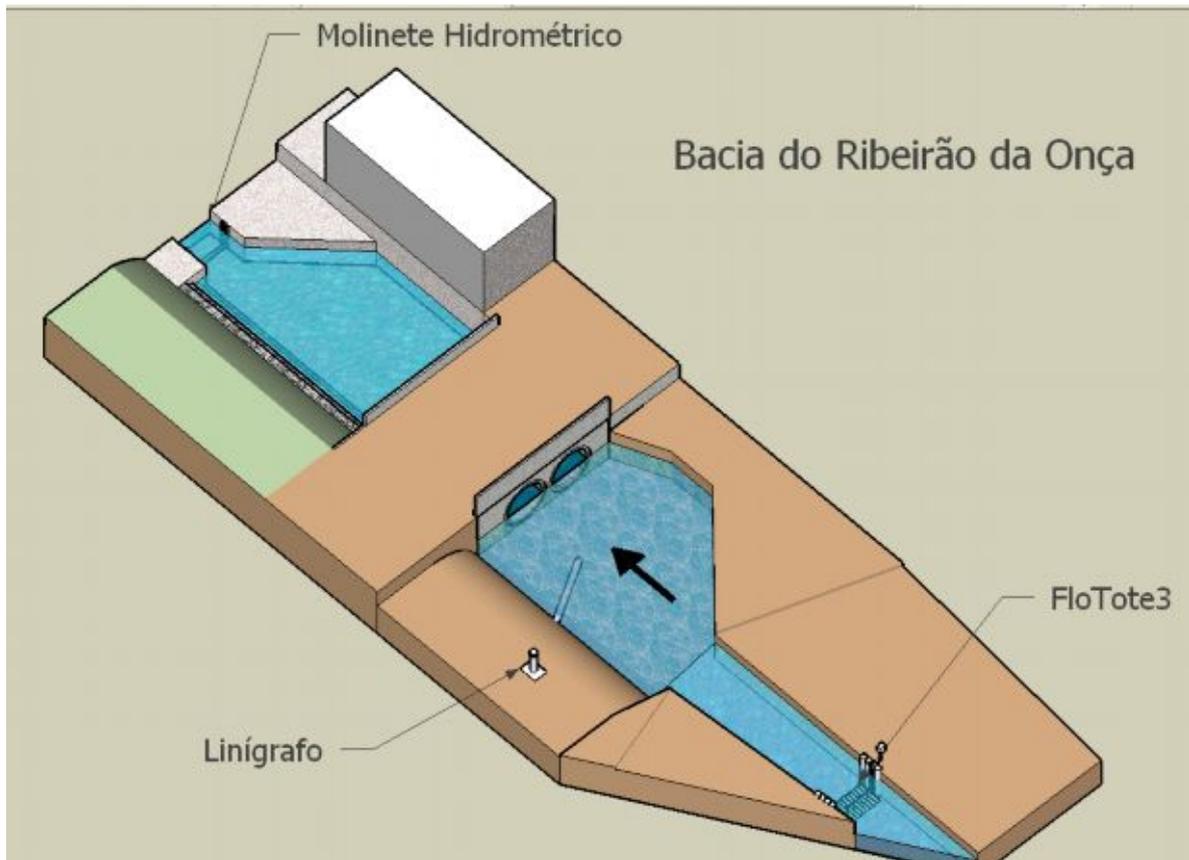


Figura 31. Desenho esquemático da seção fluviométrica no Ribeirão da Onça

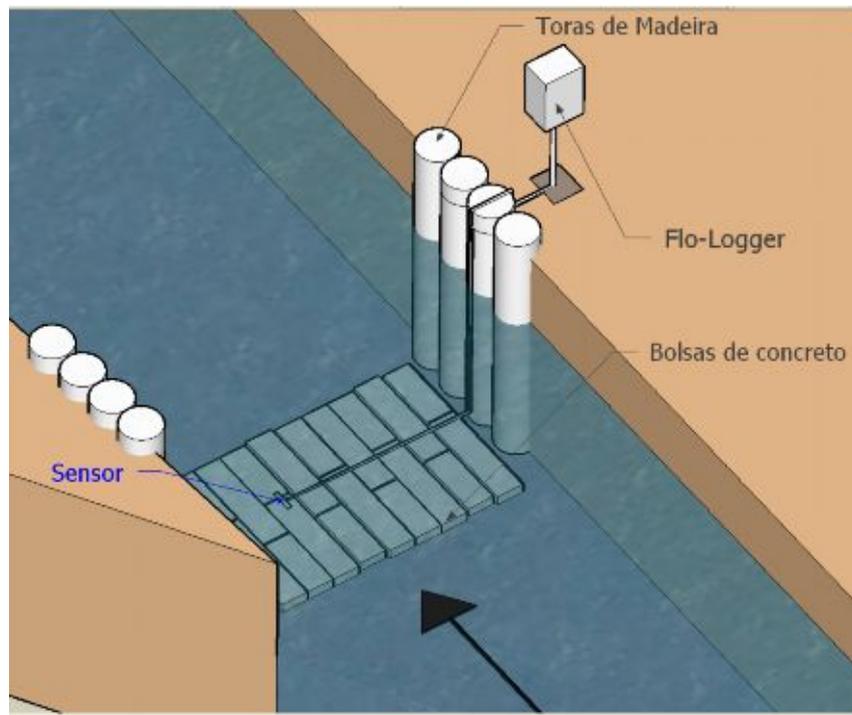


Figura 32. Detalhe da instalação do Flo-Tote3

Definida o local da seção de medição de vazão, foi necessário estabilizar as margens, para que a seção não tenha mudanças das características geométricas com o tempo. Assim, foram instaladas toras de madeiras (eucalipto) de 10 centímetros de diâmetro, cravando-as com o auxílio de marretas (Figura 33).



Figura 33. Cravação das toras de eucalipto para estabilização da seção fluviométrica

Após a cravação das toras de eucalipto, foram colocadas toras de madeira nas transversais e travadas com parafusos e porcas. O travamento das toras facilita a sustentação da estrutura de madeira (Figura 34).



Figura 34. Instalação das toras transversais

Posteriormente, foram instalados sacos plásticos cheios de areia entre as margens e as toras de madeira, para o preenchimento de vazios impedindo o escoamento lateral à seção (Figura 35).



Figura 35. Instalação de sacos de areia

Finalmente, foram depositados seixos rolados, natural de leitos de rios, e uma tela no fundo do rio, para a estabilização do leito (Figura 36).



Figura 36. Instalação do seixo rolado e tela no leito do rio

Após a estabilização da seção, foi instalada a régua linimétrica (Figura 37). A régua representa uma importante ferramenta para o monitoramento hidrológico. Considerando que o zero da régua não muda com o passar do tempo, a régua é um ponto de referência para as medições de carga hidráulica, além de servir para indicar a necessidade da limpeza do linígrafo.



(a)



(b)

Figura 37. (a) Seção de controle fluvial na Bacia do Ribeirão da Onça; (b) Detalhe da régua linimétrica

O zero da régua foi instalado a 1,44 metros abaixo da boca do linígrafo. Através de um transporte de cotas, foi determinado a cota da boca do linígrafo, 687,711 m e o zero da régua, 686,271m.

Os pontos inferiores internos dos tubos de concreto, da margem direita e esquerda, situam-se nas cotas 686,286 e 686,260 metros, respectivamente. Assim, o zero da régua está a 1,5 centímetros abaixo e 1,1 centímetros acima do ponto inferior interno dos tubos da margem direita e esquerda, respectivamente.

### 4.2.3 Molinete

As estimativas de vazão utilizando o molinete hidrométrico foram realizadas desde janeiro de 2007, periodicamente a cada 15 dias, Figuras 38 e 39.



Figura 38. Estimativa de vazão com o auxílio do molinete na seção de estrangulamento, a jusante da ponte, na Fazenda Santa Maria da Fábrica



Figura 39. Estimativas de vazão na Bacia do Ribeirão da Onça, a montante da ponte

As estimativas de vazão com o molinete hidrométrico baseiam-se em medições de velocidade no ponto que corresponde a 60% da profundidade, para cada vertical. Para cada ponto, calculou-se a média de três medições de velocidades de 30 segundos cada. O método para o cálculo de vazão foi o método de meia seção.

#### 4.2.4 Vertedor

Para a verificação das medições de vazão, estimadas através do uso do molinete hidrométrico, optou-se por escolher mais um método de medição de vazão: vertedor. Os formatos mais práticos de vertedores são os triangulares e retangulares, porém necessitam estar devidamente nivelados. Como na seção de controle fluviométrico não poder ter instalado um vertedor permanentemente, foi escolhido o vertedor circular, pois com o formato circular é possível instalá-lo e retirá-lo, sem a necessidade de deixá-lo nivelado.

Respeitando as exigências de funcionamento das equações de vertedores circulares (Figura 12) e para o caso de ser instalado na posição frontal aos bueiros de concreto, foi definido o diâmetro de 1 metro para a abertura do vertedor.

A construção do vertedor visou à economia e a durabilidade do material. Uma placa de maderite plastificada foi cortada e biselada de acordo com as dimensões indicadas na Figura 40.

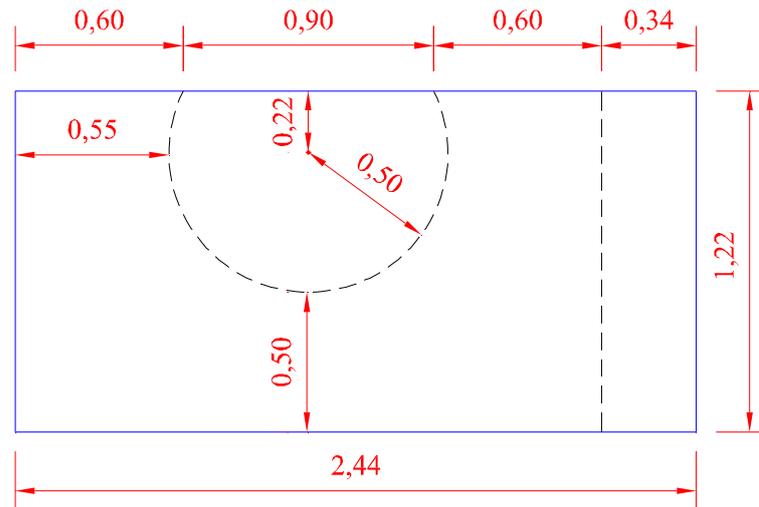


Figura 40. Dimensões projetadas para o vertedor. As linhas tracejadas indicam os cortes feitos pela marcenaria em placa de maderite

Após o corte, foram instalados perfis metálicos para impedir a deformação da placa de madeira. Além dos perfis, foram instaladas fitas de borracha na superfície posterior do vertedor, para sua vedação lateral, Figura 41.

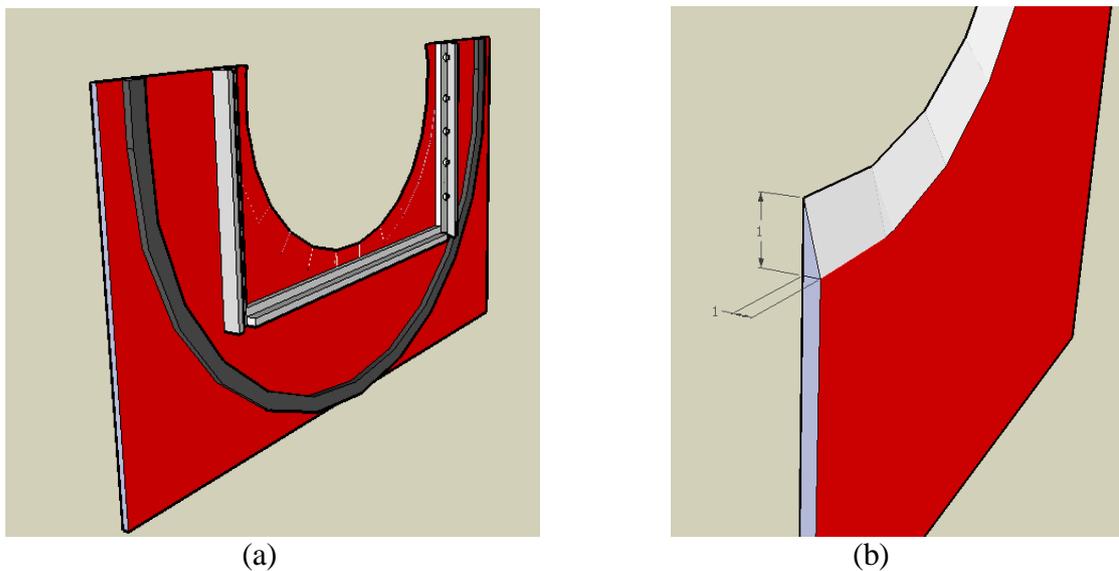


Figura 41. Croqui do vertedor circular. (a) Detalhes dos perfis metálicos e da fita de borracha; (b) Detalhe do vertedor circular biselado

Para a impermeabilização da placa de madeira, foi utilizada a resina, polímero vegetal, extraída da mamona, soja e milho. A resina é fundamental para que o vertedor não deteriore com o tempo.

Após a construção do vertedor circular no laboratório, foram construídos dois trilhos, compostos de rodinhas em ambos os lados (Figura 42). Os trilhos foram construídos para facilitar a instalação e retirada do vertedor no campo.

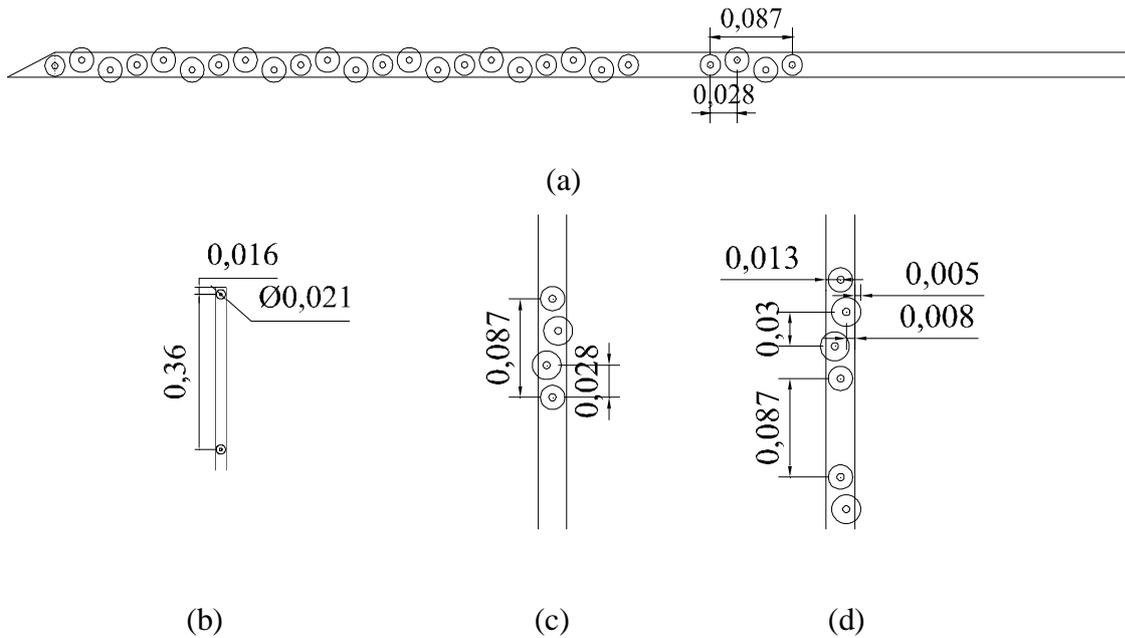


Figura 42. Trilho. (a) perfil do trilho; (b) detalhe da parte superior do trilho; (c) e (d) detalhes das rodinhas e espaçadores dos trilhos

Com o vertedor e os trilhos construídos, foi possível realizar medições de vazão com o vertedor, na Bacia do Ribeirão da Onça, Figuras 43 e 44.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 43. Processo para a medição de vazão com o vertedor. (a) posicionamento dos trilhos; (b) instalação do vertedor no primeiro tubo; (c) e (d) posicionamento do vertedor; (e) retirada dos trilhos do primeiro vertedor; (f) instalação dos trilhos e do vertedor para o segundo tubo de concreto



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 44. (a) e (f) vertedores instalados; (a) medição da distância entre o pé da soleira do vertedor e o ponto superior do tubo de concreto; (d) e (e) vistas do escoamento após a instalação do vertedor; (f) vista a jusante da ponte

#### 4.2.5 Equação Bueiro (linígrafo)

No dia 23/11/2007 foi instalado o linígrafo, Figura 45 (a) e (b), na margem esquerda do Ribeirão da Onça, a montante da ponte, localizada na Fazenda Santa Maria da Fábrica.



Figura 45. (a) Linígrafo em fase de implantação e (b) Linígrafo instalado

No dia 06/12/2007 iniciaram-se as leituras de níveis d'água no linígrafo, com intervalos de 15 minutos, pelo "Floater", equipamento dotado de bóia, contrapeso e datalogger.

Visitas periódicas quinzenais foram realizadas durante todo o período do trabalho na estação fluviométrica na Bacia do Ribeirão da Onça, que visavam possíveis manutenções e verificações no funcionamento dos equipamentos.

A partir do dia 11/07/2008 iniciaram-se as leituras de níveis d'água no linígrafo, através de transdutores de pressão, DIVERS, paralelamente ao Floater (bóia e contrapeso). O equipamento mede pressão hidrostática e pressão atmosférica, resultando em nível d'água. Os dados medidos pelo Diver foram comparados com os dados obtidos pelo Floater e com as medições manuais realizadas quinzenalmente. Deste modo, assegura-se que se algum equipamento apresentar problemas, nenhum dado de nível seja perdido.

As configurações e o processo de leitura dos dados dos equipamentos Diver e Floater basearam nos procedimentos criados pelo setor de hidrometria do LHC, no Anexo A.

O controle de vazão no bueiro permite determinar a vazão através de equações teóricas.

$$Q = A_c \cdot V_c \quad (50)$$

$$Q = 1,518.D^{0,693}.h^{1,807} \quad (51)$$

$$Q = 1,503.E_c^{1,9}.D^{0,60} \quad (52)$$

A Equação 50 baseia-se no cálculo da vazão a partir do produto da área crítica com a velocidade crítica. Com o valor da lâmina d'água,  $y_{lin}$  e o valor do diâmetro do bueiro (D), calcula-se a altura crítica ( $y_c$ ), área molhada (A), largura de topo da seção (B) e ângulo de abertura da lâmina d'água ( $\theta$ ):

$$A = D^2 \cdot \left( \frac{\theta - \text{sen}\theta}{8} \right) \quad (53)$$

$$B = D \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \quad (54)$$

$$\theta = 2 \cdot \arccos \left( 1 - \frac{2 \cdot y_c}{D} \right) \quad (55)$$

$$H_m = \frac{A}{B} \quad (56)$$

$$y_{lin} = y_c + \frac{H_m}{2} \quad (57)$$

Conhecendo-se o valor da altura média,  $H_m$ , a velocidade crítica é calculada para o valor unitário de Froude:

$$Fr = \frac{v_c}{\sqrt{g \cdot H_m}} \quad (58)$$

A Equação 51 baseia-se no cálculo da vazão considerando o bueiro comportando-se como um vertedor circular, em que  $h$  é a carga sobre o vertedor.

Para o caso de um canal circular alimentado por um reservatório a montante, utiliza-se a Equação 52 para o cálculo da vazão (Henderson, 1966). Para este caso, o bueiro é considerado como canal circular e o cálculo da vazão baseia-se no valor do diâmetro do bueiro (D) e da energia específica mínima ( $E_c$ ), que corresponde ao valor da carga hidráulica (h).

Segundo Henderson (1966), para canais circulares que apresentam declividade de fundo, recomenda-se que a Equação 52 deve ser corrigida devido ao efeito de contração no escoamento que aparece no início do canal e que diminui a vazão, (Equação 59).

$$Q = 1,503.E_c^{1,9}.D^{0,60} \left( \frac{S_0}{0,4} \right)^{0,05} \quad (59)$$

sendo  $S_0$  a declividade do canal para bueiro em questão  $S_0$  0,025.

#### 4.2.6 Flo-Tote

Com a estação estabilizada, iniciou-se a instalação do equipamento Flo-Tote3, na seção de medição de vazão. O equipamento necessitou de um suporte para o sensor permanecer fixo e submerso na água e de uma caixa protetora para proteger o Flo-Logger, Figura 46.



Figura 46. Suporte para o sensor (a) e para o Flo-Logger (b)

No dia 12/09/2008 o sensor foi instalado no Ribeirão da Onça, sendo fixado a 1,40 metros da margem direita e a 0,25 m sobre o leito, na seção de medição de vazão, para a coleta contínua de velocidades. A Figura 47 ilustra o Flo-Tote3 instalado na estação fluviométrica.



Figura 47. (a) Flo-Tote3 instalado na estação fluviométrica; (b) detalhe do sensor; (c) detalhe da caixa protetora do Flo-Logger

O Flo-Tote3 foi configurado para realizar medições de velocidade e nível a cada 15 minutos (*cycle time*) e fazer a média temporal de velocidade e nível para 450 segundos (*Sample time*). Devido a problemas de bateria interna do equipamento, modificou-se o período de amostragem para 30, 10, 15, 120 e 300 segundos (*Sample time*) e o tempo entre cada coleta para 30 e 60 minutos (*Cycle time*). A mudança na configuração do equipamento visa comparar o gasto de energia do equipamento e determinar a melhor amostragem de nível e velocidade, que correspondem a realidade.

No dia 26/02/2009, foram realizadas medições de velocidade com o Flo-Tote e molinete hidrométrico na seção de medição de vazão para comparar as velocidades medidas pelos equipamentos no campo, Figura 48. Com o molinete, as velocidades foram medidas a cada 10% da vertical, para 11 verticais, sendo que a largura da seção apresenta 3 metros e 0,80 m de profundidade. O Flo-Tote mediu velocidades para as mesmas verticais às utilizadas pelo molinete, porém para os pontos 20, 60 e 80% da vertical. Para a vertical situada a 1,5 metros foram medidas velocidades a cada 10% da profundidade. O principal problema para medir velocidades a cada 10% da lâmina d'água com o flo-tote é a necessidade de suprir a energia do equipamento e do notebook, durante todo o dispendioso processo de medição de velocidades.

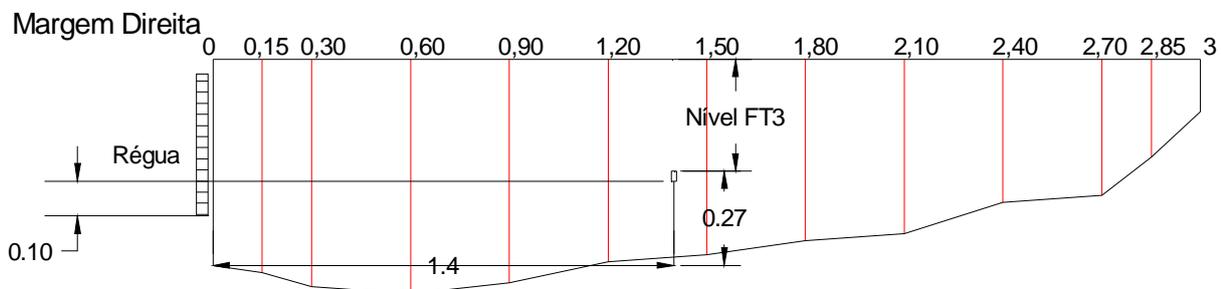


Figura 48. Perfil transversal da seção de medição de vazão, no Ribeirão da Onça e posição do Flo-Tote (dimensões em metros)

Na Figura 49, estão representadas as verticais de medições de velocidade, de 0,15m a 3,0 metros de distância da margem direita, a posição fixa do Flo-Tote (1,4m da margem direita e 0,27m do fundo do leito) e a relação do Flo-Tote com a régua linimétrica:

$$\text{Nível da Régua} = \text{Nível do Flo-Tote} + 0,10 \text{ (m)} \quad (60)$$

#### 4.2.7 Aplicação do método das isotáquias

Para o cálculo da vazão pelo método das Isotáquias, Equação 33, são necessários os dados de velocidade ( $v_{med}$ ) e de nível d'água (Nível\_FT3), que são medidos pelo Flo-Tote.

Com os valores de níveis d'água calcula-se a lâmina d'água adimensionalizada ( $y/H$ ),

$$\frac{y}{H} = \frac{0,27}{(Nível\_FT3 + 0,27)} \quad (61)$$

Com o valor de  $y/H$  obtém-se a isotáquia ( $c_i$ ) correspondente, a partir das isolinhas de velocidades construídas com os perfis de velocidade medidos no dia 26/02/2009.

Além disso, com o nível d'água medido pelo Flo-Tote, calcula-se a área molhada. A área é calculada com uma relação de primeiro grau entre régua linimétrica e área correspondente. A régua está relacionada com o nível d'água medido pelo Flo-Tote, de acordo com a Equação 60.

Com as estimativas da isotáquia e da área, correspondentes a medição da velocidade, calcula-se a vazão.

$$Q = A \left( \frac{v_{med}}{c_i} \right) \quad (62)$$

#### 4.2.8 Volume Drenado

Com o valor do escoamento superficial na Bacia do Ribeirão da Onça, Equações 33 e 59, o valor do volume drenado é calculado para o período do estudo. O volume drenado é uma variável de entrada do Balanço Hídrico, Equação 2, para as estimativas de recarga direta e profunda para a Bacia do Ribeirão da Onça, área de afloramento do Aquifero Guarani, sendo que o volume drenado corresponde ao somatório do escoamento de base e superficial.

O volume drenado é calculado multiplicando o valor da vazão estimada pela Equação 59, pelo período de 15 minutos. Somando os volumes, para o período de um ano hidrológico, estima-se o valor do volume anual drenado.

Dividindo o volume drenado pela área da bacia de contribuição da bacia, determina-se o valor do volume drenado em milímetros.



## 5 Resultados

### 5.1 Laboratório

Para as formulações apresentadas, foram determinados os perfis de velocidade para a análise comparativa com dados empíricos obtidos no canal do laboratório.

A partir das leituras de carga (h) no vertedor triangular, foram aplicadas as equações 16, 17 e 18 para determinar as vazões (Q) (Tabela 6).

Tabela 6. Vazões obtidas pelo vertedor triangular

| Largura do canal | Carga no vertedor | B/H  | Equação 18<br>Kindsvater         | Equação 17<br>Gouley | Equação 16<br>Thomson | Média |
|------------------|-------------------|------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|-------|
| ----- (m) -----  | -----             |      | ----- (l.s <sup>-1</sup> ) ----- | -----                | -----                 | ----- |
| 0,40             | 0,085             | 1,54 | 2,95                             | 2,92                 | 2,95                  | 2,94  |
|                  | 0,155             | 1,29 | 13,11                            | 12,96                | 13,24                 | 13,10 |
|                  | 0,205             | 1,14 | 26,28                            | 25,93                | 26,64                 | 26,28 |
|                  | 0,227             | 1,09 | 33,88                            | 33,38                | 34,37                 | 33,88 |
| 0,20             | 0,135             | 2,22 | 9,30                             | 9,20                 | 9,38                  | 9,29  |
|                  | 0,155             | 1,88 | 13,11                            | 12,96                | 13,24                 | 13,10 |
|                  | 0,205             | 1,22 | 26,28                            | 25,93                | 26,64                 | 26,28 |

Os valores resultantes da aplicação da Equação 18 aproximam-se da média, para todas as relações de B/H. Para o canal de 0,20m de largura, a vazão de 2,94 l.s<sup>-1</sup> não foi utilizada porque gerava uma lâmina d'água pequena, tornando o equipamento Flo-Tote3 ineficaz para as medições de velocidade.

De acordo com as Equações de 37 a 39, foi determinado o tipo de escoamento para as diferentes relações B/H.

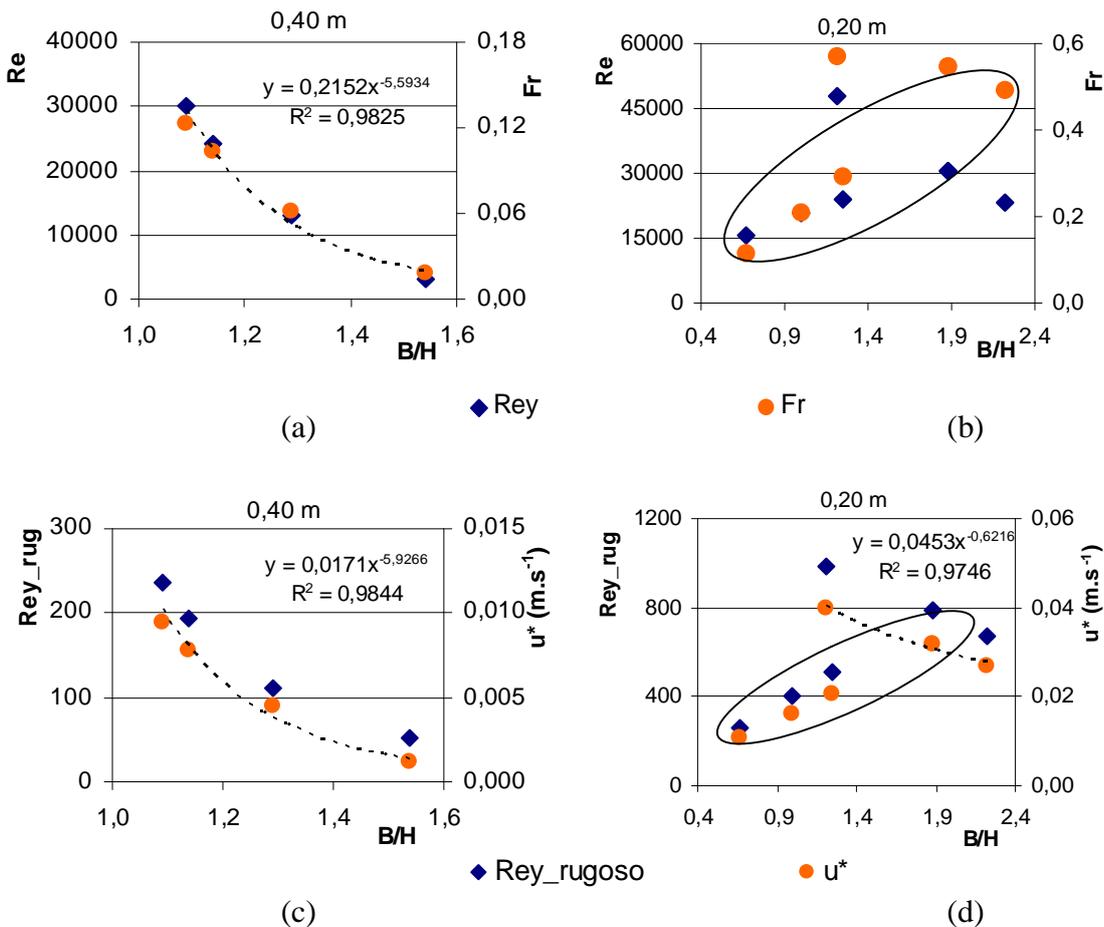


Figura 49. (a)  $Fr$  e  $Re$  em relação a  $B/H$  para o canal de 0,40 m; (b)  $Fr$  e  $Rey$  em relação a  $B/H$  para o canal de 0,20 m; (c)  $u^*$  e *Reynolds de rugosidade* para o canal de 0,40 m; (d)  $u^*$  e *Reynolds de rugosidade* para o canal de 0,20 m

Os dados apresentados na Figura 49 indicam que para as relações  $B/H$  analisadas, o escoamento foi turbulento ( $Rey > 2000$ ), fluvial ( $Fr < 1,0$ ) e turbulento hidraulicamente rugoso. Com a diminuição da vazão (aumento de  $B/H$ ), os parâmetros diminuem ( $Re$ ,  $Fr$ ,  $u^*$  e *Reynolds de rugosidade*), porque a velocidade média do escoamento e o raio hidráulico também diminuíram. Para a Figura 49, foram traçadas linhas de tendência, tipo potencial, para o número de Froude ( $Fr$ ) e a velocidade de atrito ( $u^*$ ), resultando em  $R^2$  destas funções próximo do valor unitário (1,0). Na Figura 49, para os canais de 0,20 m de largura, os pontos inseridos na elipse correspondem à variação da relação  $B/H$ , para vazão constante de 13,1 l.s<sup>-1</sup>. Assim, com vazão constante, para uma diminuição da relação  $B/H$ , ou seja, aumento da lâmina d'água, a velocidade do escoamento diminui, o que acarreta em diminuição dos parâmetros ( $Fr$ ,  $Re$ ,  $u^*$  e *Reynolds de rugosidade*).

### 5.1.1 Vazão variável

Conhecidos os tipos de escoamento, foram realizadas as medições de velocidade com o equipamento Flo-Tote3, para os canais de 0,40 m (Figura 50) e 0,20 m de largura (Figura 51).

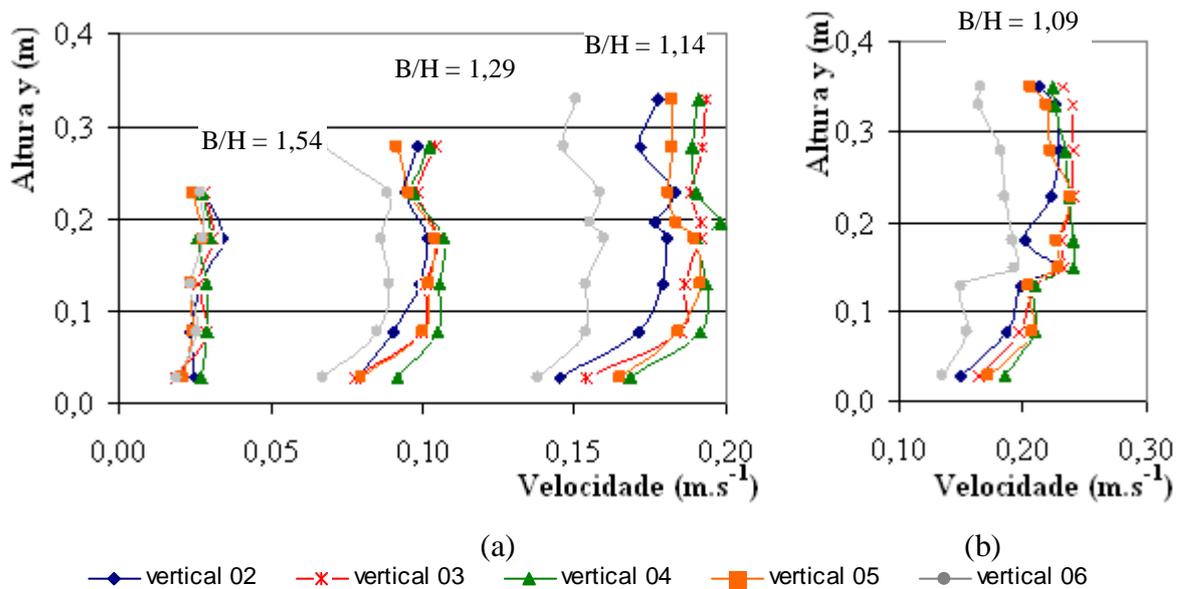


Figura 50. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,40 m de largura. (a)  $B/H = 1,54$ ;  $B/H = 1,29$ ;  $B/H = 1,14$ ; (b)  $B/H = 1,09$

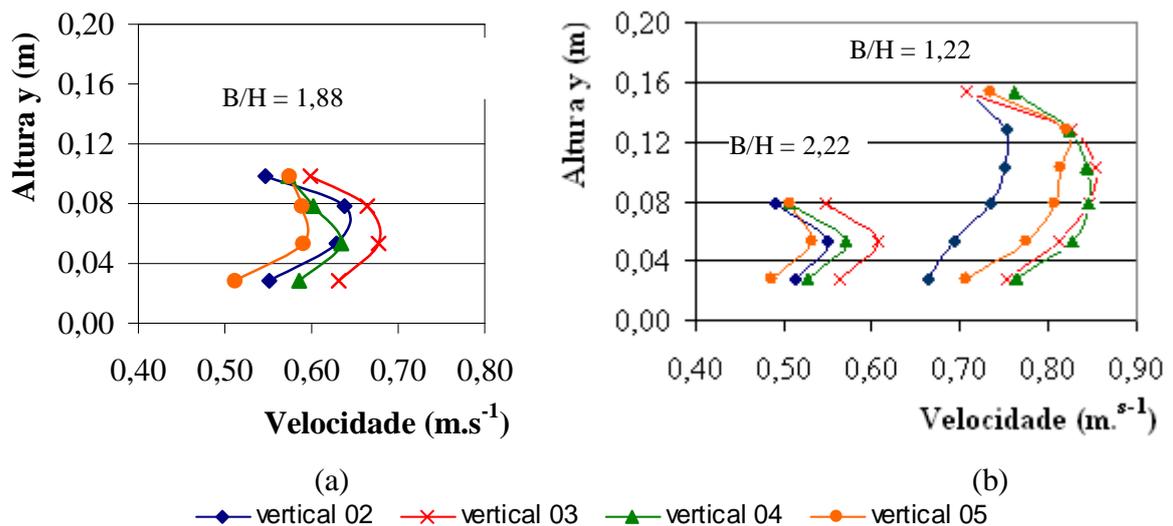


Figura 51. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,20 m de largura. (a)  $B/H = 1,88$ ; (b)  $B/H = 1,22$ ;  $B/H = 2,22$

Observando as Figura 50 e 51, nota-se que para menores razões B/H, ou seja, maiores lâminas d'água resultam em maiores velocidades, devido ao aumento da vazão. Para cada relação B/H, as verticais 2 e 6 (Figura 50) e as verticais 2 e 5 (Figura 51) obtiveram menores valores de velocidades, por situarem-se próximas à parede do canal. Próximo ao fundo do leito e à altura máxima da lâmina d'água, os valores de velocidades foram menores que nas posições intermediárias do eixo y (m).

A partir das distribuições de velocidade das Figura 50 e 51, foram determinadas as curvas de tendência para Lei das Potências e Logarítmica para cada vertical e vazão. As Figura 52 e 53 ilustram apenas as curvas da Lei das Potências e as médias das velocidades em cada vertical.

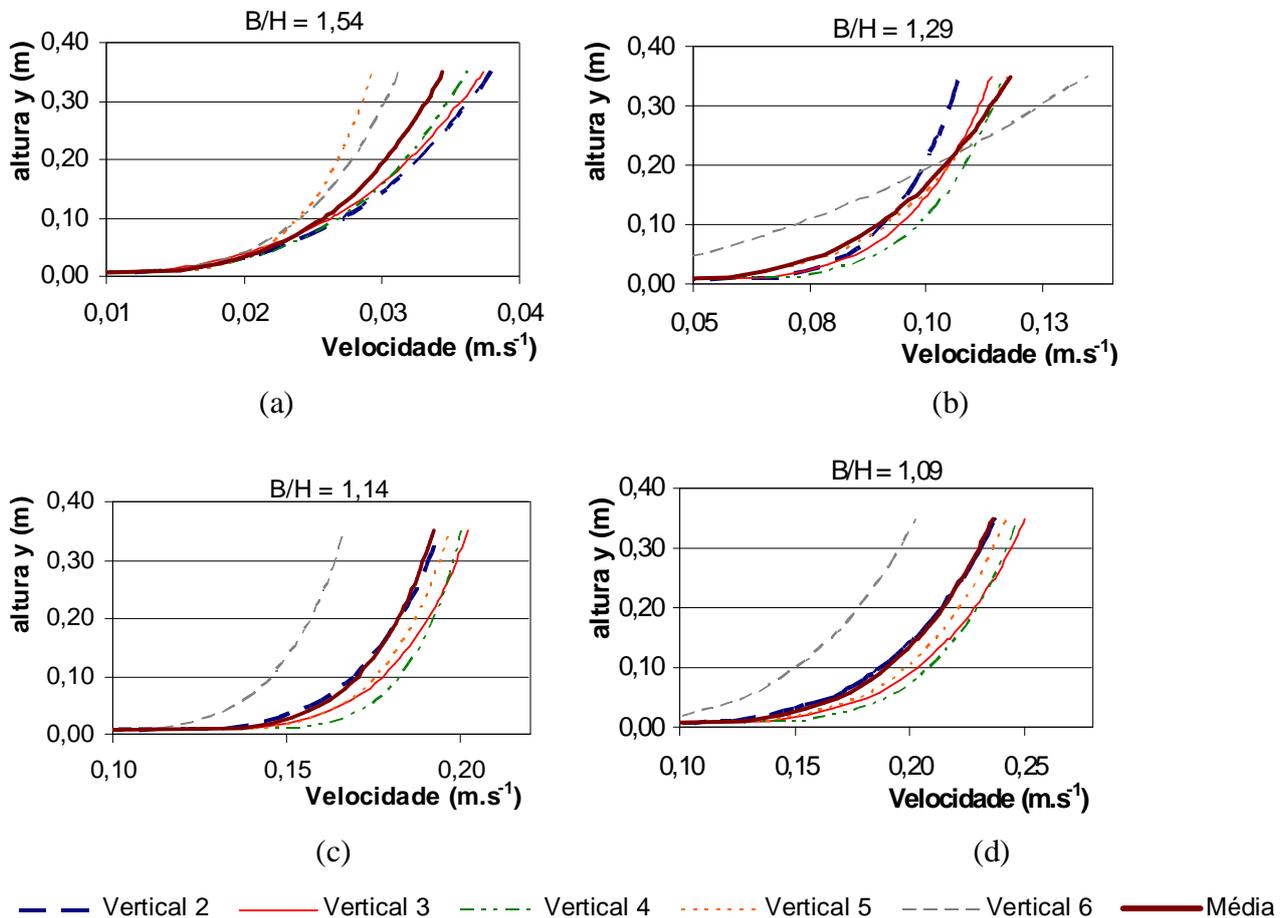


Figura 52. Perfil de velocidades para o canal de 0,40m de largura, Lei das Potências.

(a) B/H = 1,54; (b) B/H = 1,29; (c) B/H = 1,14; (d) B/H = 1,09

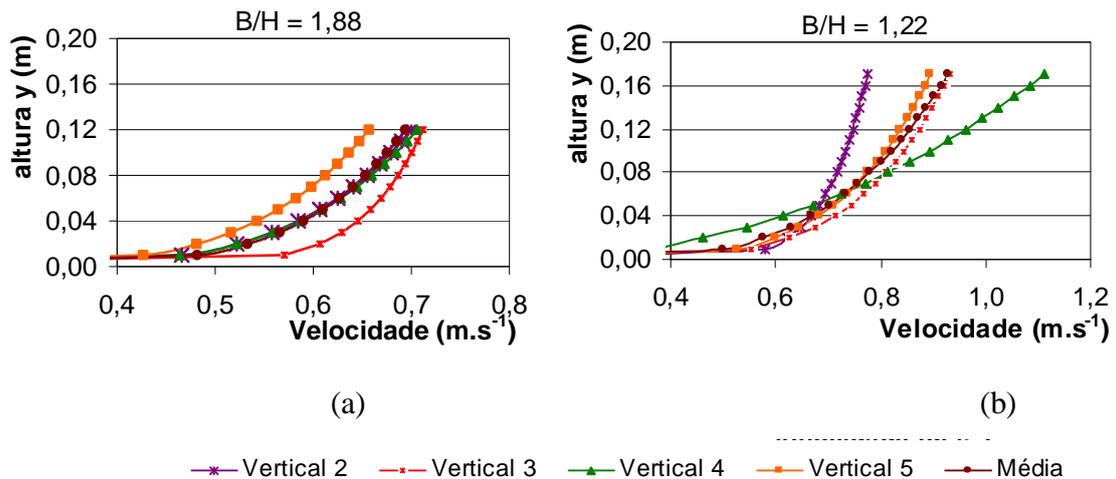


Figura 53. Perfil de velocidades para o canal de 0,20m de largura, Lei das Potências.

(a)  $B/H = 1,88$ ; (b)  $B/H = 1,22$

Para  $B/H = 2,22$  no canal de 0,20 m de largura não foram criadas linhas de tendência, devido ao pequeno número de medições de velocidade na vertical (3 valores).

Os valores de velocidade média para cada relação  $B/H$  foram comparados com as Leis das Potências e Logarítmicas encontradas na literatura. Nesta comparação, foram utilizadas as Equações 42 (Lei logarítmica) e 46 (Lei das Potências) para escoamento hidraulicamente rugoso, e as equações 41 (Lei logarítmica), 45 e 47 (Lei das Potências) para escoamento hidraulicamente liso. As equações são representadas pelas seguintes curvas do gráfico:

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| Equação 41 | “LOG – Cheng/Liso”      |
| Equação 42 | “LOG – Maghrebi/Rugoso” |
| Equação 45 | “POT – Chen/Liso”       |
| Equação 46 | “POT – Chen/Rugoso”     |
| Equação 47 | “POT – Barenblatt/Liso” |

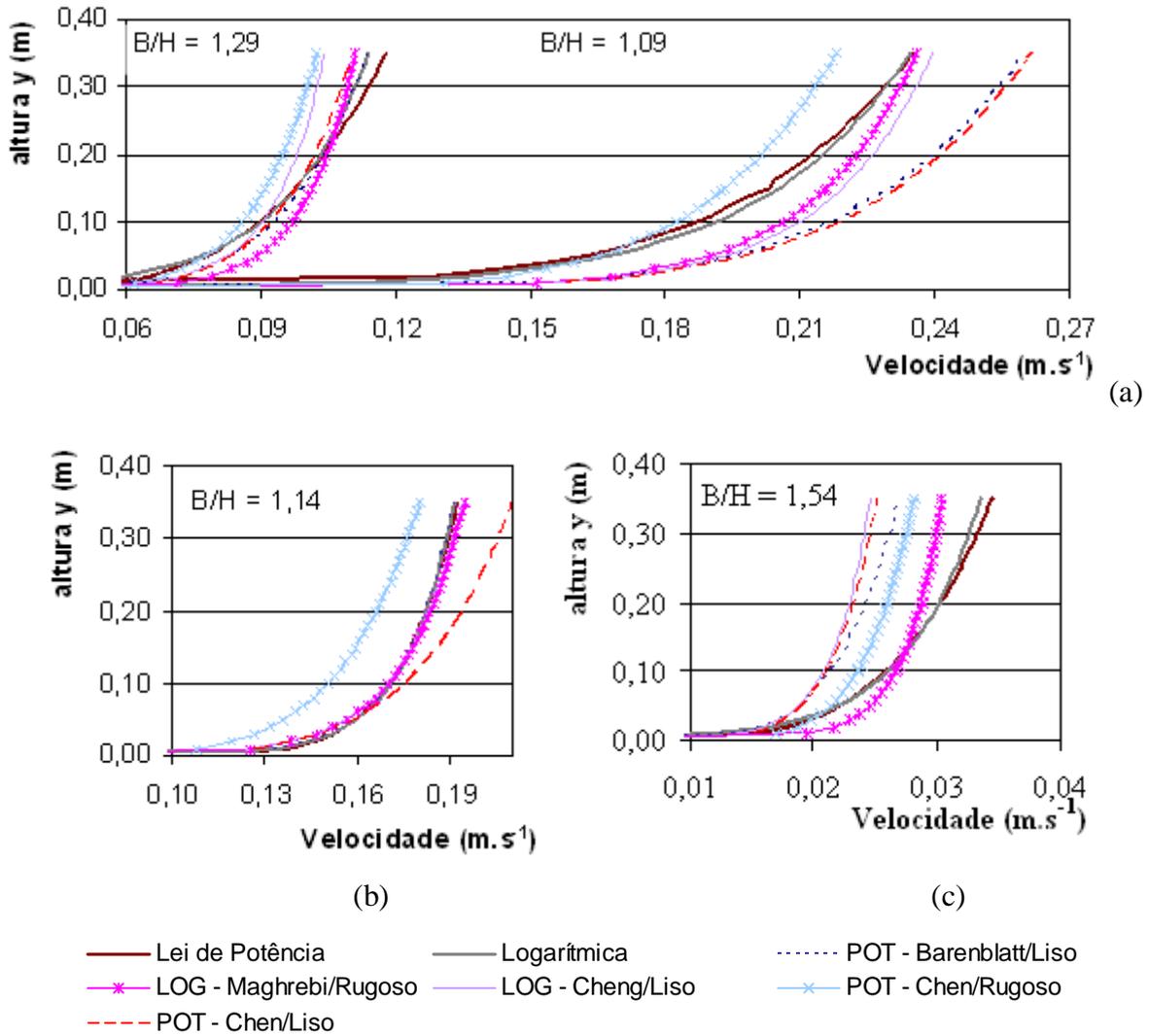


Figura 54. Perfis de velocidades médias obtidas no canal de 0,40 m de largura e dos perfis calculados pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a)  $B/H = 1,29$  e  $1,09$ ; (b)  $B/H = 1,14$ ; (c)  $B/H = 1,54$

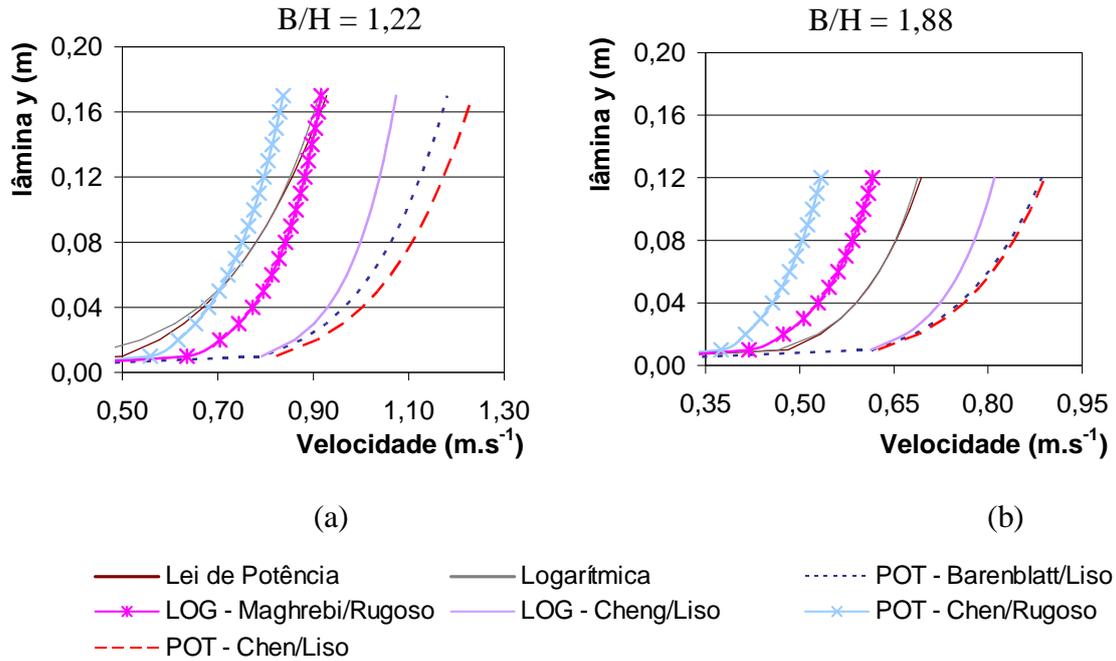


Figura 55. Perfis de velocidades: médias empíricas, para cada B/H, no canal de 0,20m de largura e das velocidades obtidas pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a) B/H = 1,22 e (b) B/H = 1,88

De acordo com as Figura 54 e 55, nota-se que as curvas experimentais, de potência e logarítmica, ficaram próximas das funções de potência, apresentada por Chen (1991) (equação 46), e Logarítmica, apresentada por Maghrebi (2006) (equação 42); ambas para escoamento turbulento hidraulicamente rugoso. Em relação às outras funções, notam-se discrepâncias de valores, visto que essas funções são utilizadas para escoamento hidraulicamente liso.

Deve-se notar que o erro do equipamento Flo-Tote3 equivale a 2% da leitura da velocidade, por ser um equipamento intrusivo, ou seja, perturba o escoamento para as medições de velocidade.

### 5.1.2 Vazão constante

Verificou-se o comportamento das velocidades para o canal de 0,20 m de largura e para a vazão fixa de  $13,1 \text{ l.s}^{-1}$ . Segundo a Figura 56, os valores de velocidade das verticais 2 e 5 são os menores comparados aos valores das outras verticais. Estes menores valores são explicados por situarem-se próximos das paredes do canal, onde ocorre atrito entre fluido e parede.

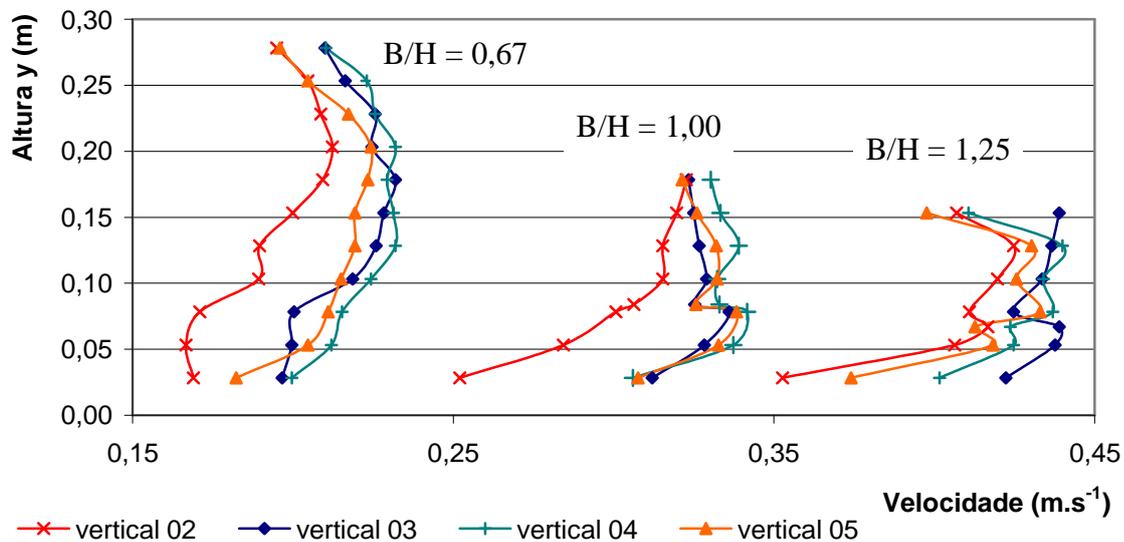


Figura 56. Distribuição de velocidades medidas para o canal de 0,20m de largura, para a vazão de  $13,1 \text{ l.s}^{-1}$ , mas com controle da comporta a jusante

A partir das distribuições de velocidades da Figura 56, determinaram-se curvas de tendência de potência e logarítmica, para cada vertical e razão B/H. Assim como nas medições anteriores, os valores de velocidade entre as tendências de potências e logarítmicas ficaram próximos.

Os valores de velocidade média para cada relação B/H foram comparados com as funções de potência e logarítmica encontradas na literatura (Figura 57).

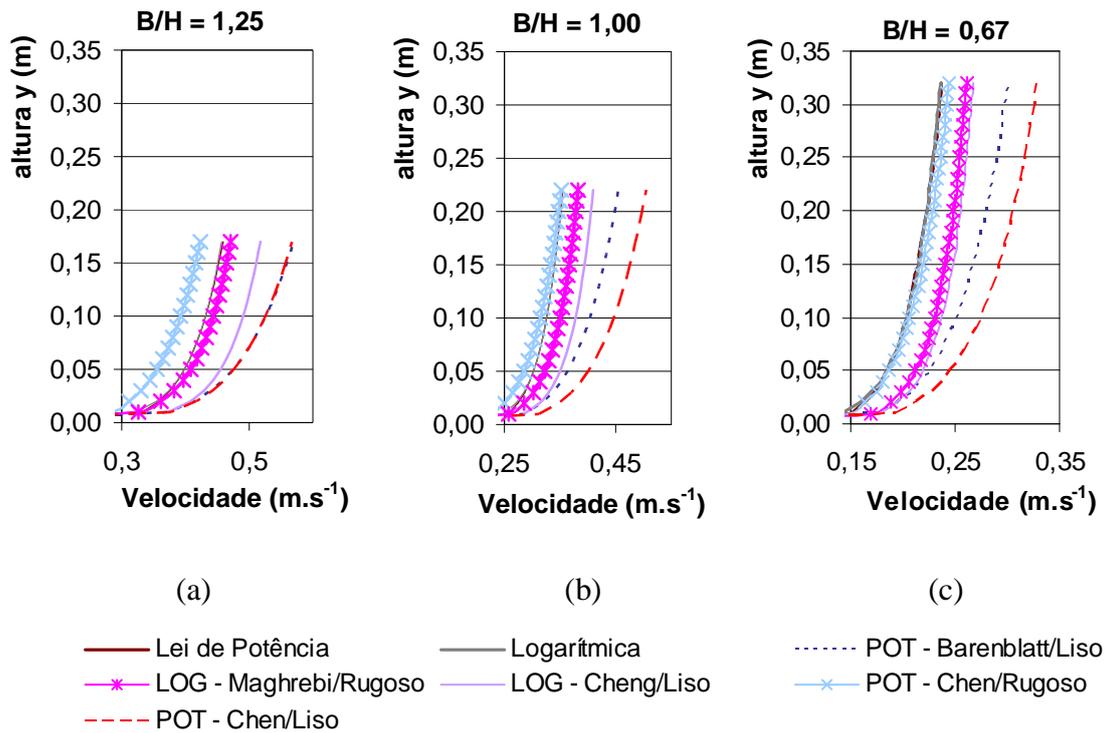


Figura 57. Perfis de velocidade: médias empíricas, obtidas no canal de 0,20m de largura e velocidades obtidas pelas Equações 41, 42, 45, 46 e 47. (a)  $B/H = 1,25$ ; (b)  $B/H = 1,00$ ; (c)  $B/H = 0,67$

Para as três relações  $B/H$  (1,25; 1,00; 0,67), as Equações 42 (função logarítmica dada por Maghrebi) e 46 (função de potência dada por Chen) foram as funções que mais se adequaram com as velocidades medidas no canal, ambas para escoamento hidraulicamente rugoso. Nota-se que os desvios dos valores de velocidades da Equação 47, lei das potências dada por Barenblatt, foram os maiores, comparados com os valores experimentais, medidos no canal. Para quantificar os desvios entre as funções dadas na literatura e os dados experimentais, subtraíram-se os valores de velocidade para cada lâmina d'água. Os desvios entre as curvas teóricas para as 5 equações da literatura e as curvas empíricas para as 3 relações de  $B/H$  estão representados na Figura 58 em função da lâmina d'água. Os dados de velocidade para  $B/H = 1,25$ , da Figura 58, estão representadas pelas curvas que terminam na lâmina d'água próxima de 0,18 m;  $B/H = 1,00$  para a lâmina d'água de 0,22 m e para  $B/H = 0,67$ , para a lâmina de 0,33 m. Nota-se que para todas as curvas, os desvios, em relação à empírica, mudam com o aumento da lâmina d'água.

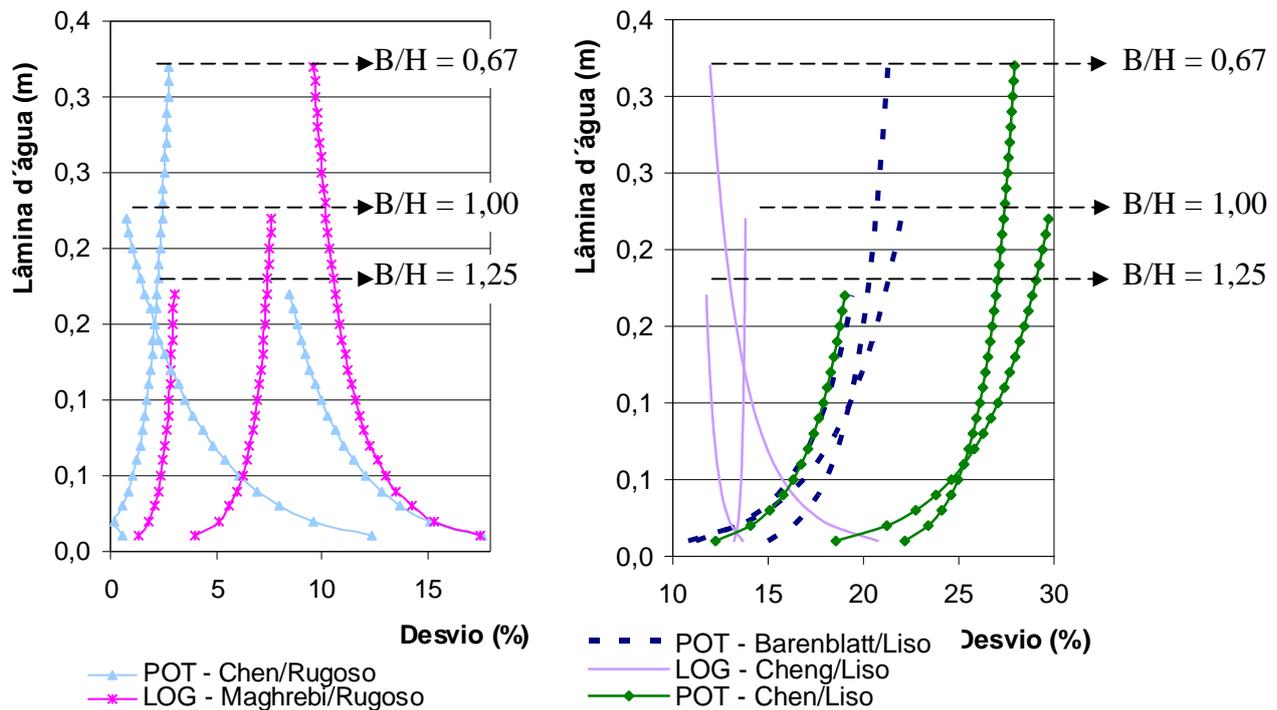


Figura 58. Desvios em porcentagem entre as velocidades médias experimentais (potência e logarítmica) e as funções da literatura. (a) equação 42 (LOG – Maghrebi/Rugoso); equação 46 (POT –Chen/Rugoso); (b) equação 41 (LOG – Cheng/Liso); equação 45 (POT – Chen/Liso); equação 47 (POT – Barenblatt/Liso)

Com os resultados de velocidade obtidos, é possível determinar as constantes  $a$  e  $m$  da equação 43, tanto para o canal de 0,40 m como o canal de 0,20 m de largura, a partir da tendência média. Neste caso, como a Equação 44 é uma função de potências, utilizou-se apenas tendências médias dos valores experimentais. Assim, para cada relação B/H, nos canais de 0,20 e 0,40 m, foram determinados os valores de  $a$  e  $m$  (Figura 59). Determinou-se, também, uma tendência linear a partir dos pontos obtidos da relação  $a/m$ . Para  $m$  variando de 4 a 12, a variação da relação  $a/m$  foi de 1,48 a 1,45. A relação  $a/m$  calculada é superior à encontrada na literatura (0,92), de acordo com Chen (1991).

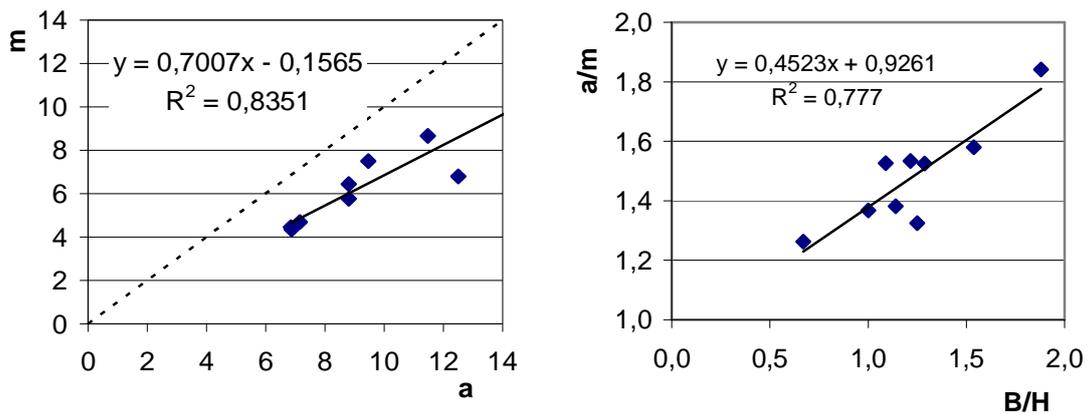


Figura 59. Relação entre as constantes  $m$  e  $a$  da Equação 44, em função de  $B/H$

### 5.1.3 Comparativo Flo-Tote, Molinete e Vertedor

Com as medições de velocidade nos canais 0,20 e 0,40 metros de largura, verificou-se que as diferenças de velocidade entre os valores medidos pelo Flo-Tote e molinete tende a 3%, conforme os valores absolutos aumentam para  $0,35 \text{ m.s}^{-1}$  (Figura 60).

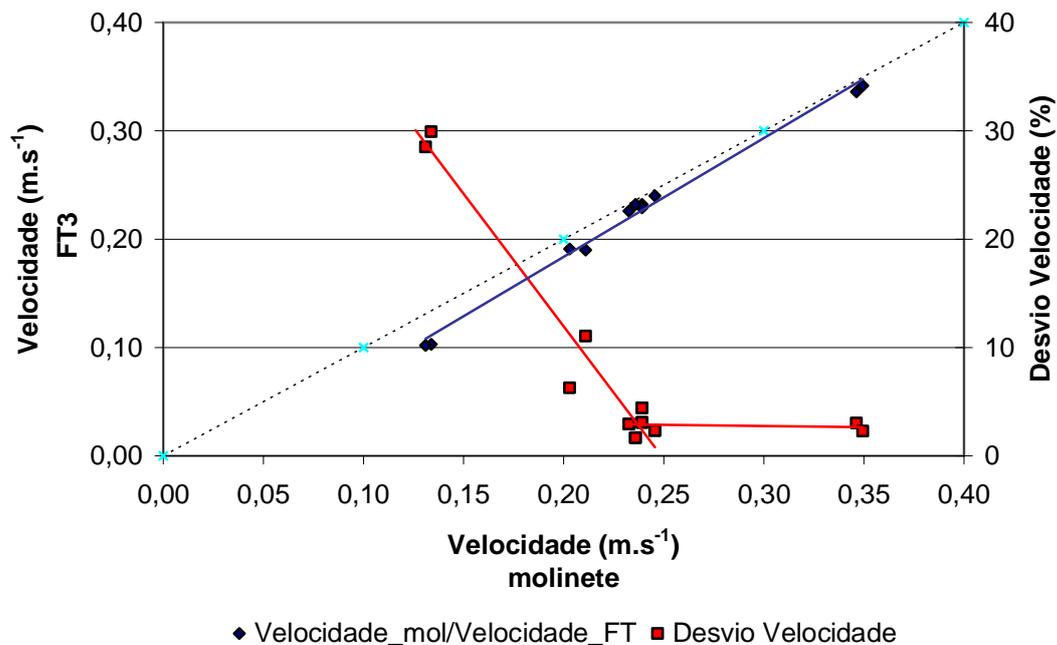


Figura 60. Velocidades medidas com molinete e Flo-Tote3 (FT3) e seus respectivos desvios

Considerando as velocidades medidas pelo Flo-Tote e molinete, em função da vazão estimada pelo vertedor triangular, nota-se que com o aumento da vazão, as velocidades medidas entre os equipamentos convergem (Figura 61). O aumento da vazão resulta na diminuição da interferência dos equipamentos no escoamento, diminuindo os erros nas medições de velocidade.

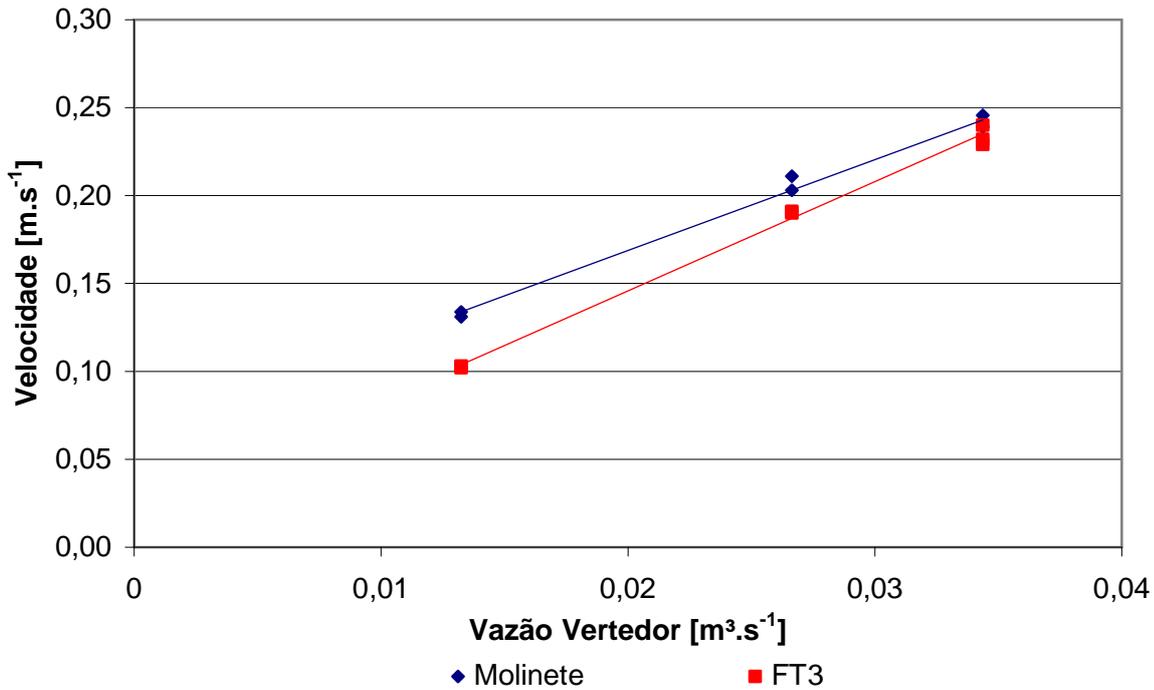


Figura 61. Velocidades medidas com molinete e Flo-Tote3 (FT3) em relação à vazão estimada pelo vertedor triangular

Com os resultados em laboratório, conclui-se que para velocidades superiores a  $0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  o molinete mede valores 3% maiores que as velocidades medidas pelo Flo-Tote. Essa situação ocorre no Ribeirão da Onça, com velocidades maiores que  $0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Compara-se os valores de vazão estimados pelo vertedor triangular com as vazões calculadas por medições de velocidade com Flo-Tote, na Tabela 7 por dois métodos: a partir de velocidade medidas a 60% da profundidade na vertical com aplicação da técnica da meia-seção (Equação 35) e a partir de todas as velocidade medidas (Equação 36).

Tabela 7. Vazões estimadas pelo vertedor e Flo-Tote3 (FT3), para velocidades medidas a 60% da profundidade e para todas as velocidades medidas na seção (discretizadas)

Canal de 0,40 metros de largura

| Vazão ( $l.s^{-1}$ ) |          |       |          |              |          |
|----------------------|----------|-------|----------|--------------|----------|
| Medições             | Vertedor | FT3   |          |              |          |
|                      |          | 0,6.h | Desvio % | Discretizada | Desvio % |
| 1                    | 2,94     | 2,63  | -10,52   | 2,73         | -7,27    |
| 2                    | 13,10    | 12,46 | -4,93    | 11,77        | -10,14   |
| 3                    | 26,28    | 25,60 | -2,61    | 24,81        | -5,60    |
| 4                    | 33,88    | 33,44 | -1,29    | 30,62        | -9,61    |

Canal de 0,20 metros de largura/Vazão variável

| Vazão ( $l.s^{-1}$ ) |          |       |          |              |          |
|----------------------|----------|-------|----------|--------------|----------|
| Medições             | Vertedor | FT3   |          |              |          |
|                      |          | 0,6.h | Desvio % | Discretizada | Desvio % |
| 1                    | 9,29     | 10,08 | 8,46     | 9,96         | 7,16     |
| 2                    | 13,10    | 13,48 | 2,89     | 13,17        | 0,53     |
| 3                    | 26,28    | 27,39 | 4,21     | 26,99        | 2,71     |

Canal de 0,20 metros de largura/Vazão constante

| Vazão ( $l.s^{-1}$ ) |          |       |          |              |          |
|----------------------|----------|-------|----------|--------------|----------|
| Medições             | Vertedor | FT3   |          |              |          |
|                      |          | 0,6.h | Desvio % | Discretizada | Desvio % |
| 1                    | 13,10    | 14,13 | 7,83     | 14,03        | 7,05     |
| 2                    | 13,10    | 13,49 | 2,98     | 13,37        | 2,01     |
| 3                    | 13,10    | 13,54 | 3,35     | 13,01        | -0,72    |

Segundo a Tabela 7, os valores de vazão calculada pelo método discretizado com velocidades medidas pelo Flo-Tote3, apresentam menores desvios, devido ao maior número de pontos medidos na seção. Para o caso, as vazões estimadas pelo vertedor são consideradas como referência, por ser mais preciso que o método de medição de velocidade e estimativa de vazão com o método de meia-seção.

### 5.1.4 Isotáquias

Para cada relação  $B/H$ , foram determinadas as isotáquias (Figuras 62 e 63), para três métodos de cálculo das velocidades médias e para o canal de 0,20 metros de largura usando as Equações 34 a 36.

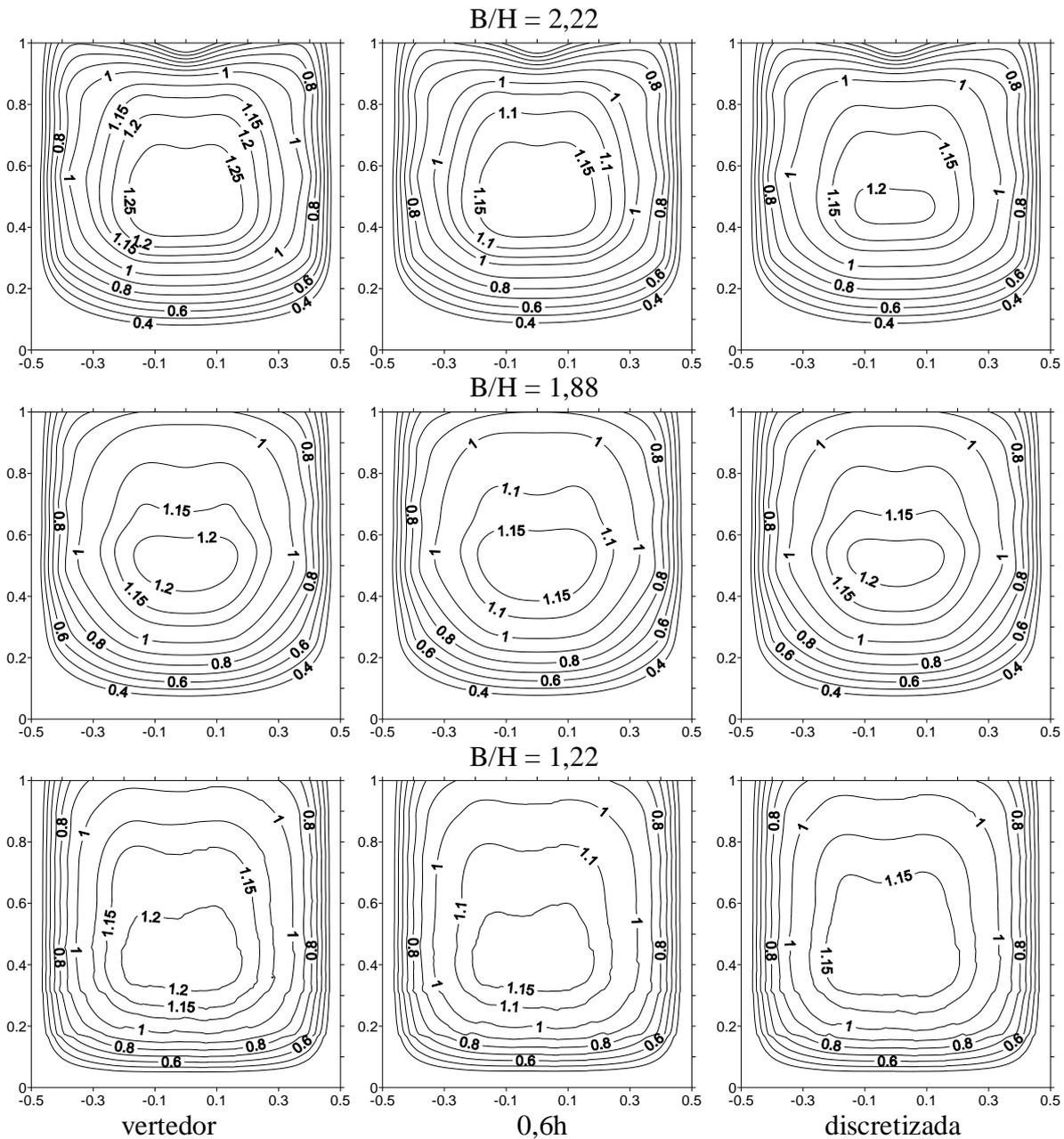


Figura 62. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal de 0,20m.  $B/H = 2,22; 1,88; 1,22$ ; Ordenadas  $y/H$  e Abscissas  $z/B$ , em que:  $y$  - lâmina d'água para um ponto qualquer;  $H$  - lâmina d'água total;  $z$  - distância de um ponto qualquer até a parede lateral do canal;  $B$  - largura total do canal

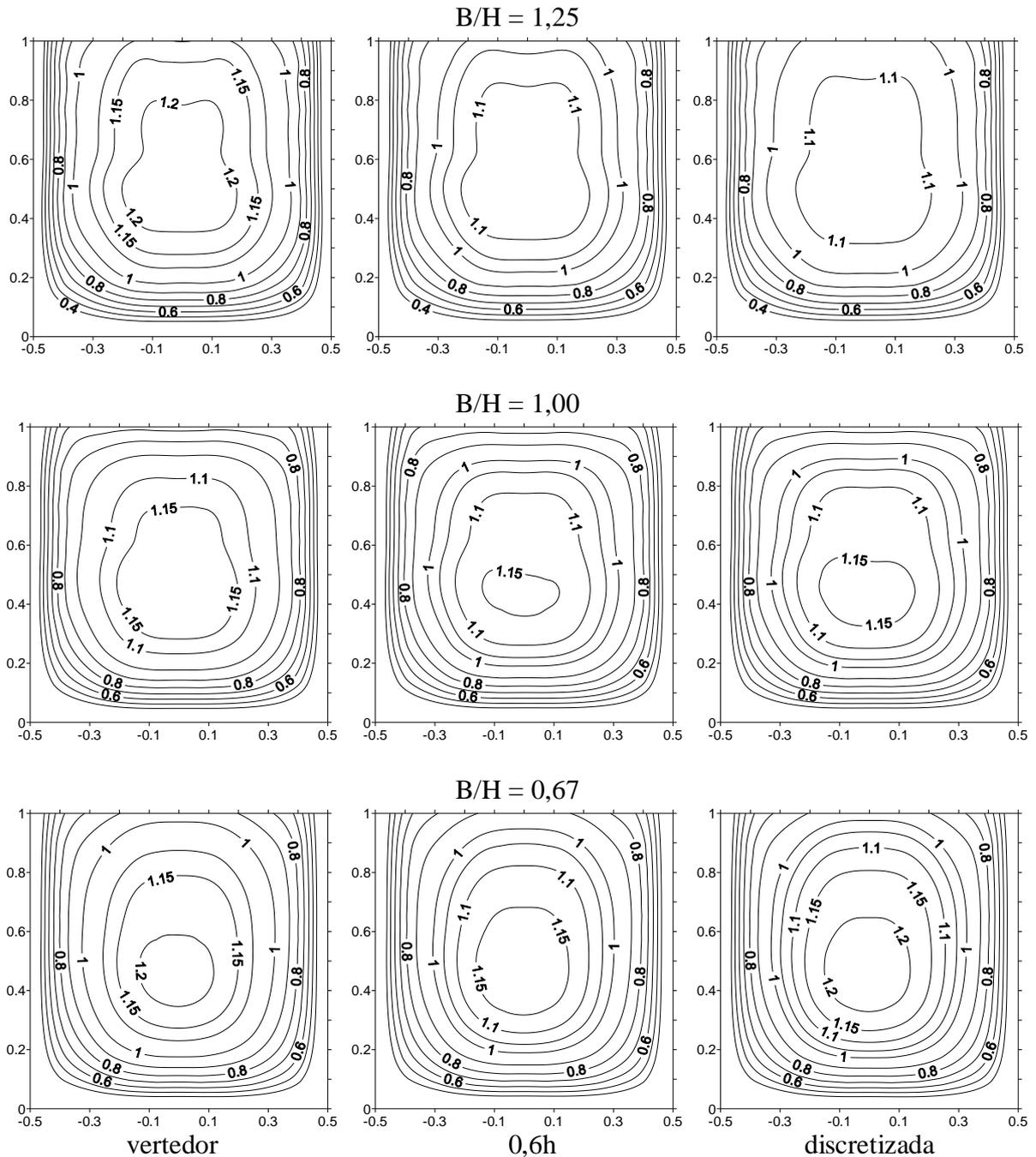


Figura 63. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal de 0,20m.  $B/H = 1,25; 1,00; 0,67$ , Ordenadas  $y/H$  e Abscissas  $z/B$ , em que:  $y$  - lâmina d'água para um ponto qualquer;  $H$  - lâmina d'água total;  $z$  - distância de um ponto qualquer até a parede lateral do canal;  $B$  - largura total do canal

### 5.1.5 Aplicação do método das isotáquias

Adotando as velocidades medidas para  $B/H = 1,25$  no canal de 0,20 metros de largura, indicados na Tabela 8, foi verificado o método das isotáquias, Equação 33, para as isotáquias  $B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67$ , apresentadas nas Figuras 63 e 64.

Tabela 8. Velocidades pontuais para  $B/H = 1,25$  e canal de 0,20 metros de largura

| Distância lateral (m) | Profundidade (m) | Velocidade ( $m.s^{-1}$ ) | Nível (m) | $z/B$ (adimensional) | $y/H$ (adimensional) |
|-----------------------|------------------|---------------------------|-----------|----------------------|----------------------|
| 0,020                 | 0,0283           | 0,353                     | 0,172     | -0,400               | 0,165                |
| 0,070                 | 0,0283           | 0,422                     | 0,172     | -0,150               | 0,165                |
| 0,120                 | 0,0283           | 0,402                     | 0,173     | 0,100                | 0,164                |
| 0,155                 | 0,0283           | 0,374                     | 0,173     | 0,275                | 0,164                |
| 0,020                 | 0,0533           | 0,406                     | 0,149     | -0,400               | 0,306                |
| 0,070                 | 0,0533           | 0,438                     | 0,149     | -0,150               | 0,306                |
| 0,120                 | 0,0533           | 0,425                     | 0,148     | 0,100                | 0,308                |
| 0,155                 | 0,0533           | 0,418                     | 0,149     | 0,275                | 0,306                |
| 0,020                 | 0,0669           | 0,417                     | 0,134     | -0,400               | 0,388                |
| 0,070                 | 0,0669           | 0,439                     | 0,134     | -0,150               | 0,388                |
| 0,120                 | 0,0669           | 0,424                     | 0,134     | 0,100                | 0,388                |
| 0,155                 | 0,0669           | 0,413                     | 0,134     | 0,275                | 0,388                |
| 0,020                 | 0,0783           | 0,411                     | 0,123     | -0,400               | 0,453                |
| 0,070                 | 0,0783           | 0,425                     | 0,123     | -0,150               | 0,453                |
| 0,120                 | 0,0783           | 0,437                     | 0,123     | 0,100                | 0,453                |
| 0,155                 | 0,0783           | 0,433                     | 0,123     | 0,275                | 0,453                |
| 0,020                 | 0,1033           | 0,420                     | 0,098     | -0,400               | 0,597                |
| 0,070                 | 0,1033           | 0,434                     | 0,098     | -0,150               | 0,597                |
| 0,120                 | 0,1033           | 0,434                     | 0,098     | 0,100                | 0,597                |
| 0,155                 | 0,1033           | 0,426                     | 0,098     | 0,275                | 0,597                |
| 0,020                 | 0,1283           | 0,425                     | 0,073     | -0,400               | 0,742                |
| 0,070                 | 0,1283           | 0,437                     | 0,073     | -0,150               | 0,742                |
| 0,120                 | 0,1283           | 0,440                     | 0,073     | 0,100                | 0,742                |
| 0,155                 | 0,1283           | 0,430                     | 0,073     | 0,275                | 0,742                |
| 0,020                 | 0,1533           | 0,407                     | 0,047     | -0,400               | 0,891                |
| 0,070                 | 0,1533           | 0,439                     | 0,047     | -0,150               | 0,891                |
| 0,120                 | 0,1533           | 0,411                     | 0,047     | 0,100                | 0,891                |
| 0,155                 | 0,1533           | 0,398                     | 0,047     | 0,275                | 0,891                |

Por exemplo, para o ponto a 0,120 metros da lateral do canal, profundidade de 0,0533 metros do fundo, foi medida uma velocidade de  $0,425 m.s^{-1}$ . Para essa situação, a área é de  $0,0345 m^2$ . Usando as isotáquias construídas para  $B/H = 1,00$  da Figura 64, o valor da  $c_i$  é de 1,141 ( $z/B = 0,100$  e  $y/H = 0,308$ ). Aplicando o valor da isotáquia  $c_i$ , a velocidade medida  $v_{med}$  e da área molhada  $A$ , a vazão é calculada pelo método das isotáquias, Equação 33:

$$Q = A \left( \frac{v_{med}}{c_i} \right) \rightarrow Q = 0,0345 \left( \frac{0,425}{1,141} \right) \rightarrow Q = 12,88 l.s^{-1}$$

A vazão estimada pelo vertedor para  $B/H = 1,25$  é de  $13,11 \text{ l.s}^{-1}$ , resultando em um desvio de vazão de 1,65% para o método das isotáquias. Seguindo este procedimento, foram calculadas as vazões (Figura 64) e os desvios de vazões (Figura 65) para todos os pontos de medição ( $B/H = 1,25$ ) usando as isotáquias  $B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67$ , das Figuras 62 e 63.

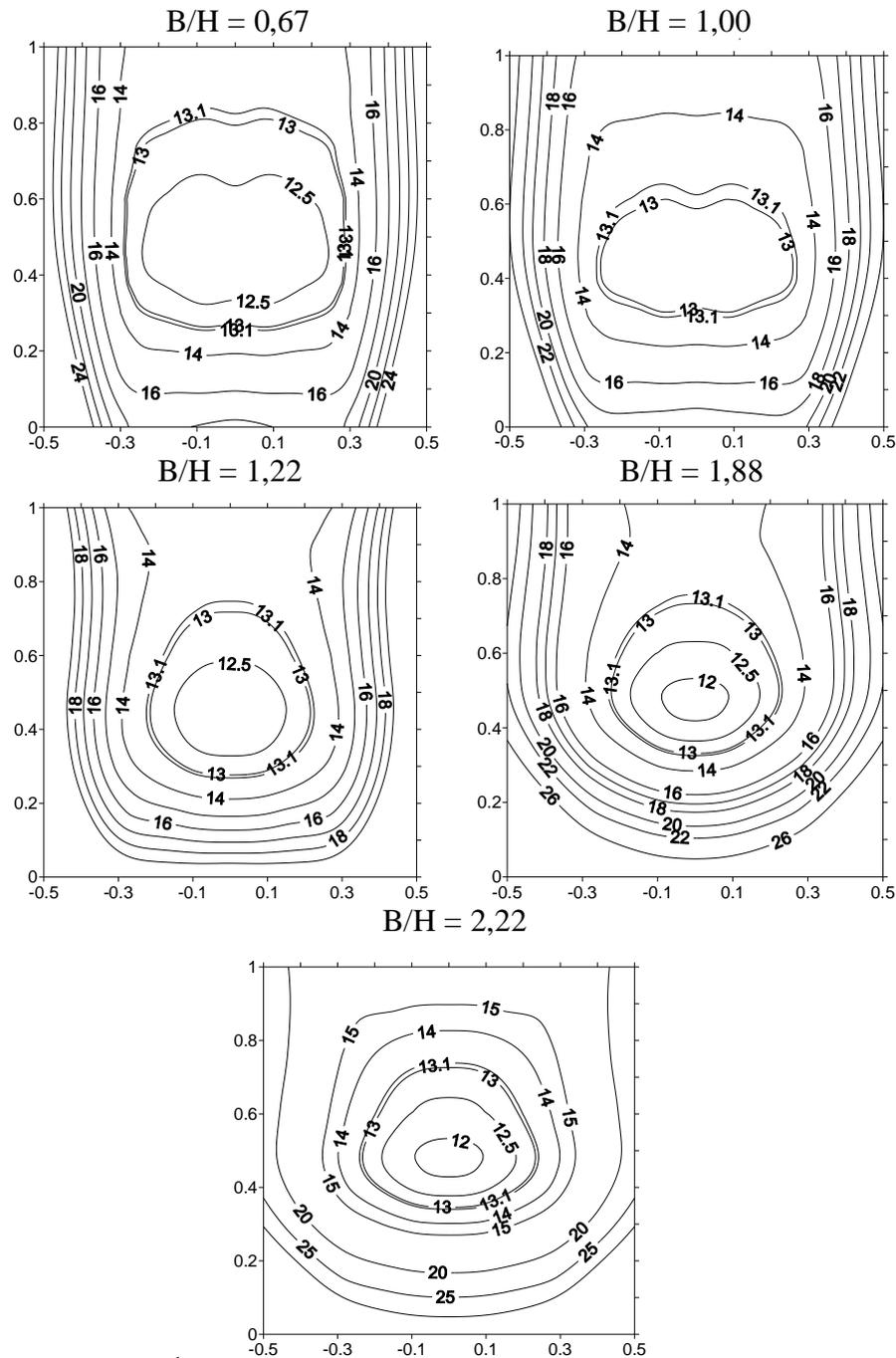


Figura 64. Vazões ( $\text{l.s}^{-1}$ ) calculadas pelo método das isotáquias (Equação 33) usando velocidades medidas com o Flo-Tote3 para  $B/H = 1,25$ , aplicando as isotáquias  $B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67$ , das Figuras 63 e 64, Ordenadas  $y/H$  e Abscissas  $z/B$

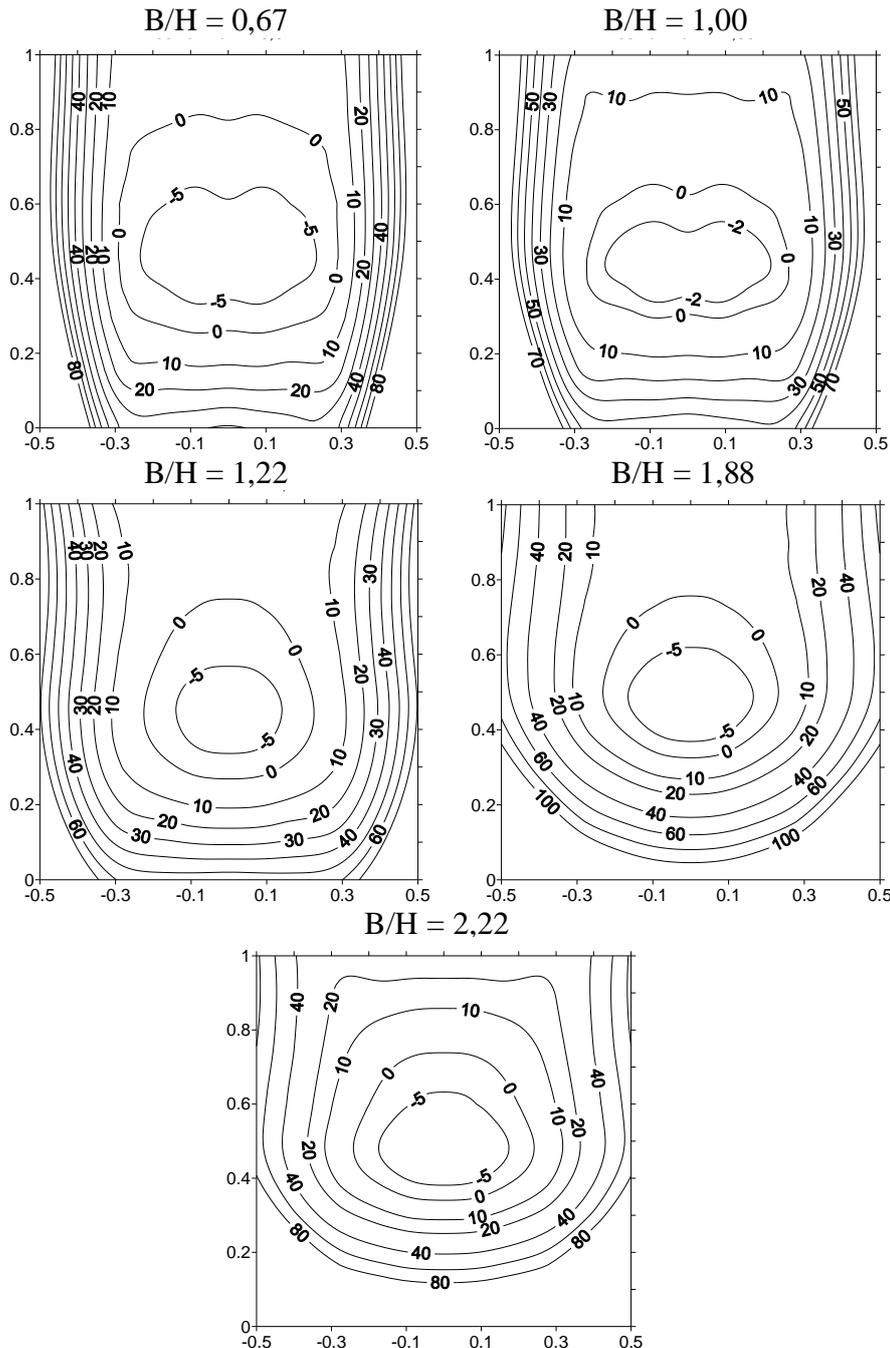


Figura 65. Desvio (%) de vazões calculadas pelo método das isotáquias (Eq. 33) com velocidades medidas com o Flo-Tote3 para  $B/H = 1,25$ , aplicando as isotáquias  $B/H=2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67$  (Figuras 62 e 63), Ordenadas  $y/H$  e Abscissas  $z/B$

Segundo as Figuras 64 e 65, o método das isotáquias funcionou com algumas ressalvas. Para os pontos localizados na região central do canal, a vazão calculada pelo método das isotáquias aproxima-se dos valores indicados pelo vertedor. Entretanto, para os valores localizados próximos à parede do canal, as vazões calculadas tem altos desvios, de até 100% da vazão vertida. Os desvios são causados pela interferência no escoamento devido à intrusão do equipamento próximo à parede do canal e pela interpolação dos dados para a construção das isotáquias.

## 5.2 Ribeirão da Onça

A área de estudo localiza-se na Bacia do Ribeirão da Onça, município de Brotas, SP. Na bacia foi escolhida uma estação fluviométrica e estabilizada a seção para realizar medições de vazão com o auxílio do molinete, vertedor circular, equações teóricas para bueiro e método das isotáquias, conforme descrito na seção 4.2.

### 5.2.1 Molinete

A vazão na Bacia do Ribeirão da Onça está sendo monitorada quinzenalmente desde 2004 (Barreto, 2006). O presente trabalho teve início em janeiro de 2007, utilizando o método da meia seção e seção média para o cálculo da vazão (Tabelas 9, 10 e 11).

Tabela 9. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2007

| Datas     | Local | Vazão ( $m^3.s^{-1}$ ) |               | Datas      | Local | Vazão ( $m^3.s^{-1}$ ) |               |
|-----------|-------|------------------------|---------------|------------|-------|------------------------|---------------|
|           |       | Seção-<br>média        | meia<br>seção |            |       | seção-<br>média        | meia<br>seção |
| 1/2/2007  | Ponte | 1,41                   |               | 27/7/2007  | Ponte | 0,75                   |               |
| 1/2/2007  | Nova  | 1,06                   |               | 13/8/2007  | Ponte | 0,55                   |               |
| 15/2/2007 | Ponte | 1,41                   |               | 27/8/2007  | Ponte | 0,57                   |               |
| 15/2/2007 | Nova  | 1,31                   |               | 10/9/2007  | Ponte | 0,58                   |               |
| 6/3/2007  | Ponte | 1,20                   |               | 19/9/2007  | Ponte | 0,48                   |               |
| 15/3/2007 | Ponte | 1,12                   |               | 19/9/2007  | M.A.* | 0,49                   |               |
| 29/3/2007 | Ponte | 0,99                   |               | 3/10/2007  | Ponte | 0,41                   |               |
| 9/4/2007  | Ponte | 0,87                   |               | 3/10/2007  | M.A.* | 0,41                   |               |
| 23/4/2007 | Ponte | 0,59                   |               | 15/10/2007 | Ponte | 0,49                   |               |
| 7/5/2007  | Ponte | 0,70                   |               | 15/10/2007 | M.A.* | 0,50                   |               |
| 18/5/2007 | Ponte | 0,54                   |               | 24/10/2007 | Ponte | 0,61                   |               |
| 4/6/2007  | Ponte | 1,02                   |               | 6/11/2007  | Ponte | 0,63                   |               |
| 18/6/2007 | Ponte | 0,65                   |               | 21/11/2007 | Ponte | 0,55                   |               |
| 18/6/2007 | Ponte | 0,61                   |               | 6/12/2007  | Ponte | 1,10                   |               |
| 16/7/2007 | Ponte | 0,79                   |               | 19/12/2007 | Ponte | 0,67                   |               |

\*Fazenda Monte Alegre

Tabela 10. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2008, sendo MS – meia seção e SM – seção média

| Datas     | Local | MS-SM                                    |               |      | Datas      | Local     | MS-SM                                    |               |      |
|-----------|-------|--|---------------|------|------------|-----------|--|---------------|------|
|           |       | Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) |               | SM   |            |           | Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) |               | SM   |
|           |       | seção-<br>média                          | meia<br>seção | %    |            |           | seção-<br>média                          | meia<br>seção | %    |
| 9/1/2008  | Ponte | 0,57                                     | 0,57          | 1,22 | 5/9/2008   | Ponte     | 0,42                                     | 0,42          | 0,71 |
| 23/1/2008 | Ponte | 0,57                                     | 0,57          | 0,00 | 10/9/2008  | Ponte     | 0,50                                     | 0,50          | 1,00 |
| 28/2/2008 | Ponte | 0,73                                     | 0,75          | 1,74 | 11/9/2008  | Ponte     | 0,46                                     | 0,46          | 0,65 |
| 12/3/2008 | Ponte | 1,14                                     | 1,20          | 2,65 | 19/9/2008  | Ponte     | 0,57                                     | 0,57          | 0,70 |
| 27/3/2008 | Ponte | 0,85                                     | 0,86          | 0,82 | 3/10/2008  | Ponte     | 0,94                                     | 0,95          | 0,84 |
| 10/4/2008 | Ponte | 0,79                                     | 0,80          | 1,87 | 24/10/2008 | Ponte_J*  | 0,52                                     | 0,53          | 0,95 |
| 30/4/2008 | Ponte | 1,74                                     | 1,76          | 1,14 | 24/10/2008 | Ponte_M** | 0,50                                     | 0,51          | 0,98 |
| 14/5/2008 | Ponte | 0,71                                     | 0,71          | 0,14 | 7/11/2008  | Ponte     | 0,89                                     | 0,90          | 1,11 |
| 28/5/2008 | Ponte | 0,56                                     | 0,57          | 0,70 | 21/11/2008 | Ponte     | 0,51                                     | 0,52          | 1,35 |
| 11/6/2008 | Ponte | 0,53                                     | 0,54          | 1,68 | 5/12/2008  | Ponte     | 0,61                                     | 0,62          | 1,14 |
| 25/6/2008 | Ponte | 0,68                                     | 0,68          | 0,59 | 18/12/2008 | Ponte     | 0,48                                     | 0,49          | 0,82 |
| 11/7/2008 | Ponte | 0,57                                     | 0,57          | 1,05 | 23/12/2008 | Ponte     | 0,77                                     | 0,78          | 1,41 |
| 24/7/2008 | Ponte | 0,62                                     | 0,63          | 0,96 | 30/12/2008 | Ponte     | 0,72                                     | 0,72          | 0,42 |
| 8/8/2008  | Ponte | 0,65                                     | 0,66          | 0,91 | 31/12/2008 | Ponte     | 0,71                                     | 0,71          | 0,42 |
| 22/8/2008 | Ponte | 0,66                                     | 0,66          | 1,36 |            |           |  |               |      |

\*Jusante da Ponte

\*\*Montante da Ponte

Tabela 11. Estimativas de vazão com molinete para o ano de 2009, sendo MS – meia seção e SM – seção média

| Datas     | Local | MS-SM                                    |               |      |
|-----------|-------|--|---------------|------|
|           |       | Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) |               | SM   |
|           |       | seção-<br>média                          | meia<br>seção | %    |
| 3/1/2009  | Ponte | 1,71                                     | 1,72          | 0,12 |
| 9/1/2009  | Ponte | 0,64                                     | 0,64          | 1,09 |
| 23/1/2009 | Ponte | 0,60                                     | 0,61          | 0,66 |
| 6/2/2009  | Ponte | 0,73                                     | 0,74          | 1,09 |
| 20/2/2009 | Ponte | 0,76                                     | 0,76          | 0,26 |
| 24/2/2009 | Ponte | 0,72                                     | 0,72          | 0,42 |
| 25/2/2009 | Ponte | 0,83                                     | 0,83          | 0,36 |
| 26/2/2009 | Ponte | 1,01                                     | 1,01          | 0,30 |
| 26/2/2009 | Ponte | 1,10                                     | 1,10          | 0,27 |
| 6/3/2009  | Ponte | 0,62                                     | 0,62          | 1,28 |
| 20/3/2009 | Ponte | 0,71                                     | 0,71          | 0,56 |
| 24/3/2009 | Ponte | 0,69                                     | 0,70          | 1,42 |
| 3/4/2009  | Ponte | 0,60                                     | 0,60          | 0,83 |
| 9/4/2009  | Ponte | 0,65                                     | 0,66          | 1,06 |
| 16/4/2009 | Ponte | 0,65                                     | 0,66          | 1,36 |
| 7/5/2009  | Ponte | 0,52                                     | 0,53          | 0,95 |
| 15/5/2009 | Ponte | 0,62                                     | 0,62          | 1,13 |
| 21/5/2009 | Ponte | 0,51                                     | 0,51          | 1,17 |

As vazões medidas entre janeiro de 2007 e maio de 2009 variaram de 0,41 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a 1,71 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. A diferença percentual entre os resultados obtidos pelos dois métodos para

estimativa de vazão foi em média de 0,93%, variando de 0 a 2,65%. Adotou-se o método de meia seção para o cálculo de vazão, por ser o método mais utilizado e por utilizar a velocidade medida, ao invés da média das velocidades utilizada pelo método da seção média.

### 5.2.2 Vertedor

Para verificar as estimativas de vazão com molinete no Ribeirão da Onça na mesma data, foram realizadas 6 medições de vazão com o vertedor circular e com o molinete, (Tabela 12).

Tabela 12. Medições de vazão com o vertedor circular e o molinete

| Datas      | Vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |          | Desvio (%) | Tempo (h) |       |         |
|------------|--|----------|------------|-----------|-------|---------|
|            | Molinete                                   | Vertedor |            | Início    | Fim   | Duração |
| 19/8/2008  |  | 0,480    | -          | 14:15     | 17:30 | 03:15   |
| 11/9/2008  | 0,460*                                     | 0,611    | -          | 10:00     | 16:45 | 06:45   |
| 24/10/2008 | 0,523                                      | 0,476    | 8,99       | 10:45     | 14:45 | 04:00   |
| 5/12/2008  | 0,635                                      | 0,537    | 15,43      | 09:30     | 15:10 | 05:40   |
| 23/12/2008 | 0,803                                      | 0,683    | 14,94      | 10:05     | 17:20 | 07:15   |
| 6/2/2009   | 0,767                                      | 0,742    | 3,26       |           |       |         |

\*vazão influenciada pelo bombeamento a jusante da seção.

Para a medição de vazão no dia 11/9/2008, a medição de vazão com o molinete foi influenciada pelo bombeamento, situado a jusante da seção fluviométrica.

As vazões obtidas pelo vertedor são menores, comparadas às vazões obtidas pelo molinete, pois houve vazamentos laterais. Como a parede de concreto não é uma superfície lisa, deu origem a caminhos preferenciais para a água na interface parede de concreto e o vertedor. As vazões obtidas pelo molinete foram de 3 a 15% maiores que as vazões obtidas pelo vertedor circular.

Os valores de vazão calculados através dos vertedores fundamentam-se nos valores de carga hidráulica (h). Se houver erros na leitura desses valores, o resultado final pode ser afetado. Assim, foram calculadas as vazões, variando de 1 a 2 centímetros no valor da carga hidráulica (h).

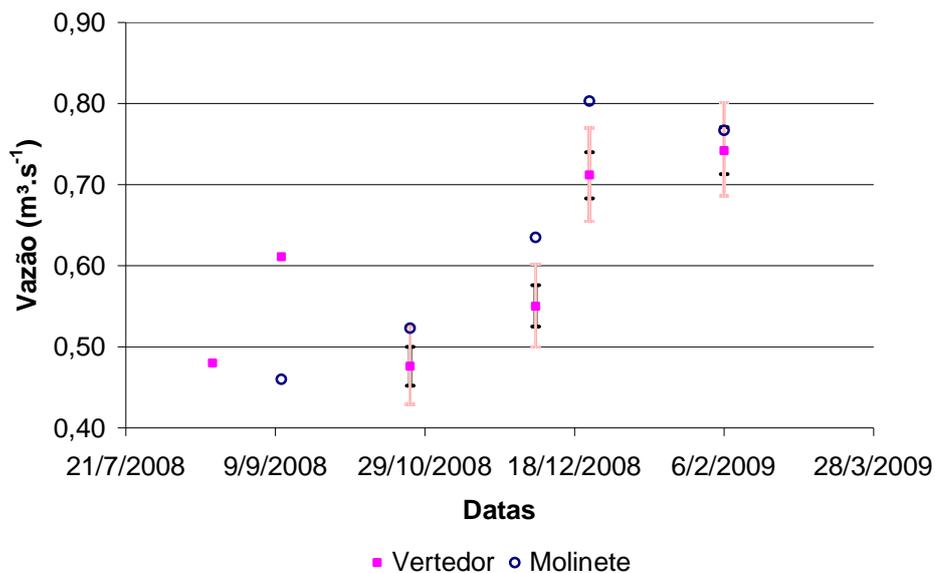


Figura 66 – Comparação das vazões estimadas pelo vertedor circular e pelo molinete hidrométrico. Variação de 1 cm (linha contínua) e 2 cm (linha tracejada)

Segundo os dados da Figura 66, o vertedor não foi o melhor método para verificar as vazões estimadas pelo molinete, devido ao vazamento que ocorreu entre o vertedor e a parede de concreto. Apesar de utilizar borrachas na interface vertedor/parede de concreto, não foi suficiente para sua total vedação. Além disso, há o erro inserido na leitura da lâmina d'água e da cota do vertedor, sendo que erros de 1 ou 2 cm podem afetar a qualidade da estimativa de vazão, Figura 66.

### 5.2.3 Equações teóricas

O cálculo de vazão a partir de equações teóricas depende de dados reais confiáveis, como o nível d'água. Deste modo, a estação fluviométrica na Bacia do Ribeirão da Onça tem um linígrafo que contém o equipamento Floater (bóia e contrapeso) e um Diver (transdutor de pressão). Os dois equipamentos foram instalados no mesmo linígrafo para não haver problemas de perda de dados. Além disso, são realizadas leituras quinzenais manuais de nível no linígrafo e na régua linimétrica, para acompanhar os dados automáticos e foi instalado o Flo-Tote para medir de modo contínuo o nível d'água e velocidades. Deste modo, foram aplicadas as Equações 50, 51, 52 e 59, utilizando valores de nível e calculadas as vazões para os dois tubos de concreto de 1,5 metros de diâmetro, comparando com as vazões estimadas pelo molinete (Tabela 13).

Tabela 13. Valores de vazões obtidas pelo molinete e por equações teóricas

| Data       | Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )<br>Molinete | Equação 50   |                          | Equação 51   |                          | Equação 52   |                          | Equação 59   |                          |
|------------|--|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
|            |  | Esc. Crítico   |                          | Vertedor Circular                                    |                          | Canal Ideal  |                          | Canal com perdas                                     |                          |
|            |  | Q <sub>e</sub><br>(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $\frac{Q_e-Q}{Q}$<br>(%) | Q <sub>e</sub><br>(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $\frac{Q_e-Q}{Q}$<br>(%) | Q <sub>e</sub><br>(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $\frac{Q_e-Q}{Q}$<br>(%) | Q <sub>e</sub><br>(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $\frac{Q_e-Q}{Q}$<br>(%) |
| 21/11/2007 | 0,55   | 0,70   | 26,40                    | 0,76   | 37,70                    | 0,67   | 20,53                    | 0,58   | 4,93                     |
| 6/12/2007  | 1,10   | 1,29   | 17,10                    | 1,36   | 23,23                    | 1,22   | 11,11                    | 1,06   | -3,27                    |
| 19/12/2007 | 0,67   | 0,84   | 26,27                    | 0,91   | 35,72                    | 0,80   | 19,85                    | 0,70   | 4,34                     |
| 9/1/2008   | 0,57   | 0,80   | 40,41                    | 0,87   | 51,53                    | 0,77   | 33,53                    | 0,67   | 16,24                    |
| 23/1/2008  | 0,57   | 0,79   | 37,16                    | 0,85   | 48,09                    | 0,75   | 30,36                    | 0,65   | 13,48                    |
| 28/2/2008  | 0,75   | 0,94   | 25,61                    | 1,00   | 34,32                    | 0,89   | 19,23                    | 0,77   | 3,80                     |
| 12/3/2008  | 1,17   | 1,29   | 10,02                    | 1,35   | 15,68                    | 1,22   | 4,28                     | 1,06   | -9,22                    |
| 27/3/2008  | 0,86   | 0,95   | 10,57                    | 1,01   | 18,27                    | 0,90   | 5,05                     | 0,78   | -8,55                    |
| 10/4/2008  | 0,80   | 0,90   | 11,91                    | 0,96   | 19,95                    | 0,85   | 6,26                     | 0,74   | -7,50                    |
| 30/4/2008  | 1,76   | 1,65   | -6,20                    | 1,72   | -2,48                    | 1,57   | -11,00                   | 1,36   | -22,52                   |
| 14/5/2008  | 0,71   | 0,79   | 10,42                    | 0,85   | 19,22                    | 0,75   | 4,94                     | 0,65   | -8,64                    |
| 28/5/2008  | 0,57   | 0,75   | 32,20                    | 0,81   | 43,32                    | 0,72   | 25,88                    | 0,62   | 9,59                     |
| 25/6/2008  | 0,68   | 0,80   | 18,36                    | 0,87   | 27,68                    | 0,77   | 12,52                    | 0,67   | -2,05                    |
| 11/7/2008  | 0,57   | 0,77   | 34,23                    | 0,83   | 45,45                    | 0,73   | 27,89                    | 0,64   | 11,34                    |
| 24/7/2008  | 0,63   | 0,72   | 15,58                    | 0,79   | 25,73                    | 0,69   | 10,23                    | 0,60   | -4,04                    |
| 8/8/2008   | 0,66   | 0,82   | 24,74                    | 0,89   | 34,54                    | 0,78   | 18,69                    | 0,68   | 3,33                     |
| 22/8/2008  | 0,66   | 0,77   | 15,63                    | 0,83   | 25,30                    | 0,73   | 10,17                    | 0,64   | -4,09                    |
| 5/9/2008   | 0,42   | 1,30   | <b>207,37</b>            | 1,37   | <b>222,85</b>            | 1,23   | <b>191,21</b>            | 1,07   | <b>153,51</b>            |
| 11/9/2008  | 0,46   | 1,47   | <b>218,25</b>            | 1,54   | <b>232,79</b>            | 1,40   | <b>202,04</b>            | 1,22   | <b>162,94</b>            |
| 19/9/2008  | 0,57   | 1,34   | <b>134,42</b>            | 1,40   | <b>145,92</b>            | 1,27   | <b>122,11</b>            | 1,10   | <b>93,36</b>             |
| 3/10/2008  | 0,95   | 1,67   | <b>75,52</b>             | 1,74   | <b>82,47</b>             | 1,58   | <b>66,63</b>             | 1,38   | <b>45,06</b>             |
| 24/10/2008 | 0,53   | 0,64   | 22,35                    | 0,69   | 31,65                    | 0,60   | 14,68                    | 0,53   | -0,16                    |
| 7/11/2008  | 0,90   | 1,00   | 10,10                    | 1,06   | 17,25                    | 0,94   | 4,39                     | 0,82   | -9,12                    |
| 21/11/2008 | 0,52   | 0,57   | 9,56                     | 0,63   | 21,19                    | 0,55   | 5,04                     | 0,47   | -8,56                    |
| 5/12/2008  | 0,62   | 0,60   | -2,35                    | 0,66   | 7,48                     | 0,57   | -6,60                    | 0,50   | -18,69                   |
| 18/12/2008 | 0,49   | 0,63   | 30,04                    | 0,69   | 42,46                    | 0,60   | 24,10                    | 0,53   | 8,04                     |
| 23/12/2008 | 0,78   | 0,88   | 12,28                    | 0,94   | 20,57                    | 0,83   | 6,70                     | 0,73   | -7,11                    |
| 30/12/2008 | 0,72   | 0,80   | 11,90                    | 0,87   | 20,76                    | 0,77   | 6,41                     | 0,67   | -7,36                    |
| 31/12/2008 | 0,71   | 0,80   | 13,00                    | 0,87   | 21,94                    | 0,77   | 7,46                     | 0,67   | -6,45                    |
| 3/1/2009   | 1,72   | 1,67   | -2,73                    | 1,74   | 1,13                     | 1,58   | -7,66                    | 1,38   | -19,61                   |
| 9/1/2009   | 0,64   | 0,66   | 3,36                     | 0,73   | 13,11                    | 0,64   | -1,23                    | 0,55   | -14,01                   |
| 23/1/2009  | 0,60   | 0,73   | 21,55                    | 0,80   | 31,85                    | 0,70   | 15,67                    | 0,61   | 0,70                     |
| 6/2/2009   | 0,74   | 0,84   | 14,43                    | 0,91   | 22,99                    | 0,80   | 8,62                     | 0,70   | -5,44                    |
| 20/2/2009  | 0,76   | 0,97   | 28,64                    | 0,98   | 29,62                    | 0,87   | 14,95                    | 0,76   | 0,07                     |
| 24/2/2009  | 0,72   | 0,84   | 16,79                    | 0,91   | 25,90                    | 0,80   | 11,18                    | 0,70   | -3,21                    |
| 25/2/2009  | 0,83   | 0,88   | 5,67                     | 0,94   | 13,46                    | 0,83   | 0,41                     | 0,73   | -12,59                   |
| 26/2/2009  | 1,01   | 1,12   | 10,71                    | 1,18   | 17,26                    | 1,06   | 4,99                     | 0,92   | -8,60                    |
| 26/2/2009  | 1,10   | 1,20   | 9,23                     | 1,27   | 15,22                    | 1,14   | 3,53                     | 0,99   | -9,87                    |
| 6/3/2009   | 0,62   | 0,78   | 25,76                    | 0,85   | 36,22                    | 0,75   | 19,91                    | 0,65   | 4,39                     |
| 20/3/2009  | 0,71   | 0,95   | 34,29                    | 1,02   | 43,50                    | 0,91   | 27,51                    | 0,79   | 11,00                    |
| 24/3/2009  | 0,70   | 0,88   | 24,91                    | 0,94   | 34,12                    | 0,83   | 18,69                    | 0,73   | 3,33                     |
| 3/4/2009   | 0,60   | 0,80   | 33,19                    | 0,87   | 43,75                    | 0,77   | 26,68                    | 0,67   | 10,28                    |
| 9/4/2009   | 0,66   | 0,80   | 22,26                    | 0,87   | 31,95                    | 0,77   | 16,28                    | 0,67   | 1,23                     |
| 16/4/2009  | 0,66   | 0,70   | 26,40                    | 0,76   | 37,70                    | 0,67   | 20,53                    | 0,58   | 4,93                     |
| 7/5/2009   | 0,53   | 1,29   | 17,10                    | 1,36   | 23,23                    | 1,22   | 11,11                    | 1,06   | -3,27                    |
| 15/5/2009  | 0,62   | 0,84   | 26,27                    | 0,91   | 35,72                    | 0,80   | 19,85                    | 0,70   | 4,34                     |

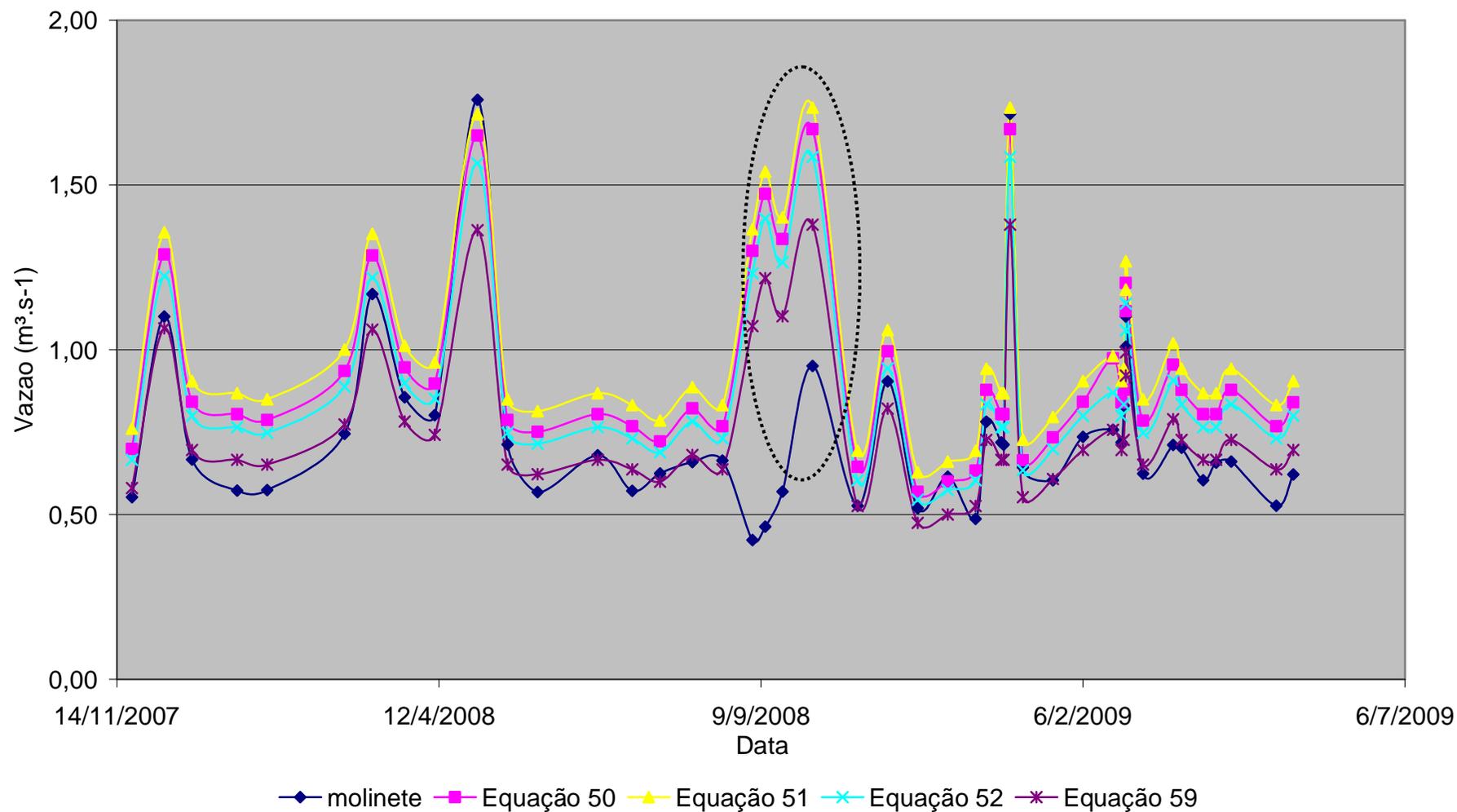


Figura 67. Vazões estimadas através de equações teóricas e molinete, para o período de 21/11/2007 a 15/5/2009. Os valores que estão inseridos na elipse tracejada referem-se a períodos que houve interferência do represamento da água a jusante da seção

O Hidrograma da Figura 67 não deve ser considerado contínuo, porque baseia-se em vazões estimadas a cada 15 dias, em média. Até o dia 20/02/2009 a leitura de nível foi obtida medindo a distância do nível da lâmina d'água até a boca do tubo, no linígrafo. Após esta data, as leituras de nível foram realizadas através da régua linimétrica, devido à possibilidade de entupimento do linígrafo. Deste modo, lendo o valor da régua e medindo a lâmina d'água no linígrafo, pode-se notar alguma interferência, para posterior manutenção.

Segundo a Figura 67, as Equações 50, 51 e 52 superestimam a vazão, em comparação com o molinete, nas épocas de estiagem e cheia. Como o molinete foi calibrado em laboratório (velocidades comparadas com o Flo-Tote e vazões comparadas com o vertedor triangular), as Equações 50, 51 e 52 podem ser descartadas para o cálculo das vazões. A Equação 59 aproxima-se dos valores de vazão estimados pelo molinete, apesar de subestimar a vazão em épocas de cheia.

Deste modo, a Equação 59 aproxima-se das vazões medidas pelo molinete e pode ser utilizada como referência para o cálculo de vazão continuamente, a cada 15 minutos, desde dezembro de 2007. Entretanto, entre as datas de 5/9/2008 a 3/10/2008, inseridas no círculo tracejado da Figura 67, a seção de medição de vazão sofreu interferências do represamento da água a jusante da seção, para o bombeamento e irrigação da fazenda. Em épocas de estiagem, a administração da fazenda represa o ribeirão para bombear a água para a irrigação, ocasionando aumento do nível d'água e invalidando as equações teóricas de estimativa de vazão. Por isso há a discrepância entre os valores medidos pelo molinete e as vazões calculadas para o período indicado pelo círculo tracejado. A correlação entre as vazões estimadas pela Equação 59 e pelo molinete é de 0,93 (Figura 68).

Assim, descartando o período de represamento do ribeirão, a Equação 59 pode ser utilizada no cálculo de vazão, para todo o período desde o início das medições de nível no linígrafo (Dezembro de 2007).

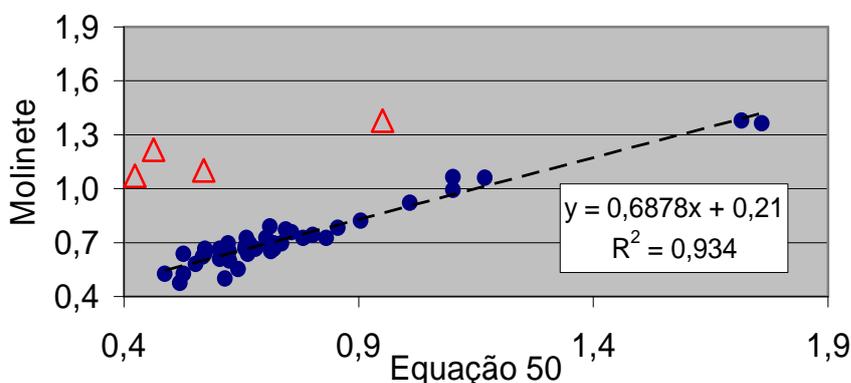


Figura 68. Correlação das vazões estimadas pela Equação 50 e molinete. Os triângulos vermelhos correspondem à situação de represamento a jusante da seção

As Figuras 69, 70 e 71 apresentam o nível d'água em formato de carga hidráulica a partir do fundo do tubo circular situado sob a ponte. As leituras de nível iniciaram com o auxílio do equipamento bóia e contrapeso, a cada 15 minutos, e leituras manuais, a cada 15 dias. Posteriormente, foi instalado o transdutor de pressão no mesmo linígrafo em que está situado o equipamento bóia e contrapeso. No início de novembro de 2008, o equipamento bóia e contrapeso parou de funcionar, provavelmente por término de bateria interna, por se tratar de um equipamento antigo. Em meados de setembro de 2008, foi instalado o Flo-Tote, mas o equipamento teve problemas de falta de energia e realizou medições de nível de 2 a 6 dias continuamente, apesar de o fabricante garantir uma durabilidade de 90 dias de funcionamento contínuo do equipamento. As medições de nível e velocidade do Flo-Tote voltavam a funcionar após a troca da bateria do equipamento. O processo de medições de nível em trechos ocorreu até fevereiro de 2009, quando foi instalado um painel solar, alimentando o equipamento diariamente. No final de abril de 2009, o lodo e sedimentos acumulados nos sensores do Flo-Tote3 ocasionou entupimento do transdutor de pressão. Apesar dos problemas que surgiram durante todo o período do estudo, não foram perdidos dados de níveis, devido à segurança de se ter instalado mais de um equipamento para funcionar simultaneamente.

Os dados de precipitação foram coletados até o dia 15/4/2009 pela Estação Climatológica do CRHEA. Devido ao início de uma reforma na estrutura da estação foi impossibilitado o repasse dos dados finais.

As setas nas figuras indicam os dias que foram instalados e retirados o vertedor circular para a estimativa de vazão. Deste modo, estes períodos não devem ser utilizados para a equação teórica (Equação 59), para o cálculo de vazão a partir do nível d'água.

Os valores de nível entre a metade do mês de agosto e a metade do mês de outubro, representam o período que houve represamento do nível d'água a jusante da seção de medição de vazão, para o bombeamento e irrigação da fazenda, invalidando a estimativa de vazão pela Equação 59.

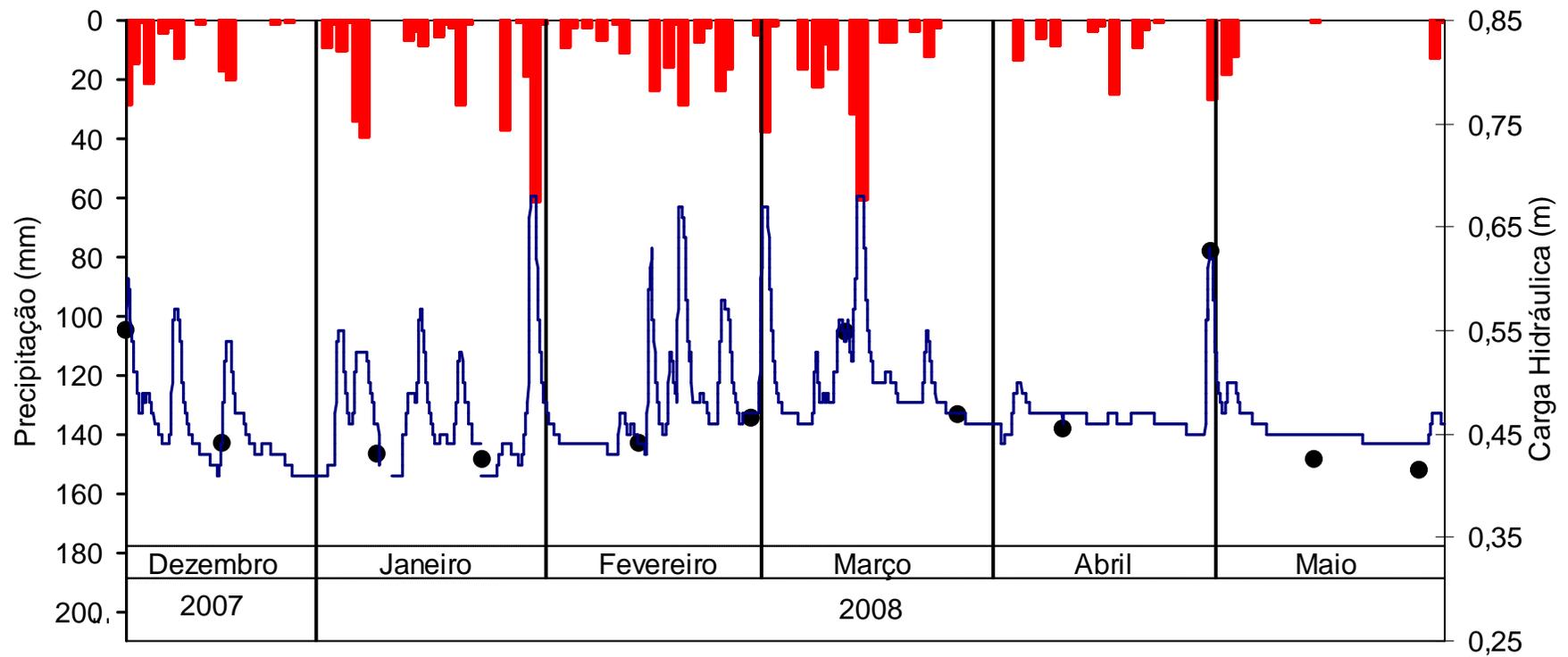


Figura 69. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Dezembro/2007 a Maio/2008. Linha azul (Bóia e contrapeso), pontos pretos (leituras manuais)

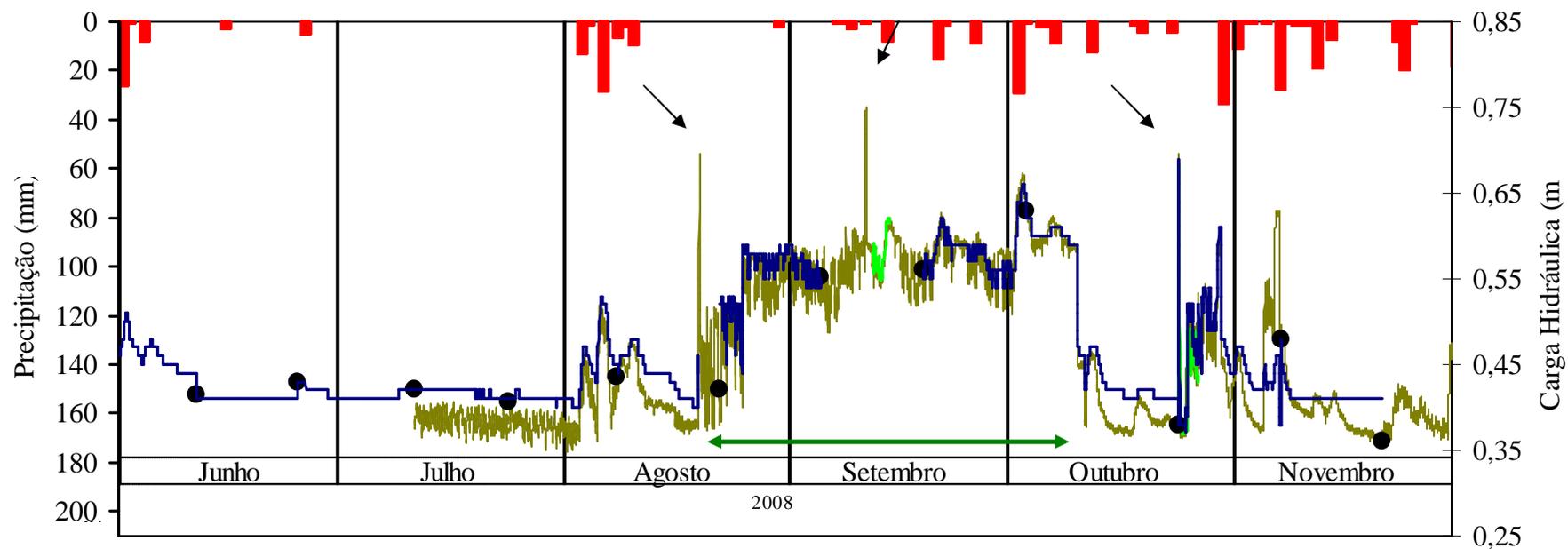


Figura 70. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Junho/2008 a Novembro/2008. Linha azul (Bóia e contrapeso), Linha marrom (transdutor de pressão), Linha verde (Flo-Tote3) e pontos pretos (leituras manuais). Setas – Instalação dos vertedores e seta dupla indica o período que houve influencia do represamento a jusante

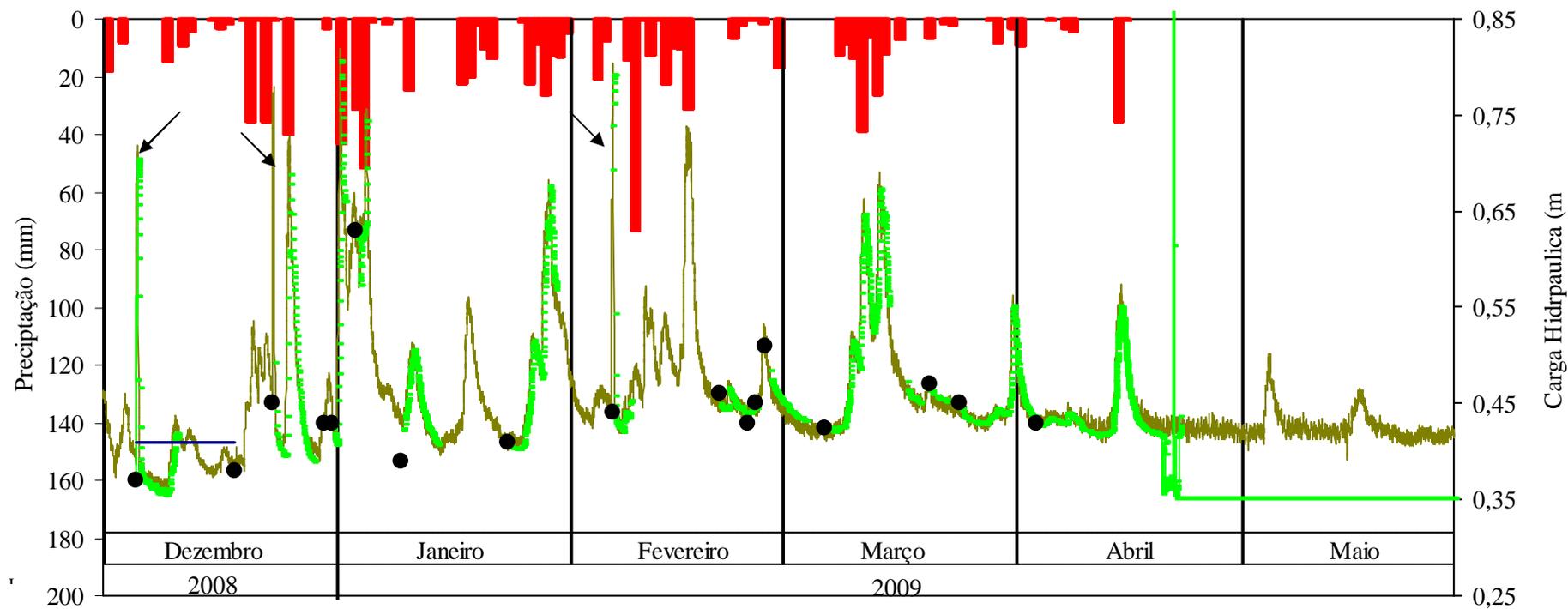


Figura 71. Carga hidráulica sobre o bueiro (h) e precipitação diária de Dezembro/2008 a Maio/2009. Linha azul (Bóia e contrapeso), Linha marrom (transdutor de pressão) e Linha verde (Flo-Tote3) e pontos pretos (leituras manuais). Setas – Instalação dos vertedores

### 5.2.4 Flo-Tote3

No dia 26/02/2009, foram realizadas medições de velocidade com o Flo-Tote e molinete hidrométrico. Os perfis de velocidade medidos pelo molinete (Figura 72) e Flo-Tote (Figura 73) são comparadas na Tabela 14.

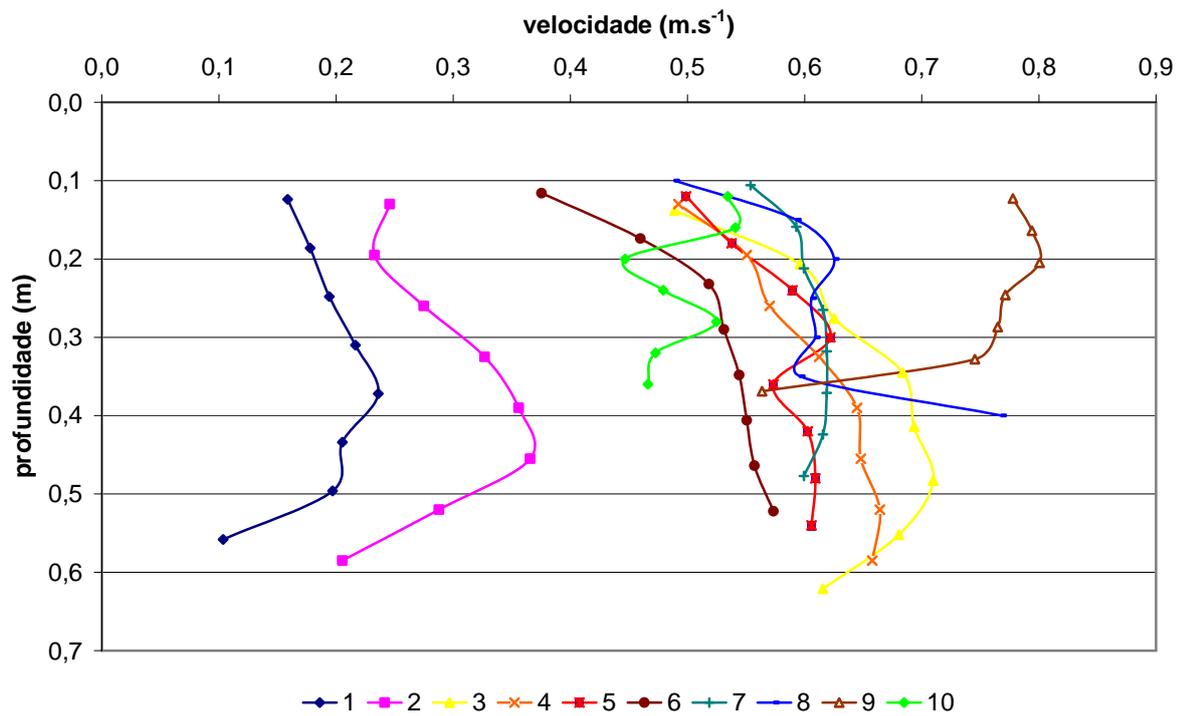


Figura 72 - Perfis de velocidade, obtidos pelo molinete, para a seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça

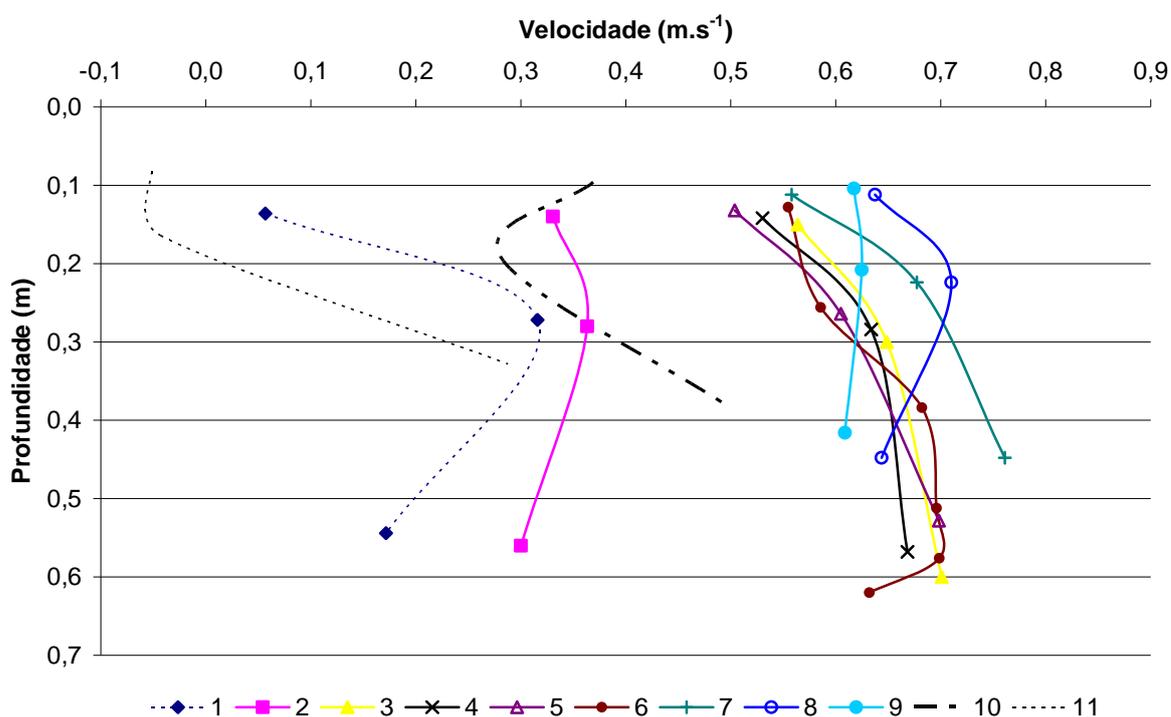


Figura 73. Perfis de velocidade, obtidos pelo Flo-Tote, para a seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça

Na Tabela 14 estão apresentados valores de velocidades medidas a 60% da profundidade, para as 11 verticais. Além disso, para o Flo-Tote foram calculadas as velocidades médias por vertical, a partir das medições realizadas a 20, 60 e 80% da profundidade (Tabela 1), ou seja:

$$v_{med} = \frac{v_{0,2} + 2.v_{0,6} + v_{0,8}}{4}$$

Segundo a Tabela 14, nota-se que as velocidades medidas pelo Flo-Tote foram 5 % menores, em média, que as velocidades medidas pelo molinete, variando de 0,3% a 8,7%. As verticais próximas às margens (1, 2, 10 e 11) foram desconsideradas em virtude das interferências causadas pelos equipamentos no fluxo d'água. O molinete é mais sujeito às interferências, por necessitar de uma área maior para as revoluções da hélice, comparado ao Flo-Tote.

Tabela 14. Velocidades medidas pelo Flo-Tote e Molinete no Ribeirão da Onça

| Vertical | Velocidade (m.s <sup>-1</sup> ) |           |              | Desvio Velocidade (%) |                     | Profundidade (m) |
|----------|---------------------------------|-----------|--------------|-----------------------|---------------------|------------------|
|          | Molinete                        | Flo-tote3 | Flo-tote3    | FT3(media) – Molinete | FT3(0,6) – Molinete |                  |
|          | 0,6.h                           | média     | 0,6.h        | Molinete              | Molinete            |                  |
| 1        | 0,26                            | 0,29      | 0,32         | 10,96                 | 19,19               | 0,62             |
| 2        | 0,41                            | 0,45      | 0,36         | 10,21                 | 11,81               | 0,65             |
| 3        | 0,70                            | 0,85      | 0,65         | 18,04                 | <b>7,90</b>         | 0,69             |
| 4        | 0,69                            | 0,82      | 0,63         | 16,23                 | <b>8,66</b>         | 0,65             |
| 5        | 0,63                            | 0,80      | 0,61         | 21,42                 | <b>4,43</b>         | 0,60             |
| 6        | 0,62                            | 0,81      | 0,59         | 23,15                 | <b>5,93</b>         | 0,58             |
| 7        | 0,71                            | 0,89      | 0,68         | 20,37                 | <b>4,77</b>         | 0,53             |
| 8        | 0,71                            | 0,90      | 0,71         | 21,36                 | <b>0,28</b>         | 0,50             |
| 9        | 0,73                            | 0,83      | 0,63         | 11,63                 | 16,72               | 0,41             |
| 10       | 0,43                            | 0,48      | 0,28         | 10,71                 | 51,50               | 0,40             |
| 11       | 0,03                            | 0,05      | <b>-0,04</b> | 40,10                 |                     | 0,29             |

Com os valores de velocidade obtidos pelo molinete e Flo-Tote, determinou-se a relação linear de R<sup>2</sup> igual a 0,948, desconsiderando os valores das velocidades medidas próximas as margens (Figura 74).

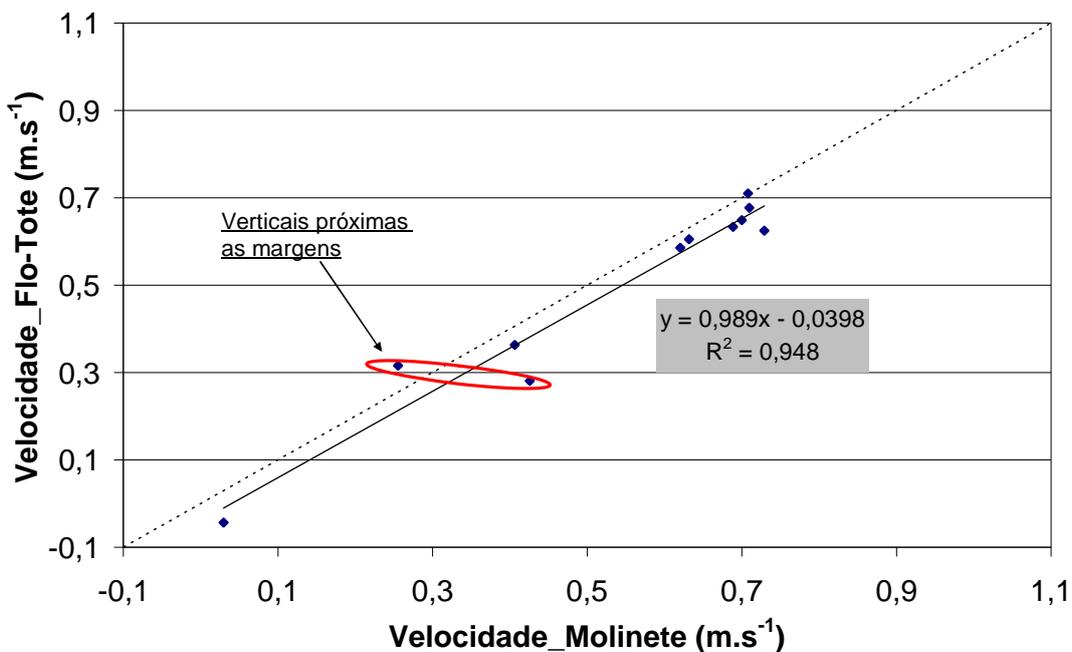


Figura 74. Comparação entre velocidades obtidas pelo Flo-Tote e molinete

Baseando-se nos resultados, o Flo-Tote mediu velocidades 3% e 5% inferiores às velocidades medidas pelo molinete, no laboratório e Ribeirão da Onça, respectivamente.

Como o Flo-Tote foi validado em laboratório e em campo, tornou confiáveis as medições de velocidade e nível de modo contínuo na Bacia do Ribeirão da Onça.

### 5.2.5 Método das isotáquias

Com os perfis de velocidade medidos no dia 26/02/2009 no Ribeirão da Onça, foram construídas as isolinhas de velocidade (isotáquias), com o auxílio do *Software Surfer*<sup>8</sup>, que interpolou as velocidades para toda a seção, Figura 75. O equipamento Flo-Tote situa-se na vertical ilustrada pela linha tracejada em vermelho da Figura 75.

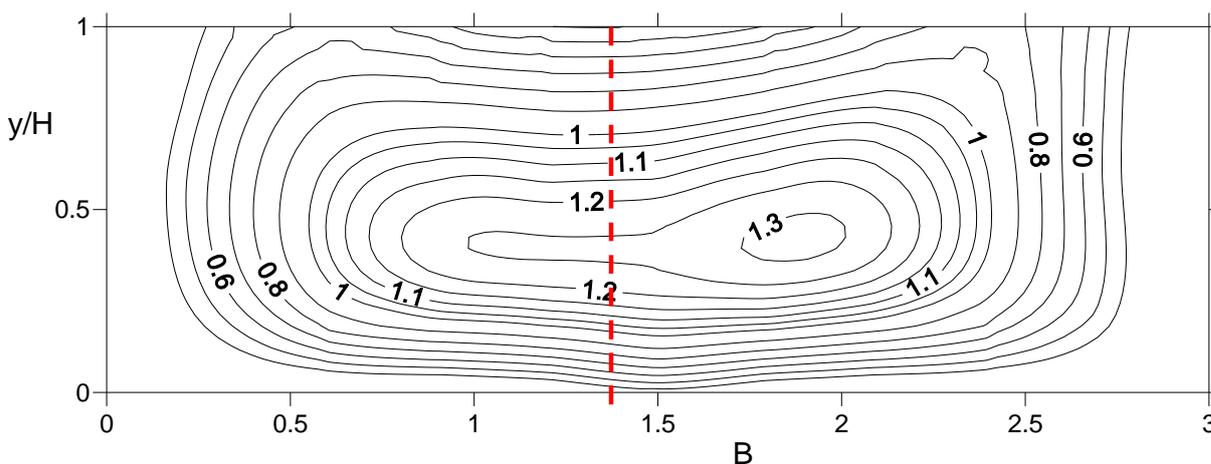


Figura 75. Isolinhas de velocidade (adimensional) para o canal do Ribeirão da Onça, Ordenadas y/H e Abscissas B

Para o cálculo da vazão segundo a Equação 33, é necessário calcular a área molhada. Assim, foram relacionados os valores de régua linimétrica com área correspondente, a cada centímetro da régua, o que resultou na seguinte relação de primeiro grau, com  $R^2$  de 0,99:

$$\text{Área} = 2,9765 * \text{Régua} + 0,3133 \quad (62)$$

Como o equipamento Flo-Tote está fixado a 1,40 metros da margem direita, a isotáquia correspondente à medição de velocidade pelo sensor localiza-se a 1,40 metros indicada na Figura 75, linha tracejada em vermelho.

Por exemplo, para o dia 27/2/2009, às 10:00h, o Flo-Tote mediu uma velocidade de  $0,527 \text{ m.s}^{-1}$  e um nível de 0,374 metros. Com o valor do nível, calcula-se  $y/H$ , régua e área:

régua = 0,474 metros (Equação 60);

$y/H = 0,419 \text{ m/m}$  (Equação 61);

área =  $1,725 \text{ m}^2$  (Equação 62);

Aplicando as isotáquias obtidas na Figura 75, com o valor de  $y/H$ , determina-se o valor da isotáquia,  $c_i$  igual a 1,129.

Com as variáveis calculadas e medidas, a vazão é calculada aplicando a Equação 33:

$$Q = A \left( \frac{v_{med}}{c_i} \right) \rightarrow Q = 1,725 \left( \frac{0,527}{1,129} \right) \rightarrow Q = 0,805 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Para o mesmo instante, com a Equação 59, a vazão equivale a  $0,802 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

A eficiência do método para a estimativa de vazão, está relacionada a uma confiável fonte de medição de velocidades e de uma seção estável, sem assoreamento ou erosão na seção. Assim, foi estudado a estabilidade da seção de medição de vazão, com o transcorrer do tempo, conforme mostrado na Figura 76.

A margem direita situa-se no zero e a margem esquerda a 3 metros, na indicação da largura da seção. O paralelogramo em verde representa a posição do flo-tote na seção transversal (1,40 metros da margem direita e 0,27 metros do leito do canal). Cada linha representa uma data em que foi feita a batimetria. Salienta-se que para algumas datas, a batimetria foi feita a 30 centímetros a jusante da seção onde o flo-tote está posicionado, por isso algumas linhas estão representadas acima da batimetria da data de 24/02/2009.

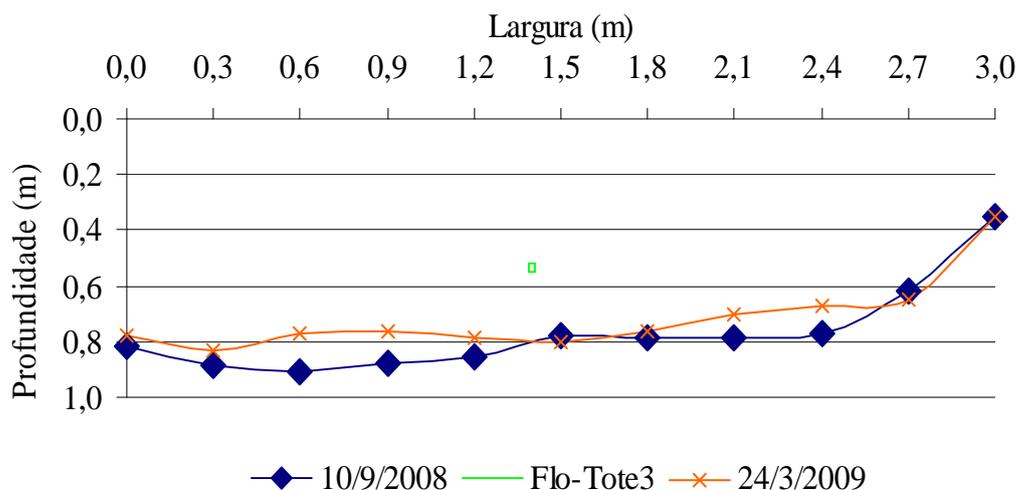


Figura 76. Batimetria da seção de medição de vazão no Ribeirão da Onça, entre as datas 10/09/2008 e 24/2/2009

### 5.2.6 Aplicações

Com os dados de nível e velocidade, medidos pelo Diver (transdutor de pressão), Floater (bóia e contrapeso) e Flo-Tote, foram aplicados o método das Isotáquias, Equação 33, e o método de Henderson, Equação 59, criando os Hidrogramas mensais para o período de dezembro de 2007 a maio de 2009, apresentados nas Figuras 77 a 94.

Segundo as Figuras 77 a 94, a vazão no Ribeirão da Onça variou de  $0,423 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (5/9/2008) a  $2,285 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (1/1/2009), para o período de dezembro de 2007 a maio de 2009.

De dezembro de 2007 a abril de 2008, nota-se a concordância dos dados de vazão calculados com os dados do Floater (bóia e contrapeso) e molinete e do aumento de vazão em consequência das precipitações.

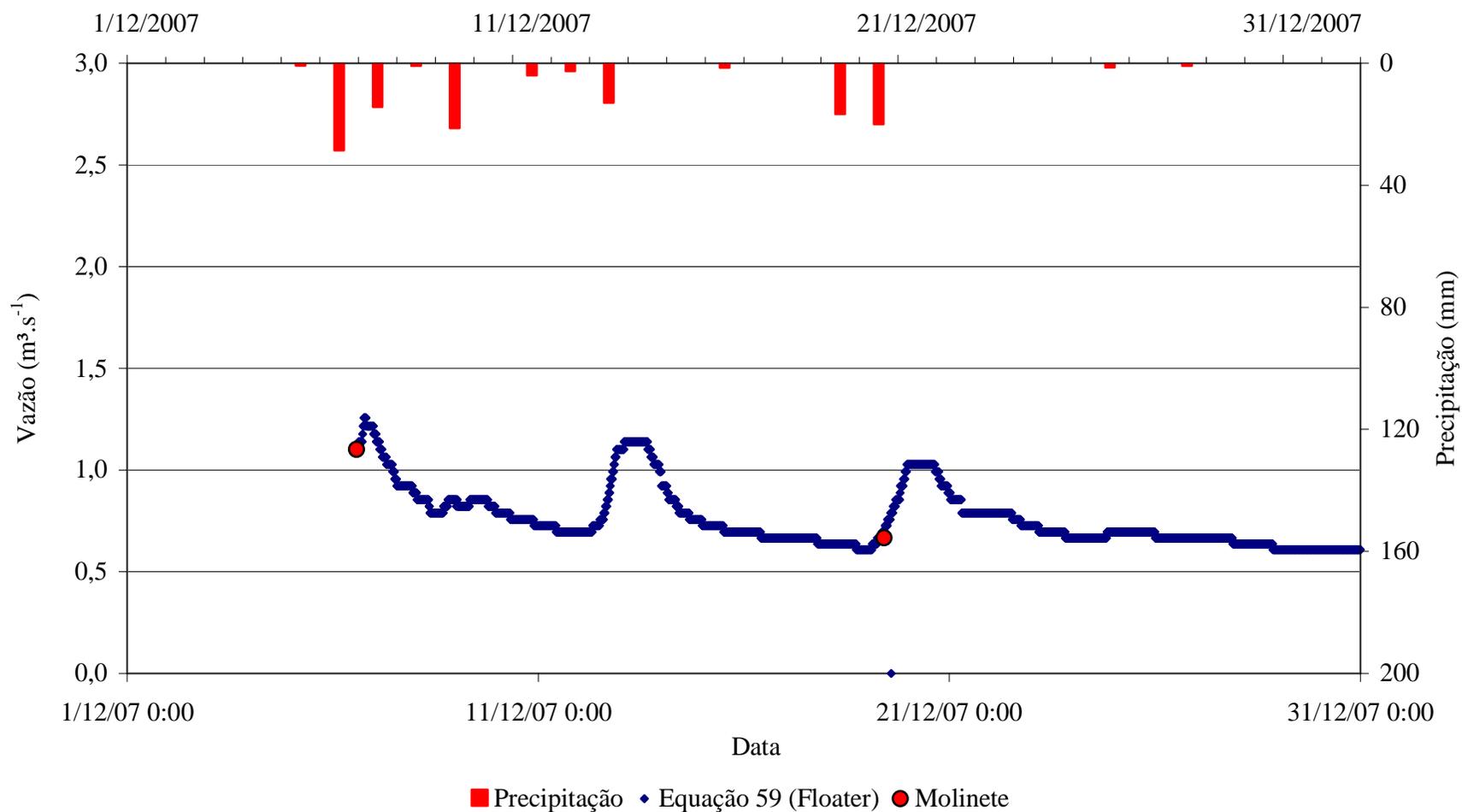


Figura 77. Hidrograma de Dezembro de 2007. Instalação do Linígrafo e do Floater (bóia e contrapeso) no dia 06/12/2007. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

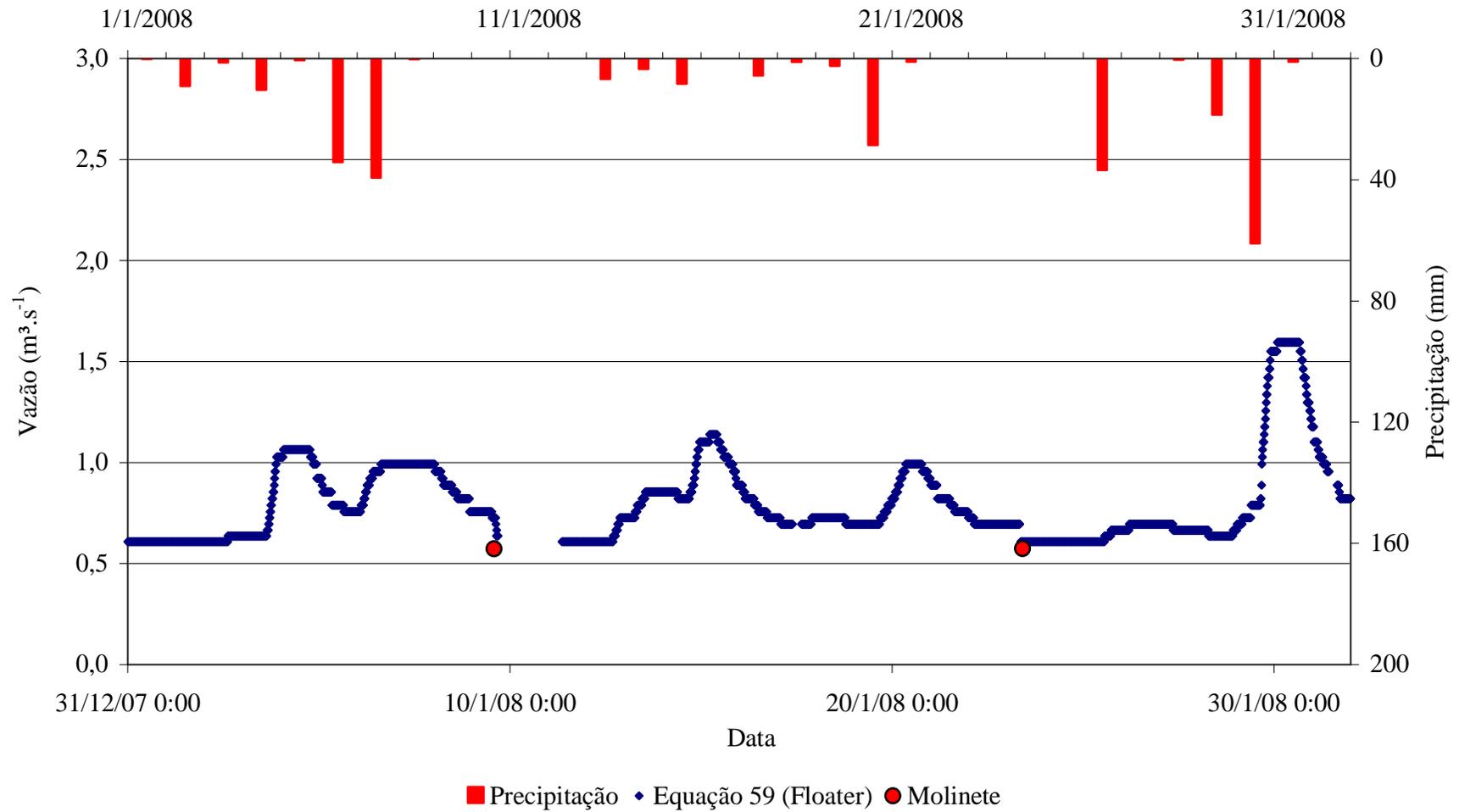


Figura 78. Hidrograma de Janeiro de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

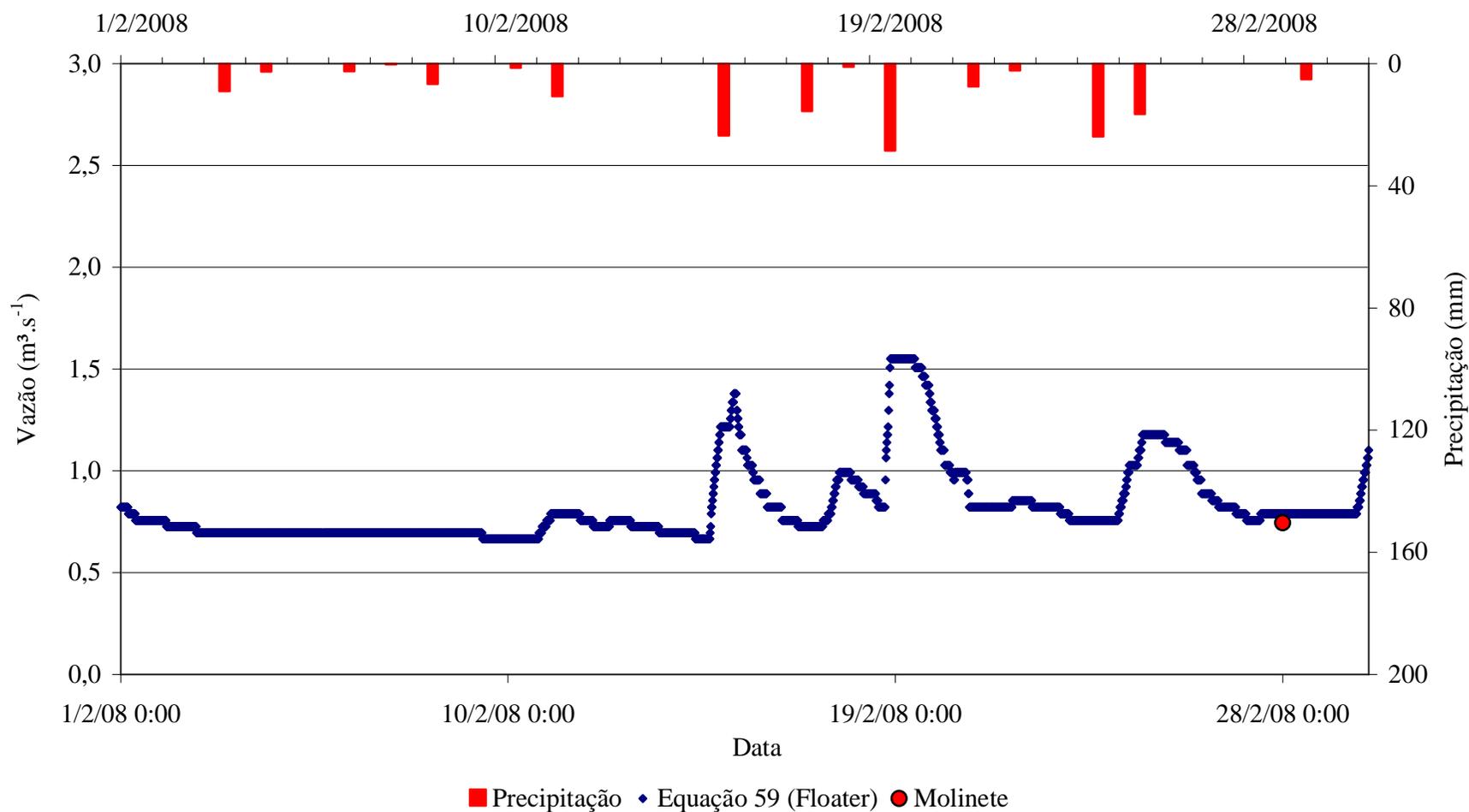


Figura 79. Hidrograma de Fevereiro de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

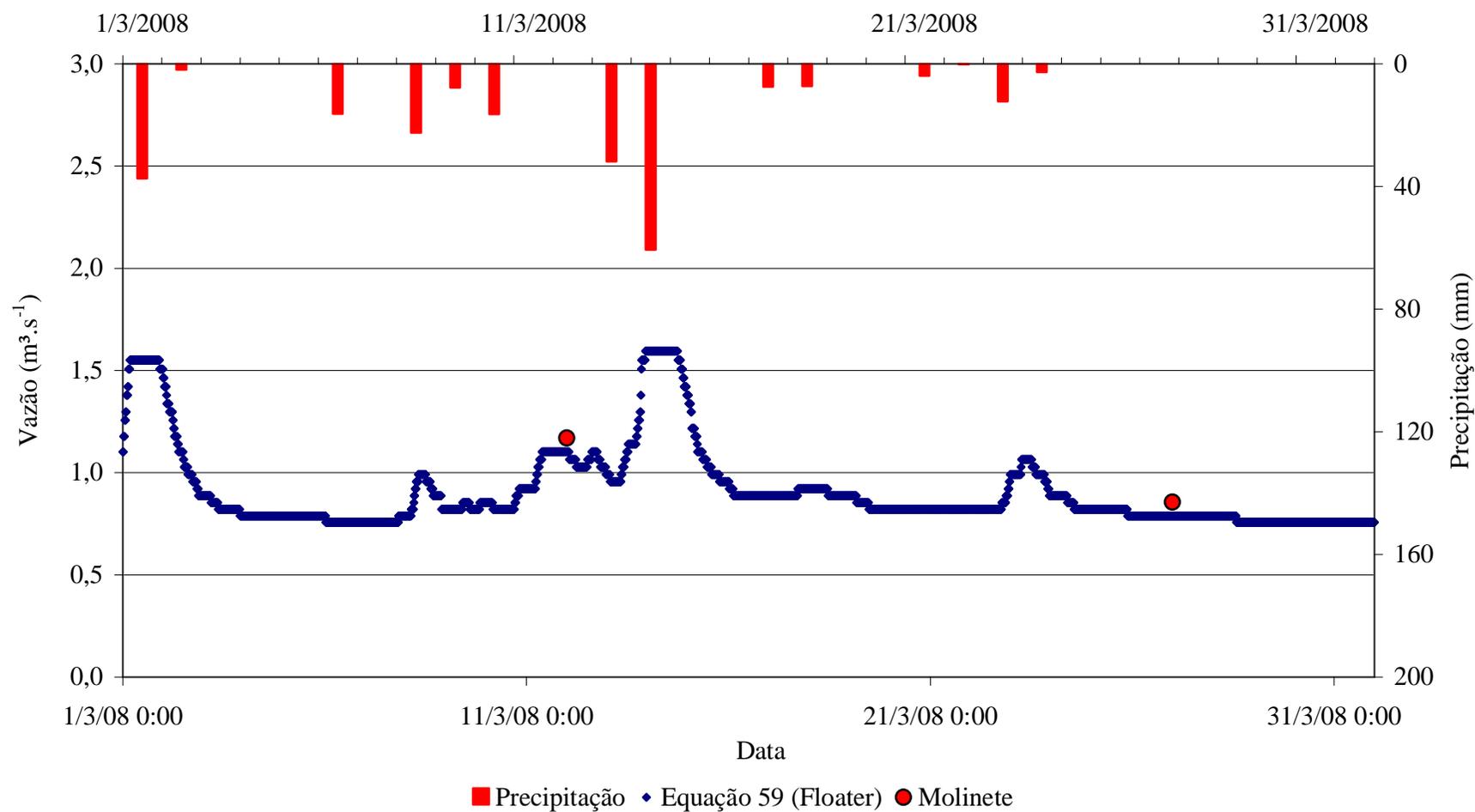


Figura 80. Hidrograma de Março de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

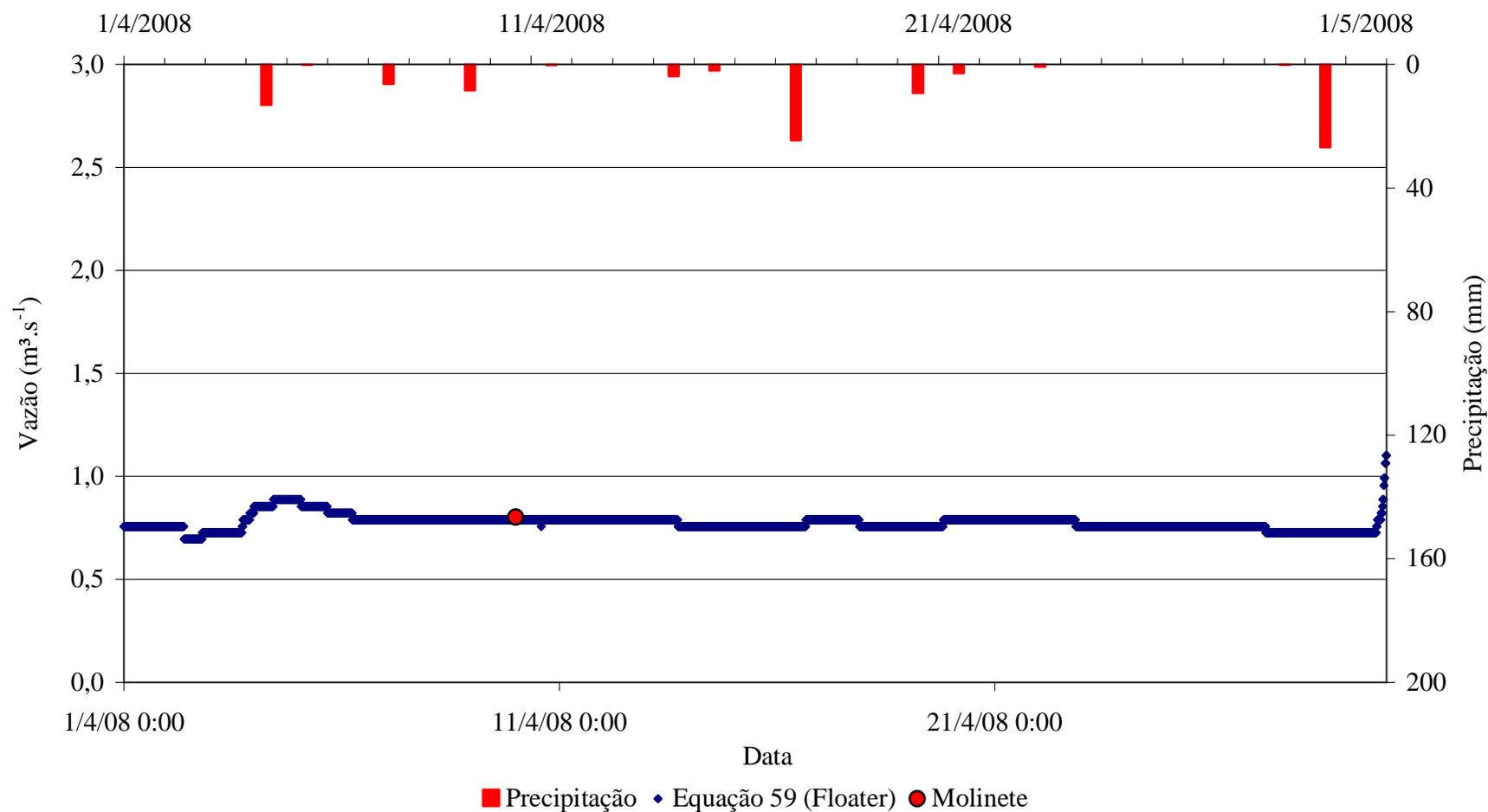


Figura 81. Hidrograma de Abril de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

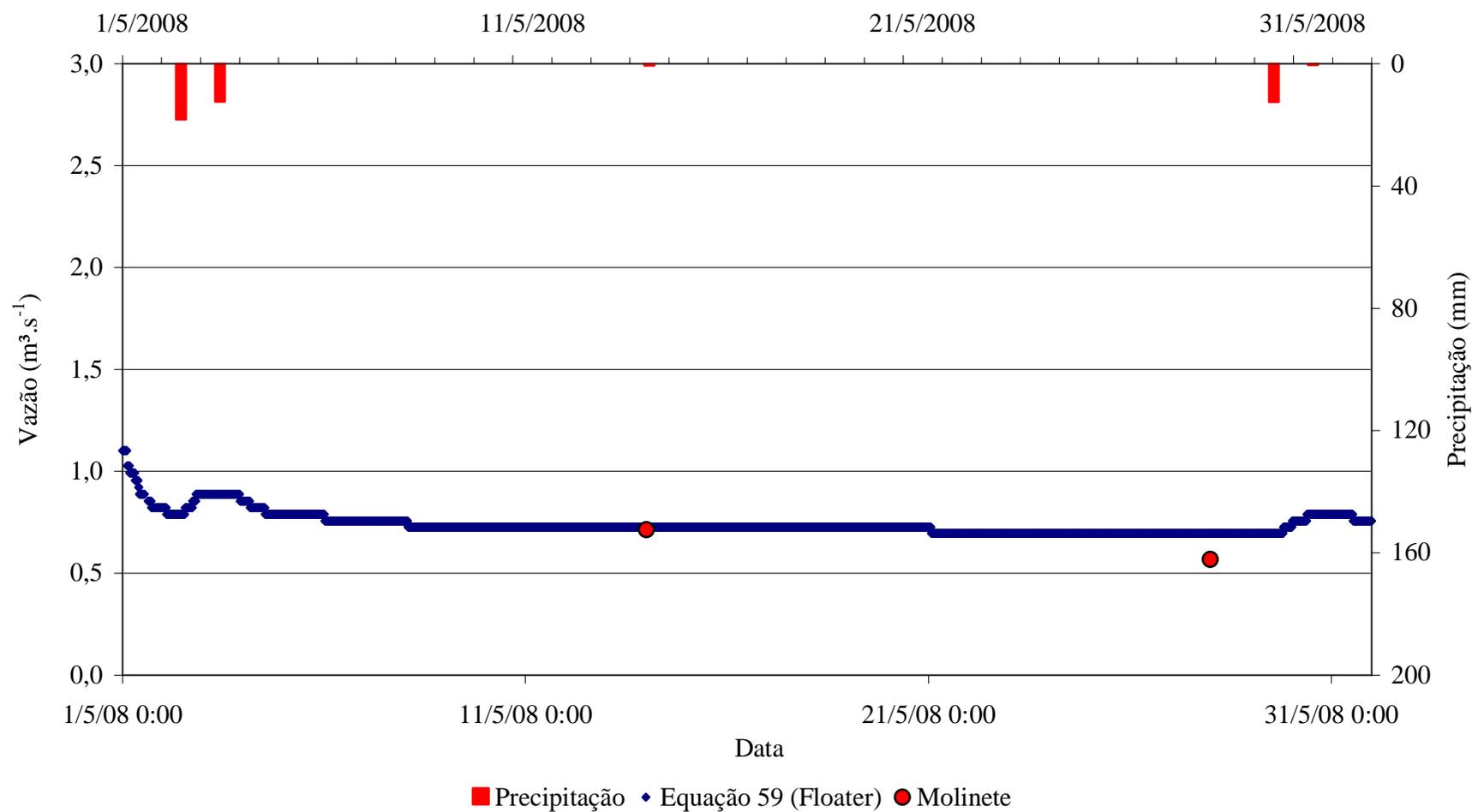


Figura 82. Hidrograma de Maio de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

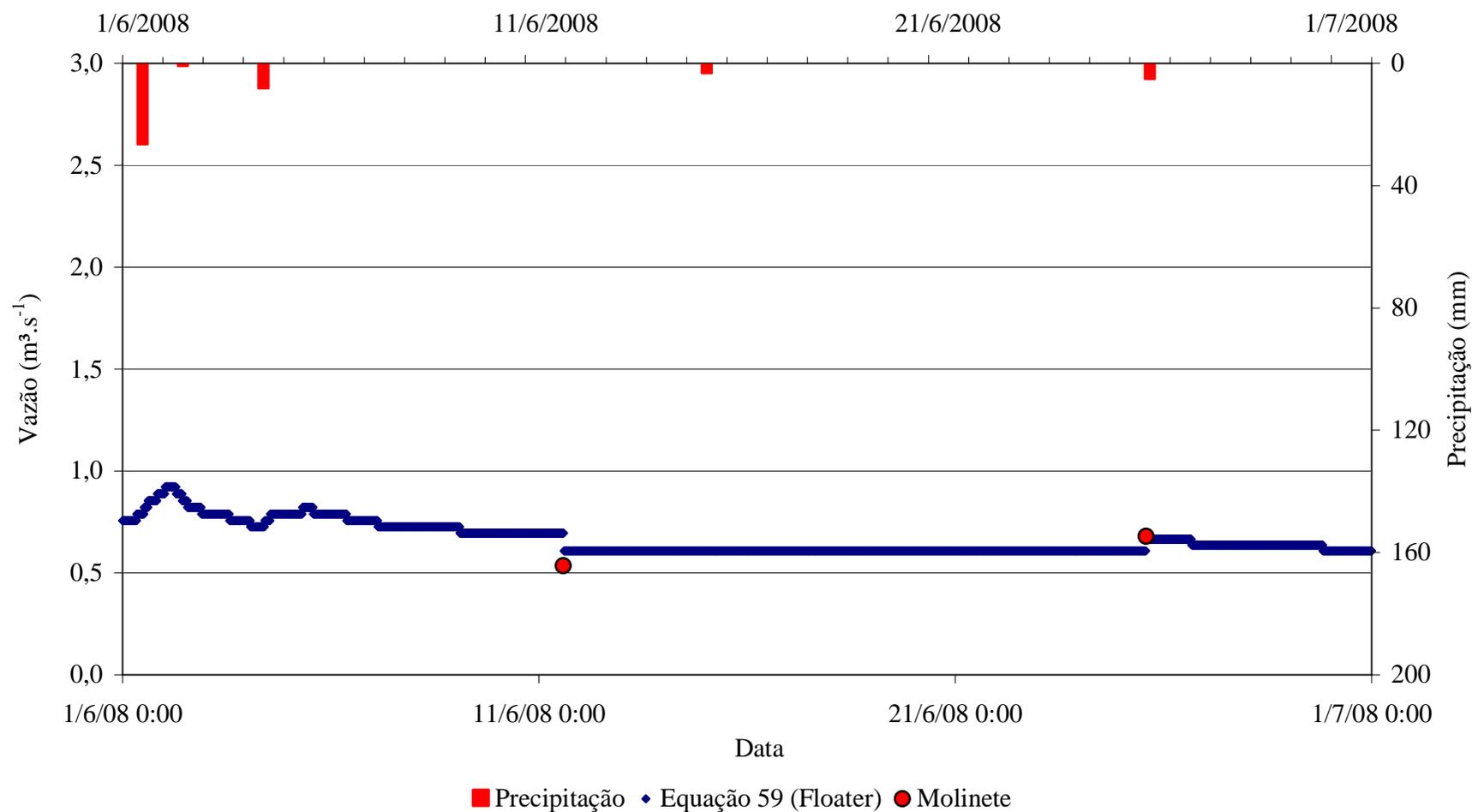


Figura 83. Hidrograma de Junho de 2008. A linha azul indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

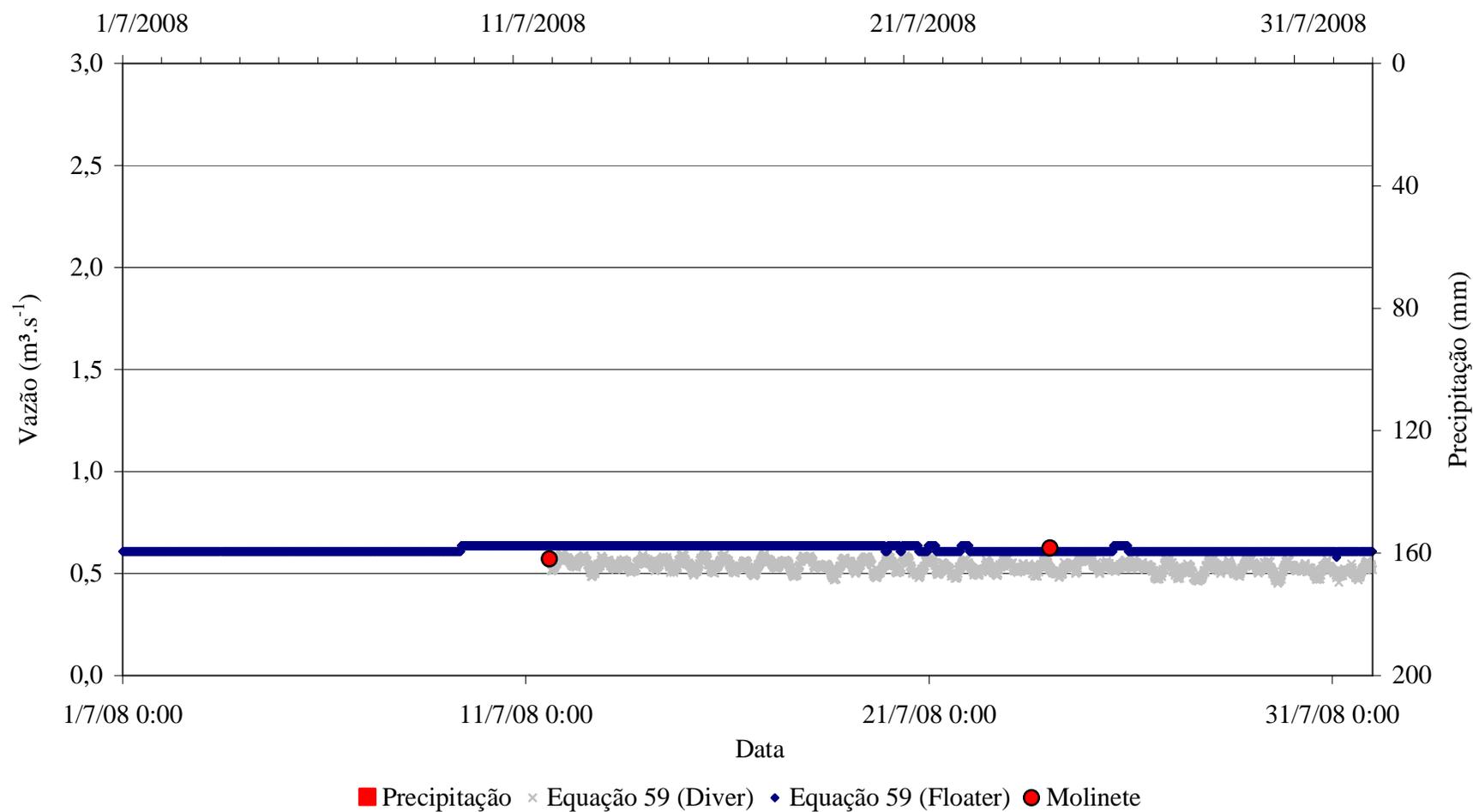


Figura 84. Hidrograma de Julho de 2008. Instalação do Diver (transdutor de pressão) no dia 11/07/2009. As linhas azul e cinza indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater e pelo Diver, respectivamente, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

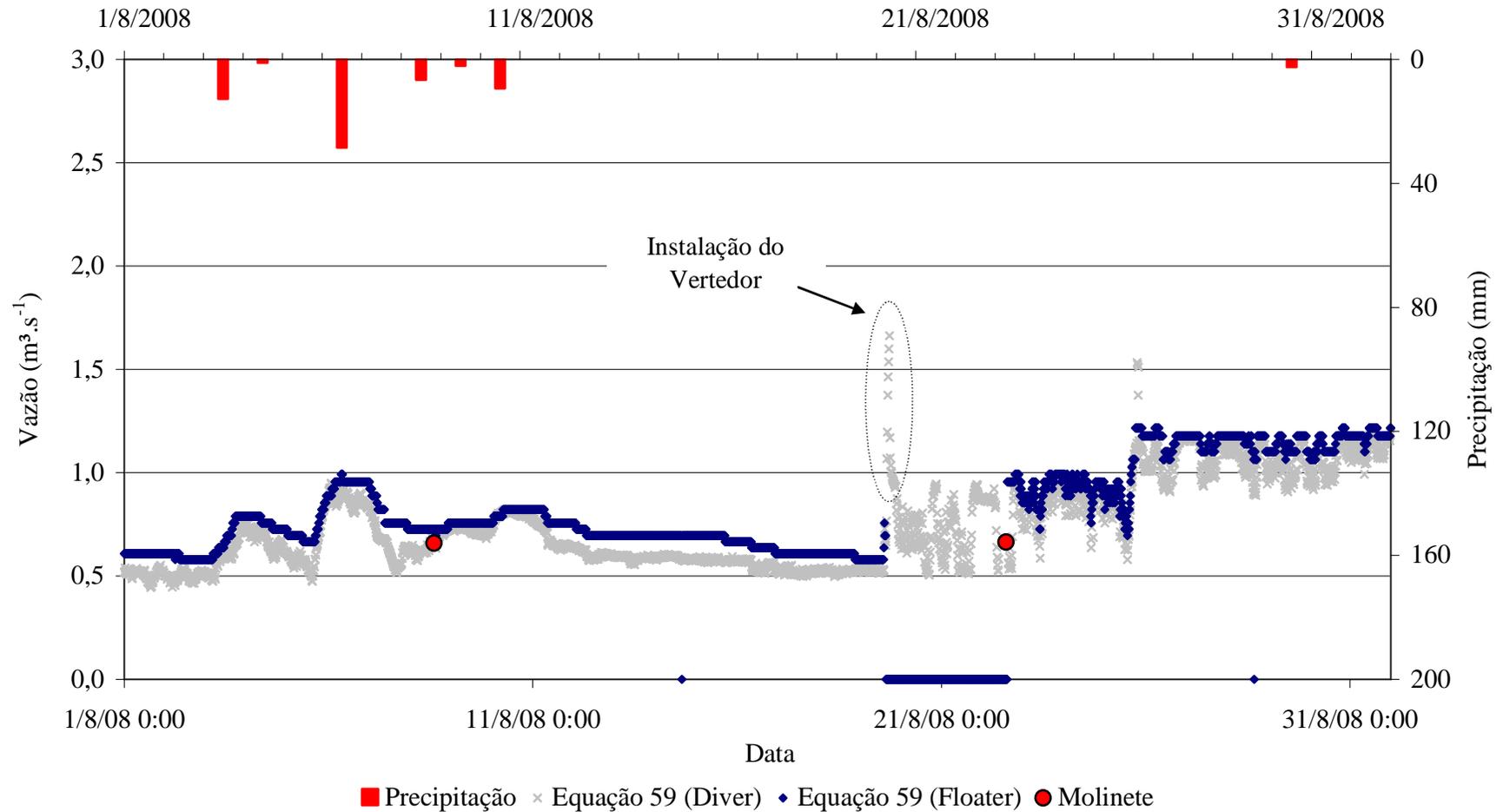


Figura 85. Hidrograma de Agosto de 2008. As linhas azul e cinza indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados obtidos pelo Floater e pelo Diver, respectivamente, os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

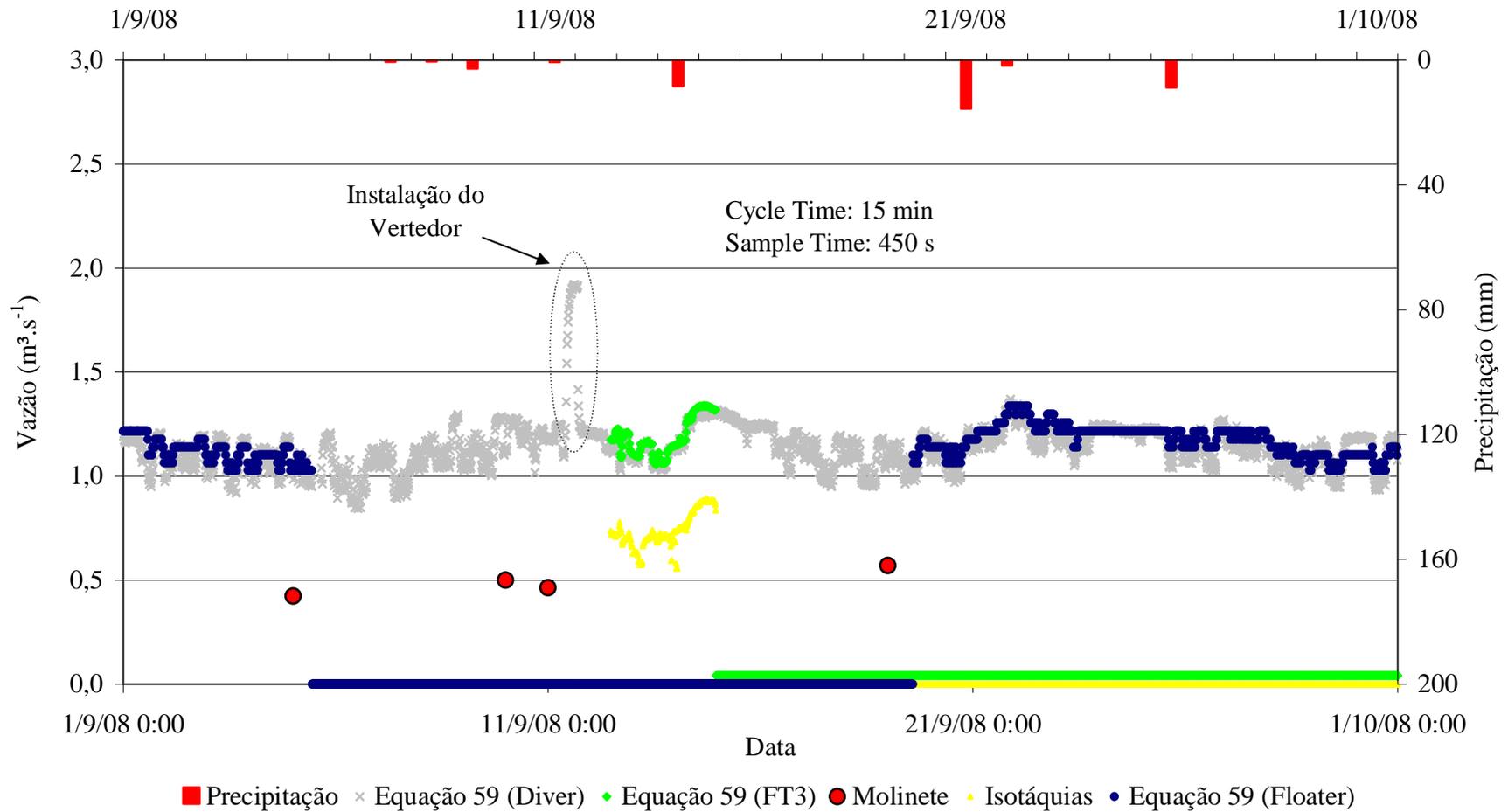


Figura 86. Hidrograma de Setembro de 2008. Instalação do Flo-Tote no dia 12/09/2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias. Neste período houve represamento na seção de bombeamento para irrigação

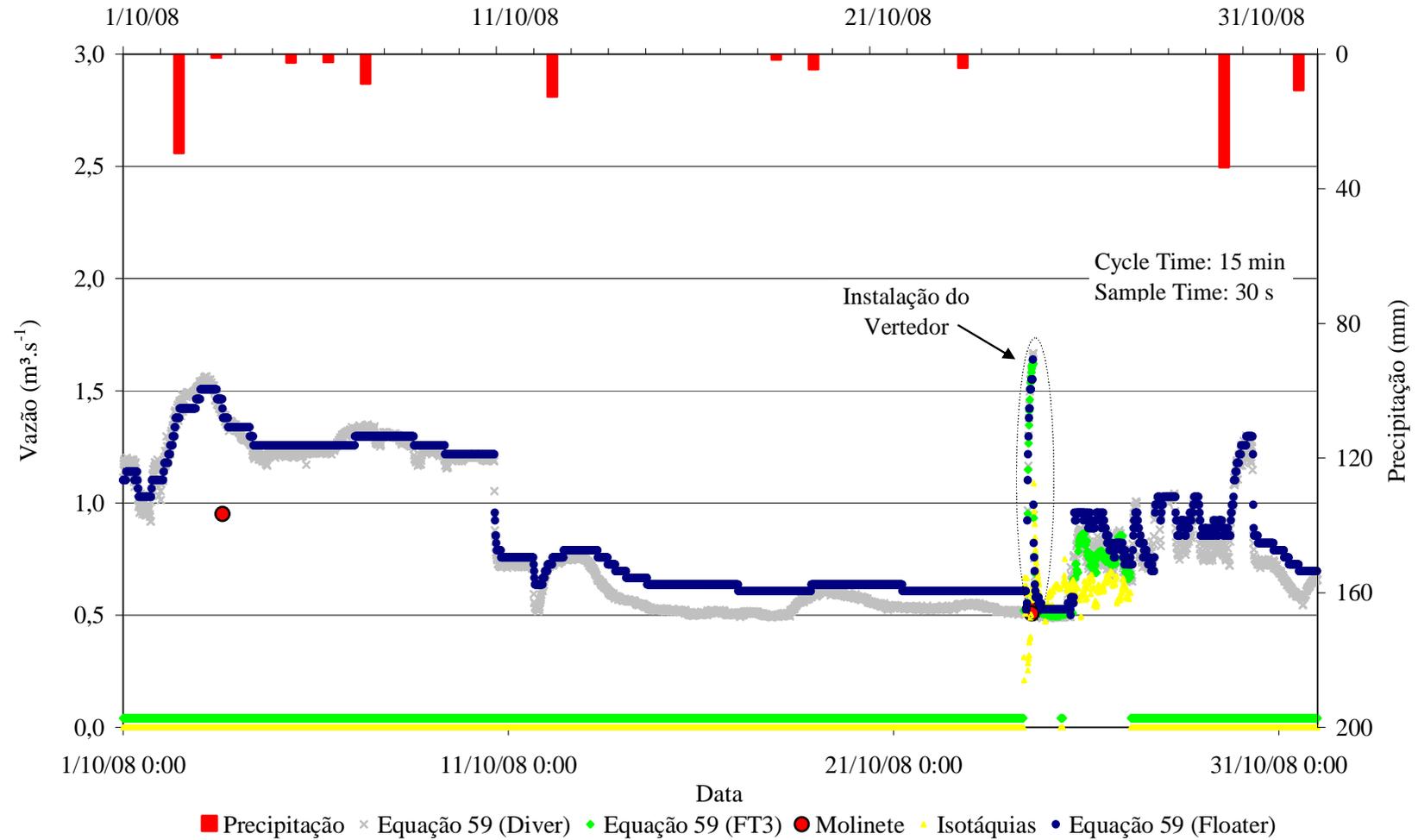


Figura 87. Hidrograma de Outubro de 2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias. Neste período houve represamento na seção de bombeamento para irrigação

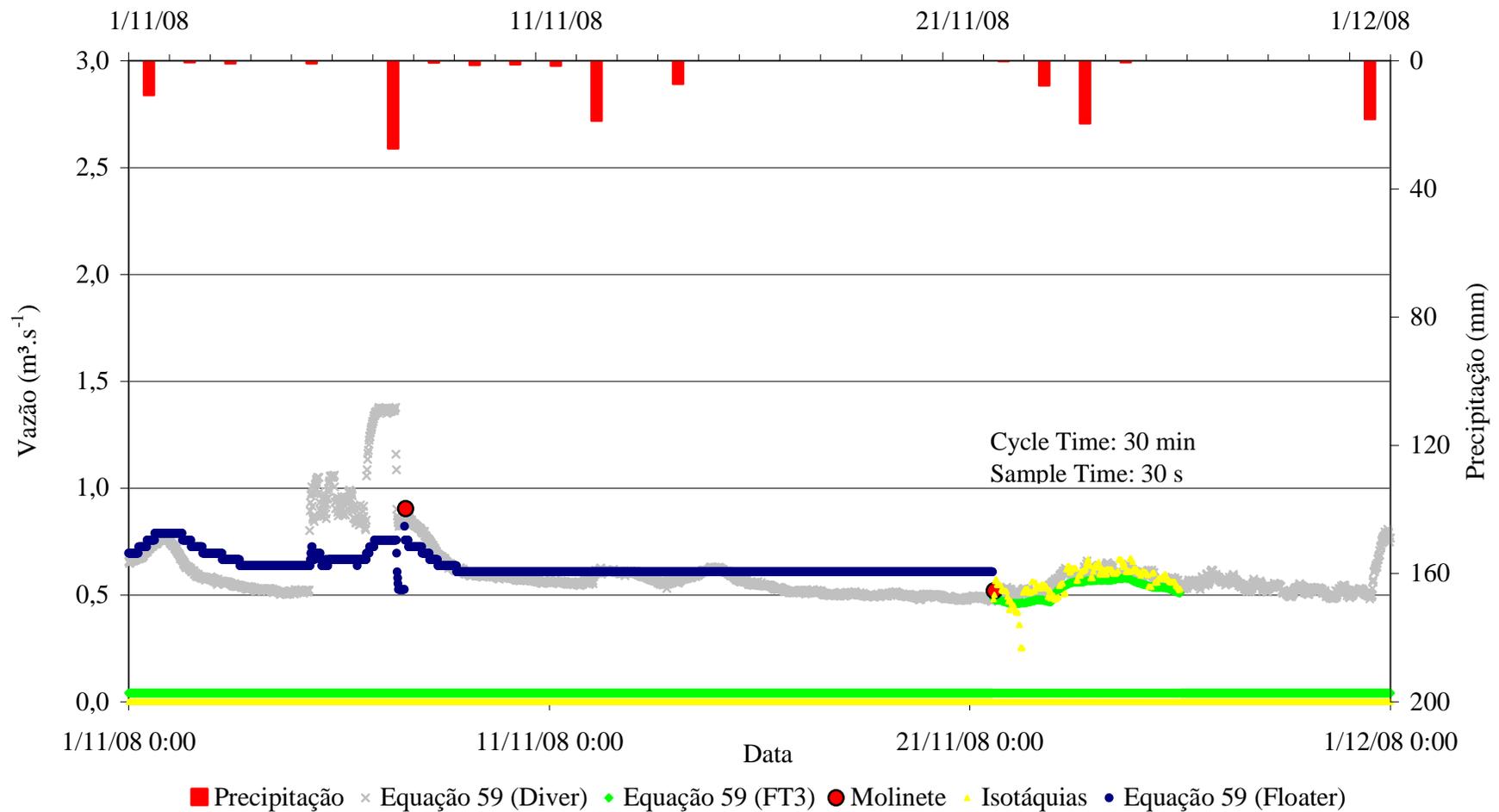


Figura 88. Hidrograma de Novembro de 2008. As linhas azul, cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Floater, Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

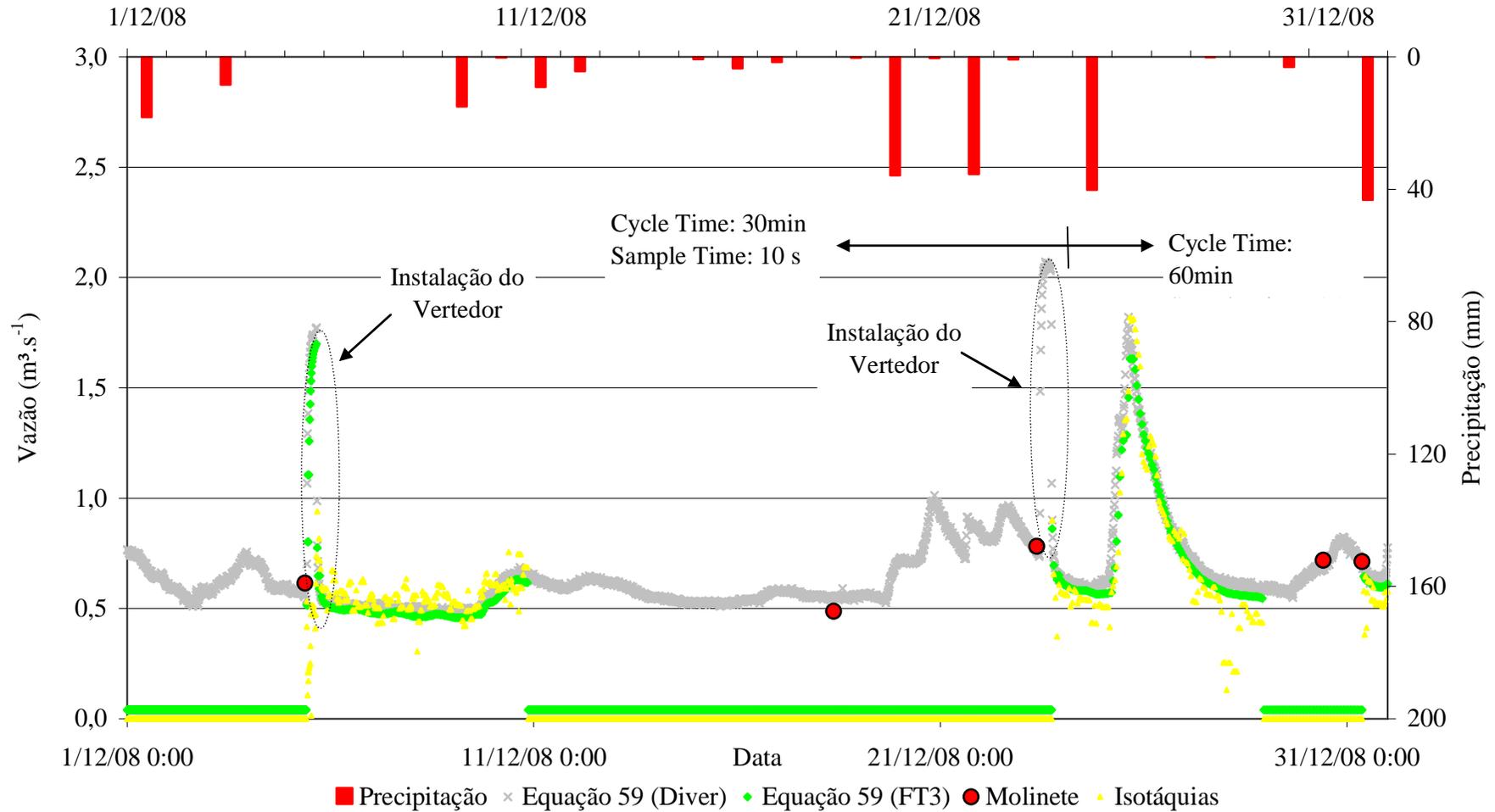


Figura 89. Hidrograma de Dezembro de 2008. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

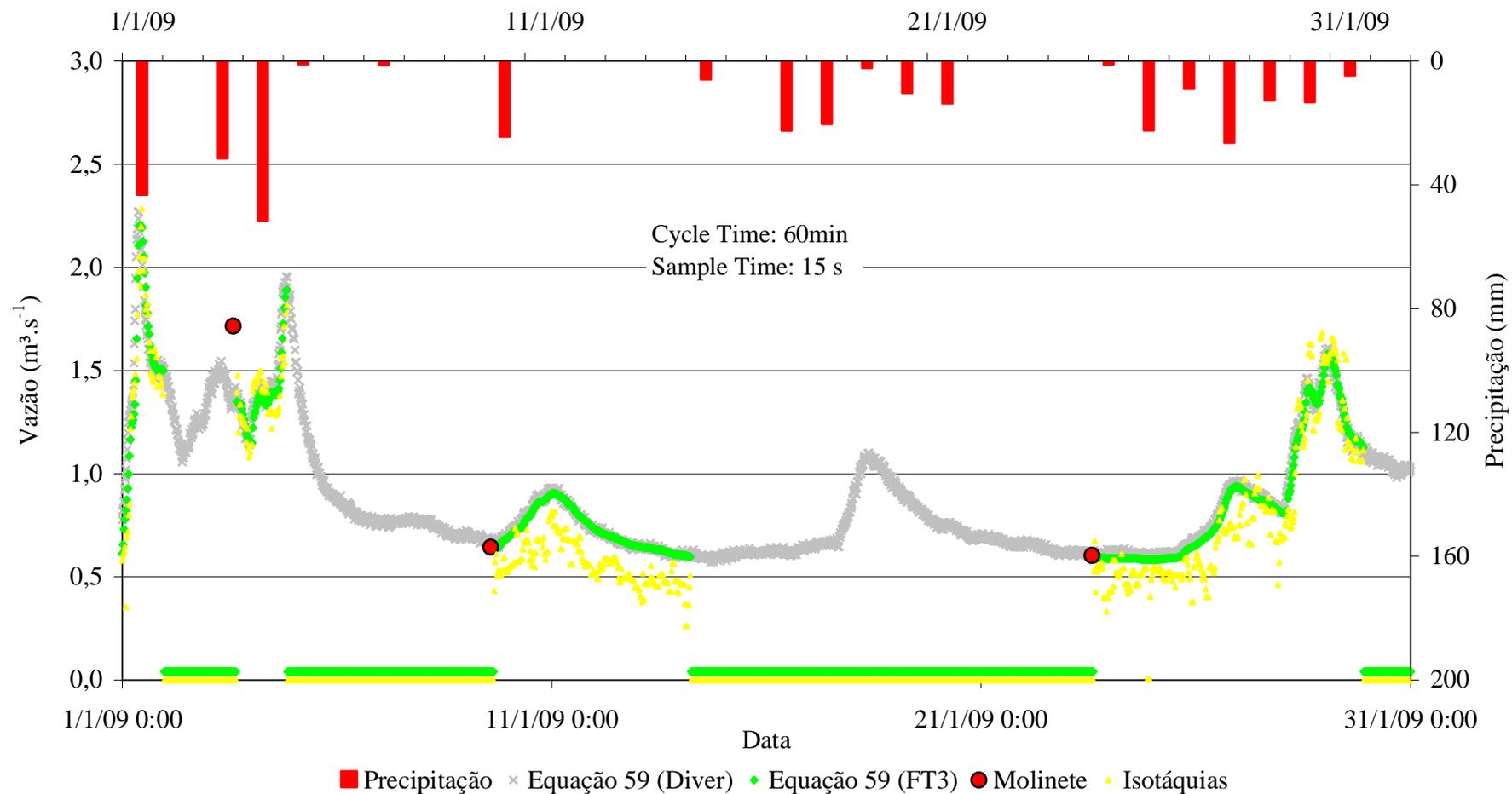


Figura 90. Hidrograma de Janeiro de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

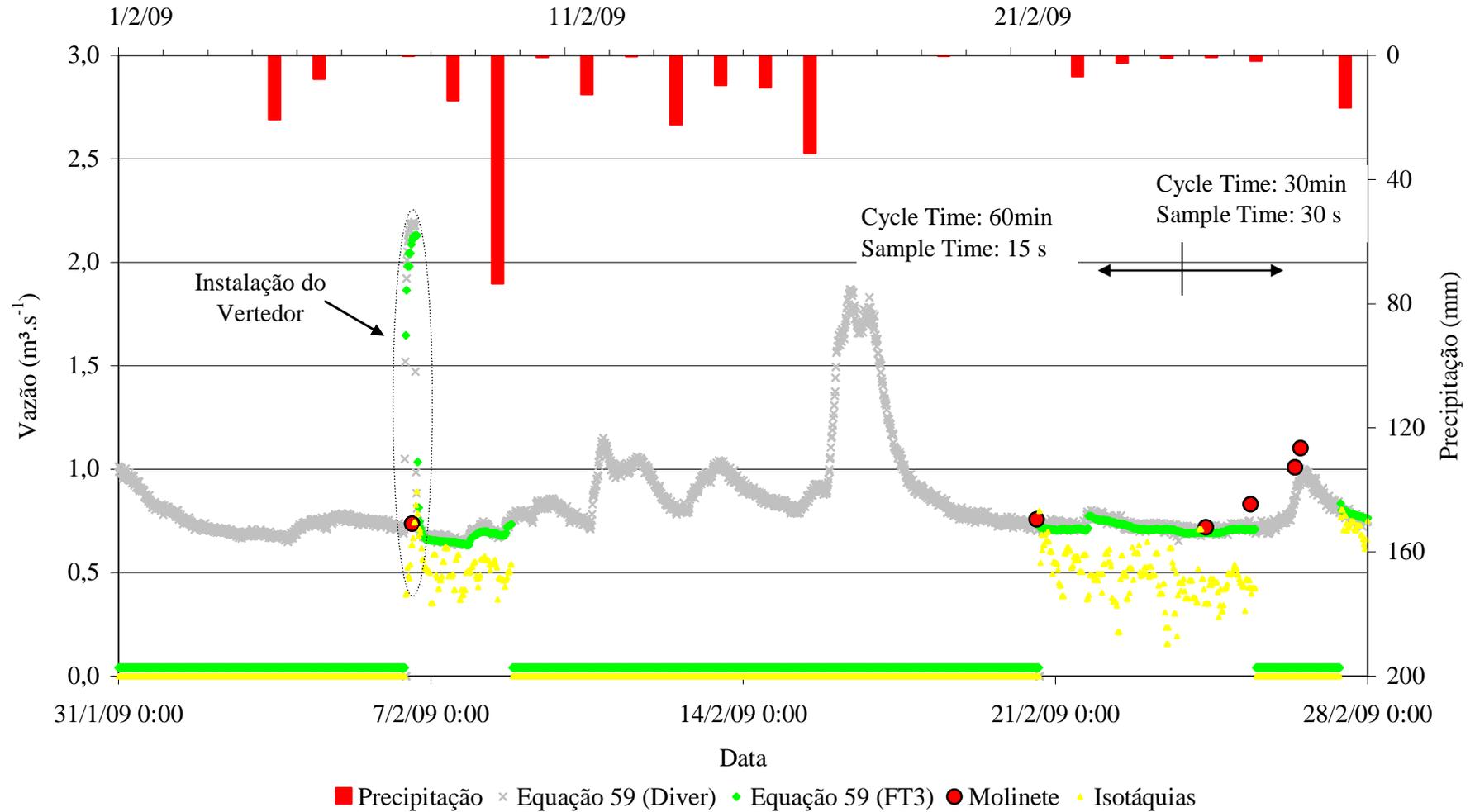


Figura 91. Hidrograma de Fevereiro de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

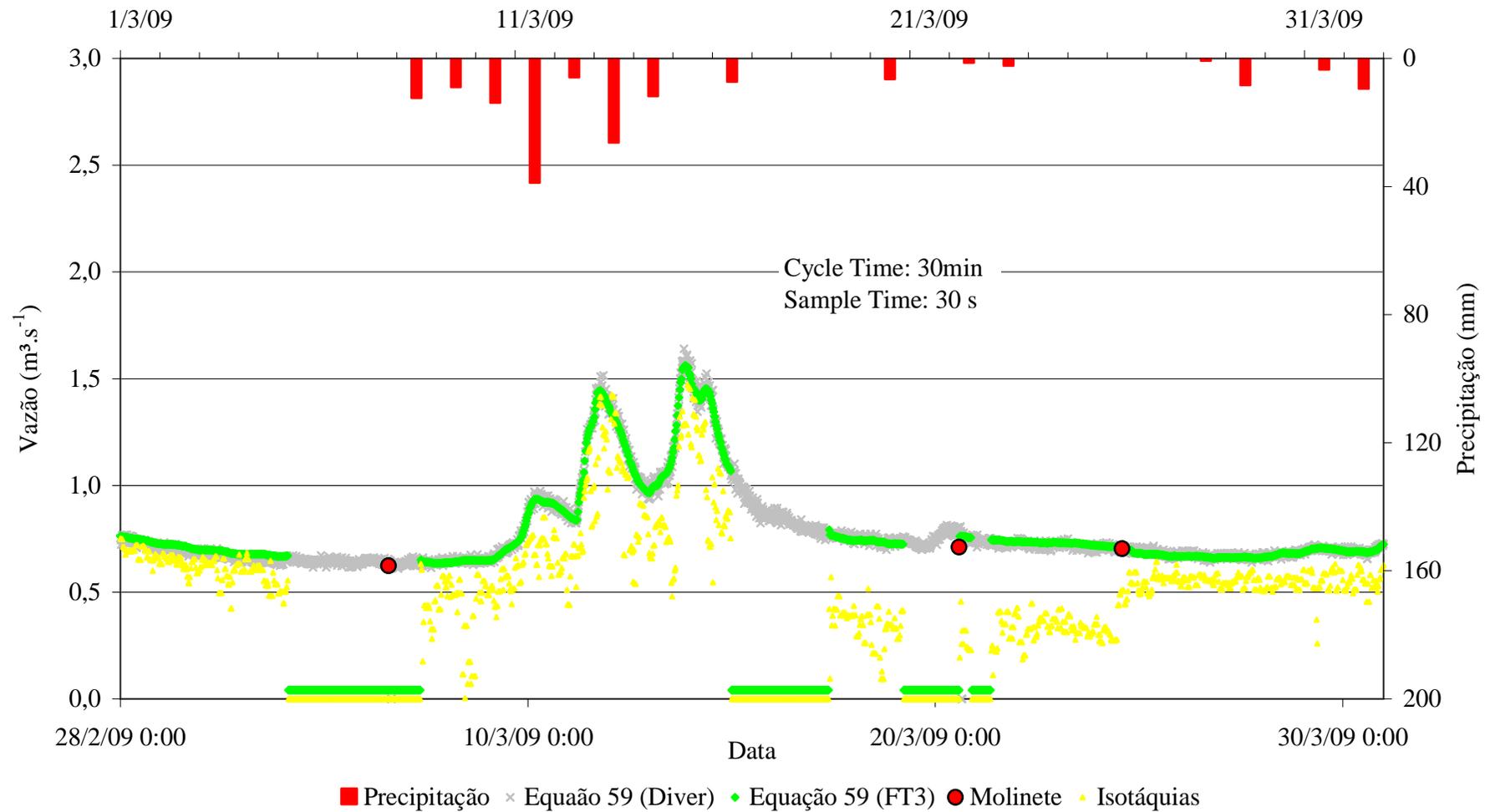


Figura 92. Hidrograma de Março de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

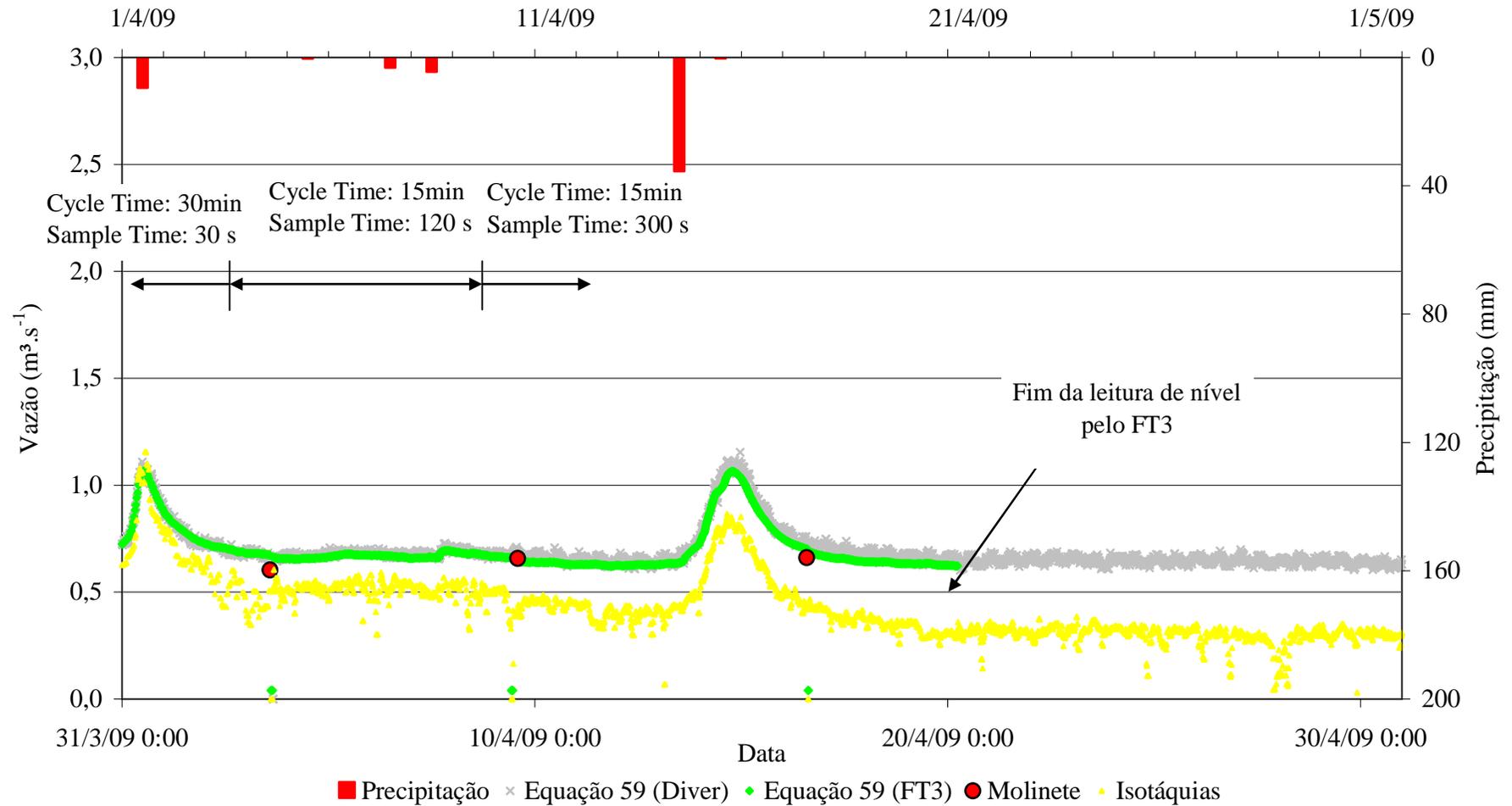


Figura 93. Hidrograma de Abril de 2009. As linhas cinza e verde indicam a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver e Flo-Tote3, respectivamente. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

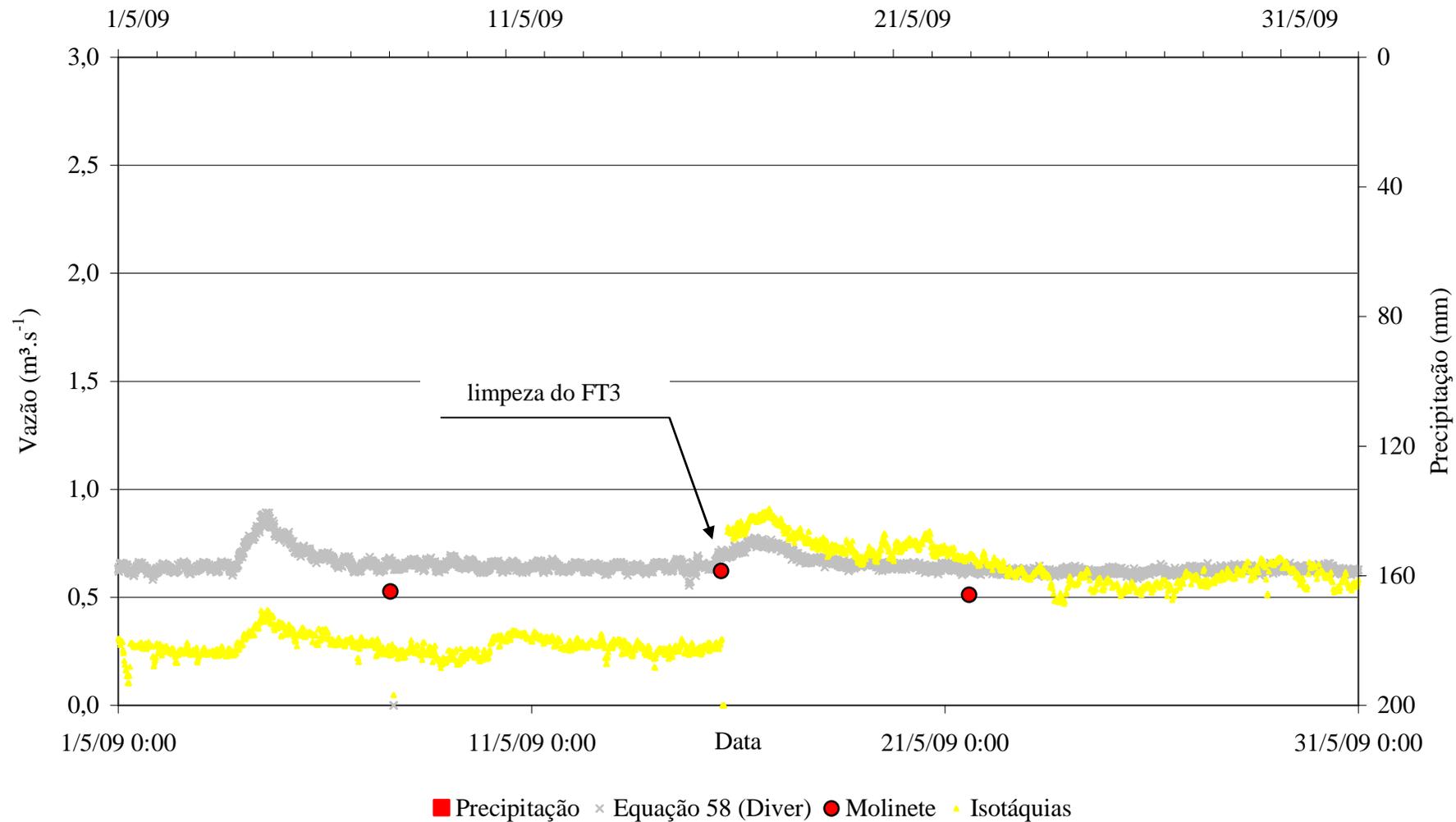


Figura 94. Hidrograma de Maio de 2009. A linha cinza indica a vazão calculada pelo método de Henderson (Equação 59) a partir dos dados de nível obtido pelo Diver. A linha amarela indica a vazão estimada pelo método das isotáquias. Os círculos vermelhos indicam vazões medidas pelo molinete e as barras vermelhas representam as precipitações diárias

A partir da metade do mês de Agosto (Figura 85), iniciou-se o represamento do córrego, finalizando no dia 10/10/2008 (Figura 87). Para este período, foram realizadas medições de vazão com o molinete, resultando em valores inferiores à equação 59. A Equação 33 (método das isotáquias) também resulta em valores inferiores à Equação 59, na tendência das medições de vazão com molinete. Devido à falta de bateria no Flo-Tote, o equipamento não pode realizar coletas continuamente, medindo em apenas 3 dias dados de nível e velocidades na época do represamento do canal.

O represamento foi notado visualmente nas medições com molinete e principalmente na medição de vazão com o vertedor circular, no dia 11/09/2008 consequência da entrada de ar nas bombas, ocasionando parada no bombeamento, no momento da instalação do vertedor, situado a montante às bombas.

No Hidrograma, não devem ser consideradas as vazões estimadas pela Equação 59 quando das instalações dos vertedores.

No dia 21/11/2008 foi constatado que o Floater não estava respondendo às variações do sistema bóia e contrapeso, sendo retirado para manutenção no laboratório.

Para o período de 5/11 a 7/11/2008, não se sabe ao certo qual motivo da elevação repentina do nível d'água. Provavelmente o córrego foi represado novamente para bombeamento até o dia da próxima chuva (dia 07/11).

Durante todo o período de funcionamento do Flo-Tote, foram realizadas modificações na suas configurações para as coletas de nível e velocidade do escoamento. A princípio, o tempo de amostragem foi diminuído e o tempo entre as coletas foi aumentado para uma maior durabilidade da energia do equipamento. Não obtendo respostas coerentes com a configuração no dia 20/03/2009, foi instalado um painel solar, para a alimentação contínua diurna do equipamento. Deste modo, o Flo-Tote foi configurado para realizar medições a cada 15 minutos (Cycle Time) coletando amostras por 300 segundos (Sample Time).

Para as medições de velocidade utilizando a configuração de amostragem de 10 e 15 segundo (Sample Time), nota-se que há uma grande variação entre os dados, fato que não se repete para amostragem de 300 segundos (Sample Time). Portanto, considerando que não há relação entre o tempo de amostragem e a demanda de energia que o equipamento necessita para o funcionamento, foi considerada a melhor amostragem o tempo de 300 segundos.

As vazões estimadas pela Equação 33 foram coincidentes com a Equação 59, porém para os períodos de 17/03/2009 a 24/03/2009 e 3/4/2009 a 15/5/2009 notam-se vazões inferiores às estimativas de vazão com a Equação 59 e do molinete. Nesses períodos, o Flo-Tote mediu velocidades inferiores ao esperado, problema provocado pelo acúmulo de lodo

nos sensores inseridos no escoamento (Figura 95). Nos dias 24/03/2009 e 15/05/2009 nota-se claramente a mudança das vazões, após a limpeza dos sensores.



Figura 95. Detalhe dos sensores sujos do Flo-Tote que afetaram as medições de velocidade

Além dos sensores de velocidade, o transdutor de pressão do Flo-Tote apresentou problemas de leituras no dia 20/04/2009, devido ao lodo formado ao redor do equipamento.

A vantagem do método das Isotáquias, Equação 33, é o fato de poder ser utilizado em situações que a curva-chave e equações para bueiro não funcionam, como por exemplo, durante o represamento a jusante do escoamento ou durante a instalação de um vertedor. Com o auxílio do Flo-Tote, que é capaz de medir nível d'água e velocidade, nota-se que para o caso da instalação do vertedor, o nível d'água aumenta, porém a velocidade diminui. No caso de uma resposta a uma precipitação (Figura 96 b) há acréscimos de nível d'água e de velocidade.

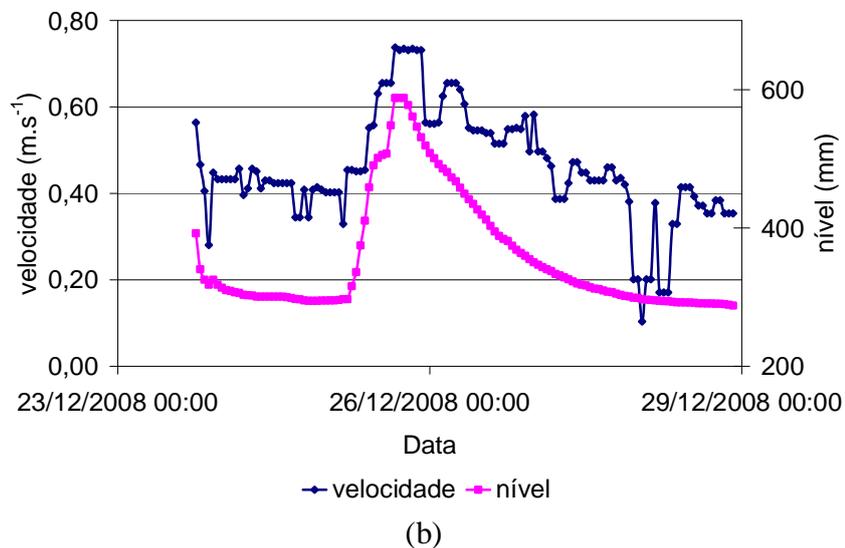
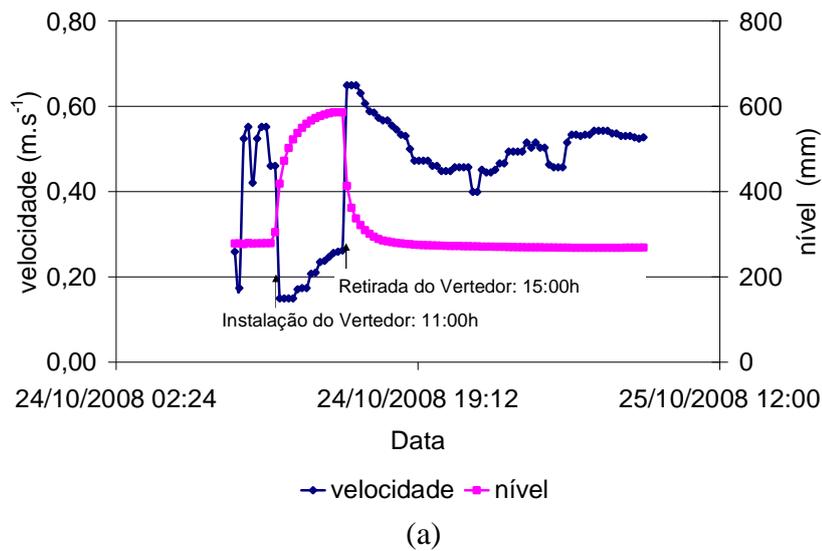


Figura 96. Valores de velocidade e nível d'água medidos pelo Flo-Tote. (a) Instalação do vertedor; (b) resposta à precipitação

Transformando os dados da Figura 96 (a) em Hidrograma usando as Equações 33 e 59, calcula-se a vazão durante o processo de instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça, Figura 97.

De acordo com as Figuras 97 a 99, quando o vertedor circular é instalado, o nível d'água aumenta. Conseqüentemente, a Equação 59 (Henderson) indica erroneamente o aumento de vazão. Entretanto, as vazões calculadas pela Equação 33 (Isotáquias) calculam a vazão real continuamente. Além disso, com a Equação 33, nota-se a onda positiva de jusante no instante da instalação do vertedor e a onda positiva de montante no instante da retirada do vertedor.

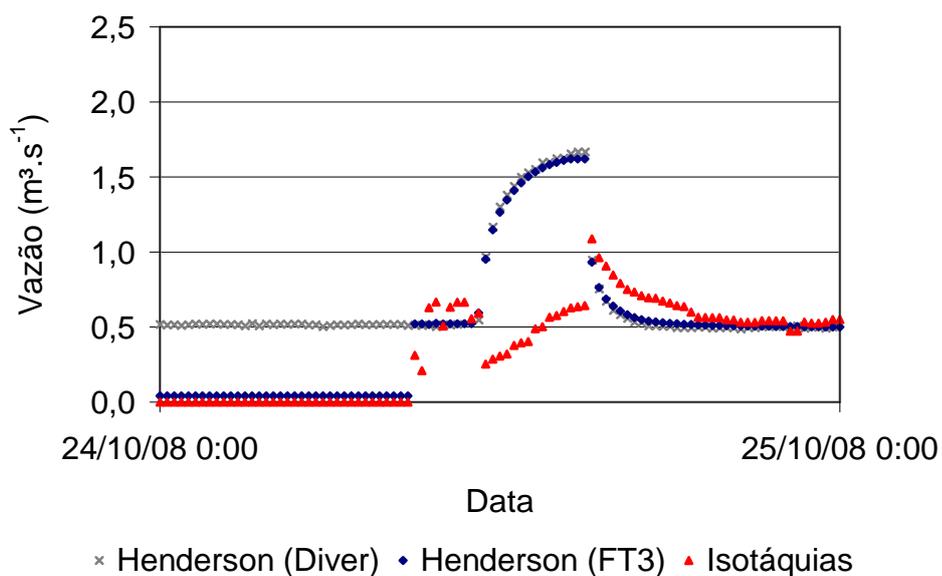


Figura 97. Hidrograma construído usando as Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 24/10/2008

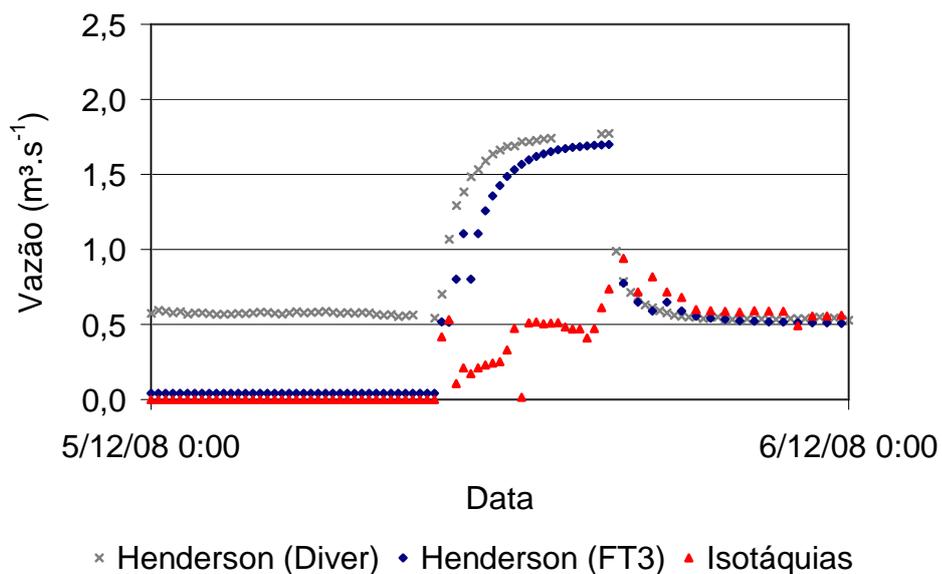


Figura 98. Hidrograma construído usando as Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 5/12/2008

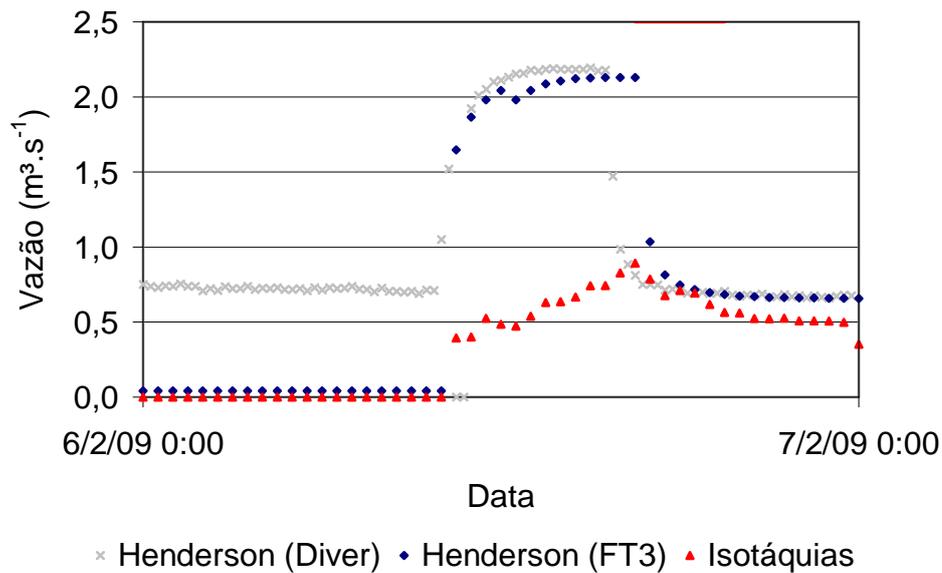


Figura 99. Hidrograma construído pelas Equações 33 (Isotáquias) e 59 (Henderson), para a instalação do vertedor circular no Ribeirão da Onça no dia 6/2/2009

### 5.2.7 Volume Drenado

O volume drenado corresponde ao somatório do escoamento superficial e do escoamento de base. Deste modo, multiplicando a vazão a cada 15 minutos, pelo período de tempo de 15 minutos, foram calculados os volumes drenados de 1 de Janeiro de 2008 a 31 de Dezembro de 2008 e de 15 de abril de 2008 a 15 de abril de 2009:

- 1 de Janeiro de 2008 a 31 de Dezembro de 2008:

Precipitação Total = 1320 mm;

Volume Drenado =  $24,47 \cdot 10^7 \text{ m}^3$

Área da bacia = 53,4 km<sup>2</sup>;

Altura drenada equivalente = 458 mm.

Volume Drenado/Precipitação = 34,7%

- 15 de abril de 2008 a 15 de abril de 2009

Precipitação Total = 1385 mm;

Volume Drenado =  $24,33 \cdot 10^7 \text{ m}^3$

Área da bacia = 53,4 km<sup>2</sup>;

Altura drenada equivalente = 456 mm.

Volume Drenado/Precipitação = 32,9%

Para o cálculo do volume drenado foram utilizados os valores de vazão estimados pela Equação 59, influenciada pelo represamento a jusante da seção de medição. Deste modo, o volume drenado foi superestimado para o período de represamento da seção de medição. Entretanto, quando for possível calcular o volume drenado para um ano hidrológico através da Equação 33, pode-se determinar o volume drenado sem a interferência do represamento da estação fluviométrica.

Segundo Gomes (2008) a razão do volume drenado pela precipitação, para a Bacia do Ribeirão da Onça, variou de 24 a 26% para Setembro de 2004 a Setembro de 2007. Gomes (2008) utilizou o software IPHS 1 para a estimativa do hidrograma para a bacia, devido a ausência de valores medidos de escoamentos superficiais.

Pompêo (1990) utilizou o Posto Usina Santa Maria (Orquídea), próximo da atual estação fluviométrica, com uma área de drenagem da bacia de 54,10 km<sup>2</sup>, para estimar a vazão total, a partir de dados coletados de um linígrafo e de uma curva-chave. Para o período de Outubro de 1985 a Outubro de 1986, a precipitação foi de 1200 mm e a altura drenada equivalente estimada foi de 520 mm, resultando em 43% da precipitação.



## 6 Conclusões e Recomendações

### 6.1 Conclusões

Este trabalho visou quantificar continuamente e com qualidade o escoamento superficial da Bacia do Ribeirão da Onça, região de afloramento do Aquífero Guarani. Para a realização do trabalho foi adquirido o equipamento Flo-Tote3 (FT3), capaz de medir velocidade e nível d'água e de baixo custo.

A princípio, o FT3 foi testado nos canais de 0,20 e 0,40 metros de largura do Laboratório de Hidráulica e Saneamento, para escoamento turbulento, fluvial e turbulento hidraulicamente rugoso, variando as vazões de 3 a 33 l.s<sup>-1</sup>. As velocidades medidas pelo FT3 foram 3% menores que as velocidades medidas pelo molinete, para valores superiores a 0,20 m.s<sup>-1</sup>. As vazões estimadas pelas velocidades medidas de 3 a 11 pontos na vertical resultaram em 0,5 a 7,2% de desvio em relação à vazão do vertedor e as vazões estimadas com as velocidades medidas a 60% da vertical resultaram em 3 a 8,5% de desvio.

Com os valores de velocidades medidos pelo FT3, foram construídas isotáquias para cada relação B/H. Aplicando o método das Isotáquias (Equação 33), foram utilizadas as velocidades da relação B/H = 1,25 e aplicadas nas isotáquias B/H = 2,22; 1,88; 1,22; 1,00; 0,67, o que resultou em desvios de vazões próximos a zero na região central do canal e desvios de até 100% nas áreas próximas às paredes do canal.

Na Bacia do Ribeirão da Onça, as velocidades medidas pelo Flo-Tote foram 5%, em média, inferiores às velocidades estimadas pelo molinete, com variação de 0,3 a 8,7%. Para as verticais situadas próximas às margens, o Flo-Tote obteve melhores desempenhos que o molinete, mensurando possíveis remansos ou vórtices.

Visando comparar as vazões estimadas pelo molinete, o vertedor circular foi instalado em 6 oportunidades e a vazão estimada foi de 3 a 15% menor que a vazão medida pelo molinete, devido ao vazamento na interface vertedor/parede de concreto. Além disso, ressaltasse a sensibilidade dos valores de vazão em função das leituras de nível d'água, que pode inserir erros no cálculo da vazão.

A partir de dezembro de 2007 foi instalado o linígrafo na margem esquerda do Ribeirão da Onça e valores de nível passaram a ser coletadas a cada 15 minutos. Com os

valores de nível d'água, foram calculadas as vazões por intermédio de equações baseadas no escoamento em bueiros. Dentre as equações teóricas para a estimativa de vazão, a Equação 59 (Henderson, 1966) foi a que mais se ajustou às vazões obtidas através do molinete.

A partir de setembro de 2008, uma nova seção de controle de vazão foi construída na Bacia do Ribeirão da Onça, próxima ao linígrafo e o Flo-Tote foi instalado fixo, no centro da seção, para medir velocidade e nível d'água continuamente. Com os perfis de velocidade obtidos pelo Flo-Tote no dia 26/02/2009, foram construídas as isotáquias e foi aplicada a Equação 33 para o cálculo de vazão continuamente.

Para o período de dezembro de 2007 a maio de 2009 foi construído o Hidrograma, a partir dos dados de nível medidos pelo Floater (bóia e contrapeso), Diver (transdutor de pressão) e nível e velocidades do Flo-Tote3.

Segundo o Hidrograma calculado, a Equação 59 sofre interferência do represamento e bombeamento a jusante da seção e estima erroneamente a vazão. Entretanto, a Equação 33, permanece na tendência das vazões obtidas pelo molinete e não é afetada por interferências no escoamento, como o represamento para o bombeamento e para a instalação do vertedor. Como o equipamento Flo-Tote teve problemas de falta de energia, não foi possível mantê-lo em funcionamento por todo o período, até a instalação do painel solar. Posteriormente, notou-se a importância da manutenção dos sensores, devido ao lodo e sedimentos que interferiram nas medições de velocidade e nível d'água.

Para o período analisado, as vazões mínimas e máximas estimadas pelas equações foram de  $0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $2,285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Portanto, provou-se a viabilidade na utilização do equipamento Flo-Tote e da vantagem da Equação 33, que não sofre interferências de represamento para o bombeamento, ou da instalação de vertedores a jusante da seção de controle de vazão. Entretanto, ressalta-se a importância das manutenções periódicas, que afetam a qualidade dos resultados medidos e estimados na bacia.

Além disso, o presente trabalho contribui para melhoria da qualidade dos dados de escoamento superficial, para futuros trabalhos relacionados na área.

## 6.2 Recomendações

Trabalhos de campo necessitam de esforços mecânicos, logísticos e de manutenção. A partir de problemas que ocorreram para a realização do presente trabalho são sugeridos alguns cuidados que devem ser tomados, para que se possa repetir ou dar continuidade ao trabalho, como:

- A aquisição de equipamentos para o trabalho de campo deve ser realizada o quanto antes, pois é um período que demanda tempo, principalmente para compra de equipamentos importados;
- Deve-se sempre testar o equipamento adquirido, em laboratório ou em campo, e verificar sua funcionalidade antes de instalá-lo em campo;
- O trabalho de campo desenvolvido não se resume apenas a instalação da estação fluviométrica, mas deve-se ressaltar a importância de sua manutenção para a constante operação dos equipamentos;
- Para a medição de vazão com o molinete hidrométrico, é importante a manutenção preventiva dos rolamentos internos do hélice, como a adição de óleo fino e de calibrações em laboratórios periodicamente;
- O sensor do equipamento Flo-Tote3 deve ser limpo frequentemente, pois pode se criar uma camada de lodo sobre os sensores, interferindo nas medições de velocidade, como citado no trabalho;
- Deve-se trocar a sílica em gel do Flo-Tote3, para a retirada da umidade interna do tubo capilar para o transdutor de pressão;
- Quando manusear o Flo-Tote3 com o Flo-Logger deve-se utilizar baterias recarregáveis, pois ao utilizar as baterias recomendadas pelo fabricante (2 baterias de 6V), o equipamento funcionou de 4 a 6 dias contínuos. Sempre que possível, utilizar o sistema de painel solar para recarregar as baterias diariamente;
- O ciclo de amostragem deve ser utilizado entre 15 minutos e 1 hora (período representativo para a seção de medição da Bacia do Ribeirão da Onça). O tempo de amostragem deve ser acima de 30 segundos, como o tempo de 120 e 300 segundos, conforme utilizado no trabalho, pois quanto maior o tempo de amostragem, menor o desvio padrão da velocidade;

- Periodicamente, deve-se verificar o nível da régua instalada na estação, através de nivelamentos e verificar se há obstruções no linígrafo;
- Seguir os procedimentos do Anexo e atualizá-los;
- Verificar e anotar qualquer observação no campo, como a data que foi verificada o represamento a jusante na seção de medição e criar um banco fotográfico temporal da estação;
- Sugere-se instalar novas estações fluviométricas (montante e jusante) para verificar a qualidade dos dados de vazão entre as estações.

## 7 Referências Bibliográficas

- ANA, Manual Técnico sobre medições de descarga líquida em grandes rios, Agência Nacional das Águas, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2008.
- ALMEIDA NETO, P. – Hidrogramas experimentais de áreas alagadas da Micro Bacia do Rio Jacupiranguinha, Baixo Ribeiro do Iguape, SP. – Dissertação de Mestrado. São Carlos, EESC-USP-SHS, 2007.
- ARANTES, E. J. - Emprego de Infiltrômetros na Caracterização da Interação Rio e Aquífero - Dissertação de Mestrado. São Carlos, EESC-USP-SHS, 2003.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; VILLELA, S.M. – Manual de Hidráulica, Volume II, 5º edição, 1970.
- BARRETO, C.E.A.G. – Balanço Hídrico em Zona de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de Monitoramento Hidrogeológico em Bacia Representativa – Dissertação de Mestrado. São Carlos, EESC-USP-SHS, 2006.
- BOETCHER, S.K.S.; SPARROW, E.M. - Limitations of the standard Bernoulli equation method for evaluating Pitot/impact tube data. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 50, 3-4, 2007, p. 782-788.
- BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R., ROSA FILHO, E. F. – Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul - Curitiba: Editora Maxigráfica, 2004.
- BOS, M. G. - DISCHARGE MEASUREMENT STRUCTURES, WAGENINGEN: ILRI, PUB.20,401 P., 3. ED., 1989.

CHEN, C.L. Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 117, No 3 , Março, 1991.

CHEN, X.; CHIEW Y. “Response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open-channel flow”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, N°1, 2003.

CHENG, N.S. – Power-law index for velocity profiles in open channel flows. *Advances in Water Resources*, 30, 2007, pp.1775-1784.

CHIU, C.L.; ASCE; LIN, G.F. Computation of 3-D flow and shear in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No 11, Novembro, 1983.

CHOW, V.T. – *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, International Student Edition, 1959.

CLEARY, R.W.- *Engenharia Hidrológica*, capítulo: Águas Subterrâneas. ABRH, 1989.

CONTIN NETO, D. *Balanço Hídrico em Bacia Hidrográfica Situada em Região de Recarga do Aquífero Guarani*. Tese de Doutorado, EESC-USP, 1987, 130 p.

DELMEÉ G.J. – *Manual de Medição de vazão*, São Paulo: Blucher, 1982.

GAMARO,P.E.- *IV Curso de Medidores de Vazão Acústico Doppler*, 2008.

GOMES, L.H. - *Mecanismos de infiltração e recarga em zona de afloramento do Aquífero Guarani*. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 2008.

HENDERSON, F. M. – *Open Channel Flow*, 3ªEd, 1966.

HERSCHY, R. W.; NEWMAN, J. D. Electromagnetic river gauging: Water Research Centre symposium on river gauging by ultrasonic and electromagnetic methods, Sess. 2, Reading, England, Dec. 1974, 23 p.

JACCON, G.; CUDO K.J. – Hidrologia. Curva-chave. Análise e Traçado. Brasília, DNAEE, 1989.

KUNDU, P.K.; COHEN, I.M.- “Fluid Mechanics“. Second edition. Elsevier Science, 2002.

LENCASTRE, A.- Hidráulica Geral, Gráfica Coimbra, Lisboa, 2ªEd, 1996.

MAGHREBI, M. F.; BALL, J.E. – New method for estimation of discharge – Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 1044 – 1051.

MAGHREBI, M. F.; RAHIMPOUR, M. – Streamwise velocity distribution in irregular shaped channels having composite bed roughness – Flow Measurement and Instrumentation 17, 2006, 237-245.

MAGHREBI, M. F. - Application of the single point measurement in discharge estimation - Advances in Water Resources 29, 2006, 1504-1514.

MARSH-McBIRNEY, Inc., Installation & Operation – Using the Flo-Tote3 Flowmeter System, 2003.

PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de, (orgs.) *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Editora Evangraf. Reimpressão revista e ampliada, Porto Alegre, 2003.

POMPÊO, C. A. - Balanço Hídrico da Zona Não-Saturada do Solo na Bacia do Ribeirão da Onça (SP). Tese de Doutorado, EESC-USP, 1990, 177 p.

PORTO, R. M. – Hidráulica Básica. 2ª edição. ed. São Carlos, EESC-USP, 2003.

RANTZ, S. E. Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge. Geological Survey Water-Supply Paper 2175 (USGS), 1982.

RIGHETTO, A.M. – HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. 1ª ed. São Carlos, EESC-USP, 1998.

SIMPSON, M. R. – Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS, Open-File Report 01-1, Sacramento, Califórnia, 2001.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.v.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. - Hidrometria Aplicada. - Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. ISBN 85-88519-01-1.

SILVA, R.C.V.; MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G. – Hidráulica Fluvial. Vol.1, 2ª edição – Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

TALLASKSEN, L. M. e LANEN, J. van. Hydrological Drought: Processes And Estimation Methods For Streamflow and GroundWater, Elsevier, 1ª Ed., 2004.

TIPLER, P. – Física – Volume 3 – Eletricidade e Magnetismo, 3ª ed., 1995.

TUCCI, C.E.M, Hidrologia – Ciência e Aplicação, Editora UFRGS, 1993.

VRIES, J.J; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, 10, 2002, pp. 5-17.

WALKER, J.F. General two-point Method for Determining Velocity in Open Channel. Journal of Hydraulic Engineering. Vol 114, Nº 7, Julho, 1988.

YEN, B.C. Hydraulic resistance in open channels. In Channel Flow Resistance: Centenal of Manning's Formula, B.C. Yen, ed. Water Resource Publications, Highlands Ranch, Colo., 1991, 1-135.

YEN B.C., Open channel flow resistance. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 128, No 1, Janeiro 1, 2002.

YORKE, T.H.; OBERG, K.A. – Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profiles. Flow Measurement and Instrumentation 13, 2002, pp. 191-195.



## **APÊNDICE A – Procedimentos de Campo**

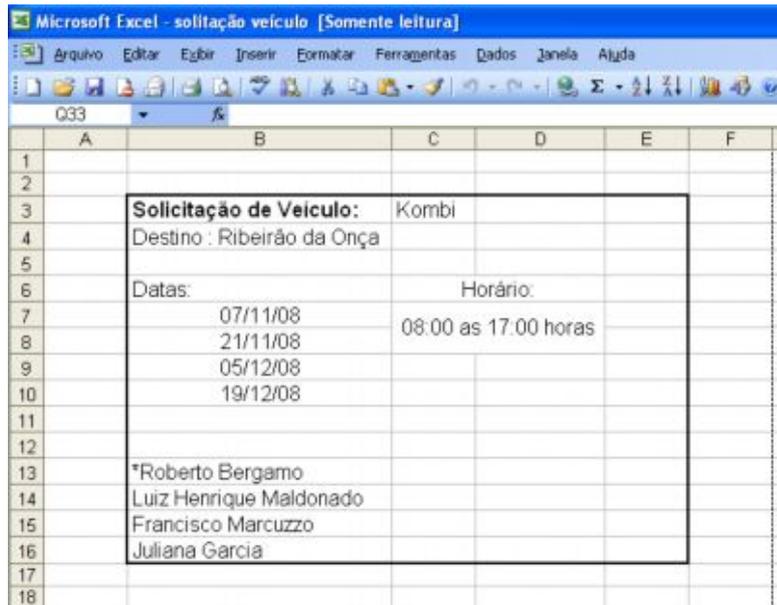


## Procedimento 001/2008

### Como reservar o veículo para as coletas de campo

Versão 1.0 27/10/2008

- Escolher os possíveis dias de trabalho de campo, a cada 14 dias;
- Verificar a disponibilidade do “*Roberto Bergamo*” para a ida ao campo;
- Ligar no *Transportes* e falar com a *Daniele*, ramal 9261, para reservar as datas da reserva do veículo, Kombi;
- Preencher o formulário “*solicitação veículo*” (Figura 1) que se encontra no computador Saruman:
  - abrir o software “*SSH Secure File Transfer*”, clicar em “*quick connect*”;
  - Host Name: *192.168.1.1*;
  - User Name: *onca*;
  - Port Number: *22* e “*connect*”;
  - Password: consultar o responsável pela senha;
  - clicar em “*onça campo*”; “*Formulários Campo*” e finalmente no arquivo “*solicitação veículo*”;
  - modificar o arquivo “*solicitação veículo*” para as novas datas de campo e inserir os nomes das possíveis pessoas que irão a campo;
- Imprimir e entregar o formulário “*solicitação veículo*” para a secretária, *Sá*, e ela fará a solicitação da viagem para o *Transportes*;



The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet titled "Microsoft Excel - solicitação veículo [Somente leitura]". The spreadsheet contains a form for vehicle requests. The data is organized as follows:

|    | A | B                              | C                    | D | E | F |
|----|---|--------------------------------|----------------------|---|---|---|
| 1  |   |                                |                      |   |   |   |
| 2  |   |                                |                      |   |   |   |
| 3  |   | <b>Solicitação de Veículo:</b> | Kombi                |   |   |   |
| 4  |   | Destino : Ribeirão da Onça     |                      |   |   |   |
| 5  |   |                                |                      |   |   |   |
| 6  |   | Datas:                         | Horário:             |   |   |   |
| 7  |   | 07/11/08                       | 08:00 as 17:00 horas |   |   |   |
| 8  |   | 21/11/08                       |                      |   |   |   |
| 9  |   | 05/12/08                       |                      |   |   |   |
| 10 |   | 19/12/08                       |                      |   |   |   |
| 11 |   |                                |                      |   |   |   |
| 12 |   |                                |                      |   |   |   |
| 13 |   | *Roberto Bergamo               |                      |   |   |   |
| 14 |   | Luiz Henrique Maldonado        |                      |   |   |   |
| 15 |   | Francisco Marcuzzo             |                      |   |   |   |
| 16 |   | Juliana Garcia                 |                      |   |   |   |
| 17 |   |                                |                      |   |   |   |
| 18 |   |                                |                      |   |   |   |

Figura 1

## Procedimento 002/2008

### O que fazer no dia anterior a ida ao campo

Versão 1.0 27/10/2008

- Ligar no *Transportes* e falar com a *Daniele*, ramal *9261*, para confirmar a reserva da *Kombi* para a data do campo;
- Carregar a bateria do notebook;
- Imprimir, caso seja necessário, os formulários “*checklist*”, “*Form\_medição de nível\_2*” e “*Form\_vazão*” (Figura 1) que se encontram no computador Saruman:
  - abrir o software “*SSH Secure File Transfer*”, clicar em “*quick connect*”;
  - Host Name: *192.168.1.1*;
  - User Name: *onca*;
  - Port Number: *22* e “*connect*”;
  - Password: consultar o responsável pela senha;
  - Clicar em “*onça campo*” e “*Formulários Campo*”;
- Verificar se a hélice do molinete está funcionando perfeitamente. Se ela estiver travando é necessário inserir “*óleo fino*” no rolamento do molinete.
- Verificar se a calça-bota apresenta algum tipo de furo: o procedimento é encher a calça de água e marcar o local do possível furo. Depois, usar *cola de sapateiro*, que se encontra na sala dos equipamentos de campo, para estancar o furo.



## Procedimento 003/2008

### Como obter dados do DIVER

Versão 1.0 22/11/2008

- Inicialmente verificar se o cabo para a transmissão de dados foi constado no checklist;
- Retirar o Diver do cabo tirando-o da rosca (Cuidado, a rosca é de plástico);
- Iniciar o software *Diver-Office* (Figura 1);

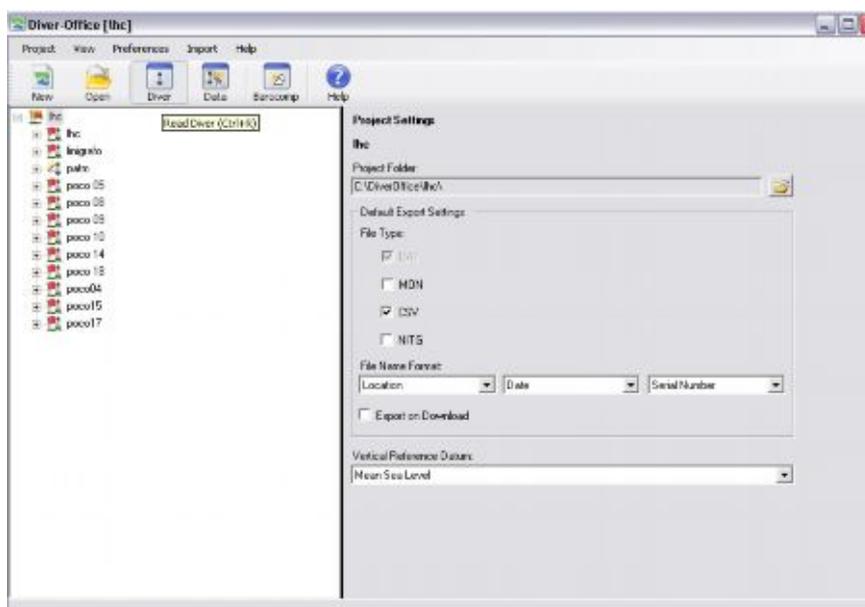


Figura 1 – Imagem do software Diver-Office

- Escolha o local do projeto (“*Project Folder*”) e o tipo de arquivo para exportação. A extensão CSV pode ser aberta no Office (Word e Excel);
- Após conectar o diver com o notebook, clicar no botão “*Diver*” (Figura 1). Observar que a comunicação do Diver com o notebook deverá ocorrer na sombra, caso contrário não haverá transferência de dados;
- Se não houver problemas de conexão, aparecerá na tela informações instantâneas de pressão e temperatura, o número de dados que o Diver armazenou (barra vermelha), bateria interna do

Diver (barra verde) e a ultima configuração executada neste diver: “*location*”, “*sampling method*” e “*sampling interval*” (Figura 2);

- Para baixar os dados que o Diver armazenou clique em “*Data*” (Figura 2);
- Se não houver problemas de conexão, aparecerá uma barra azul indicando a transferência de dados. Completada a transferência, aparecerá a tela inicial do “*Diver-Office*” e está concluída esta etapa;

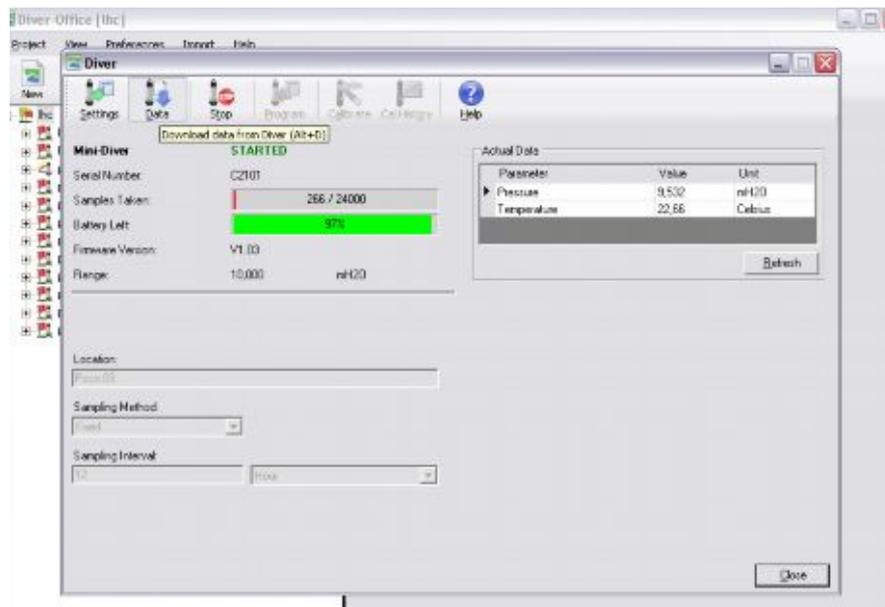


Figura 2

- Caso desejar reiniciar o Diver ou mudar o intervalo de coleta dos dados, clicar em “*Stop*”, “*Settings*”. Se for necessário, faça as futuras mudanças na coleta de dados e depois clicar em “*Program*” e “*Start*”. Notar que para a próxima leitura deve-se escolher a opção “*future start*” e colocar o horário da próxima leitura;
- Sincronizar o relógio do Diver com o notebook;

## PÓS-PROCESSAMENTO

- Para exportar os dados do Diver-Office, primeiro deve-se fazer a compensação barométrica dos dados armazenados pelo Diver. Assim clicar em “*Barocomp*”, Figura 3;

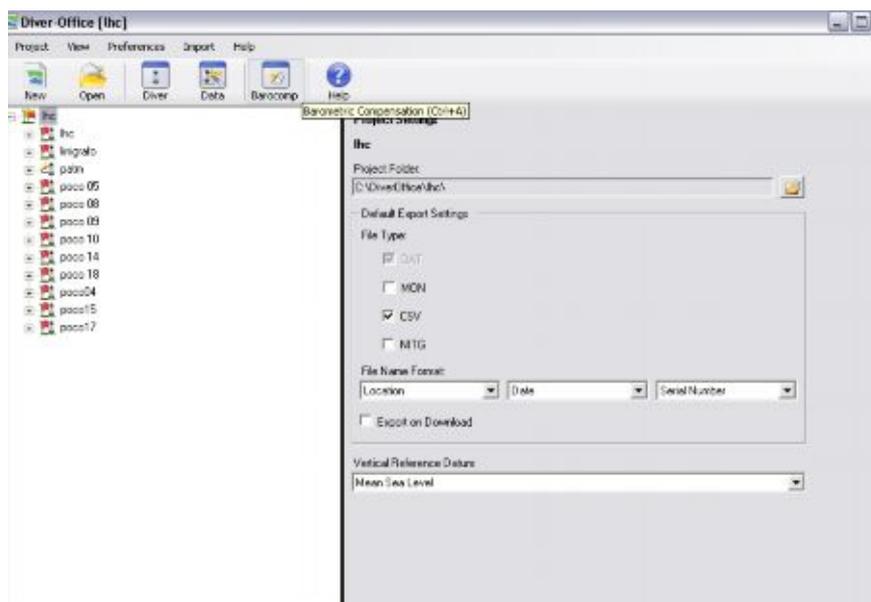


Figura 3

- Depois selecionar os arquivos que serão compensados barometricamente e clicar em “Barocomp” (Figura 4);

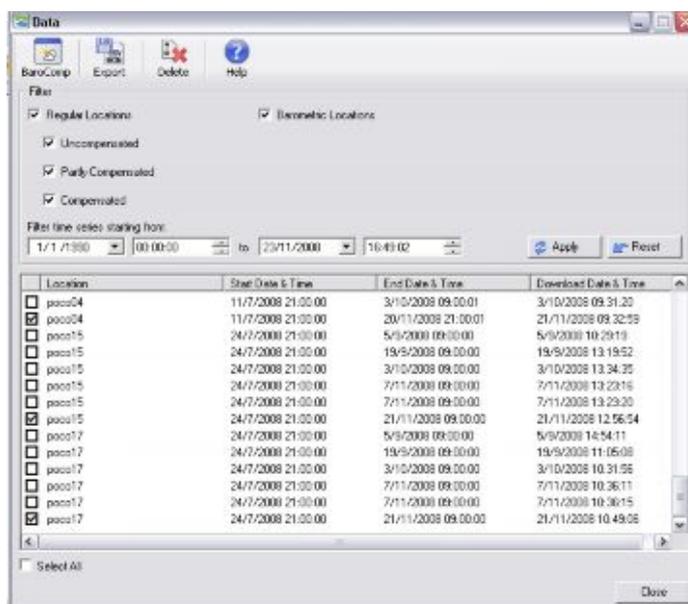


Figura 4

- Depois selecionar “water level with respect to top of casing”, escolher a opção “cable length” e clicar em “Baro.Comp” (Figura 5);

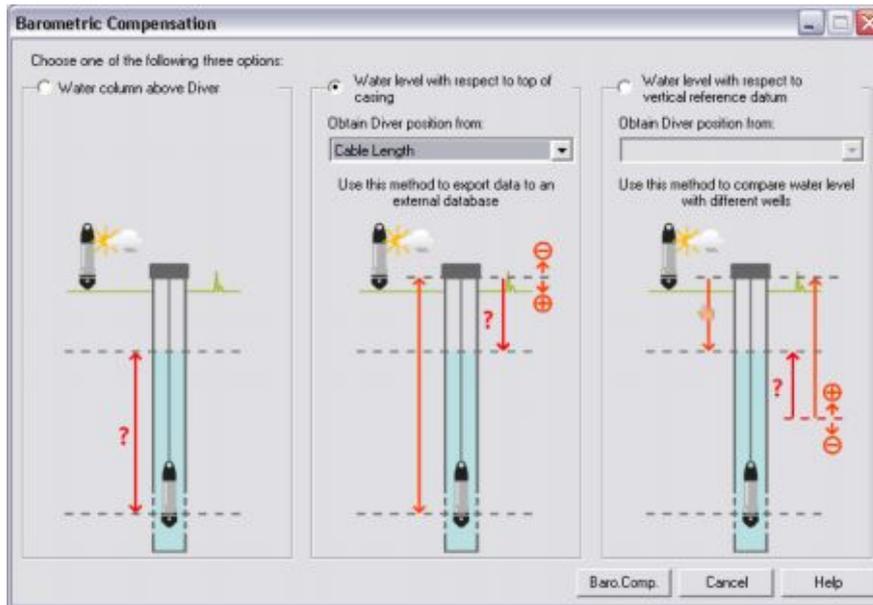


Figura 5

- Após a compensação barométrica, aparecerá uma tela indicando quais arquivos tiveram a compensação parcial, total e os que não tiveram compensação (Figura 6);
- No caso da Figura 6, os dados foram parcialmente compensados porque os dados de pressão atmosférica ultrapassavam o período de dados dos divers compensados.

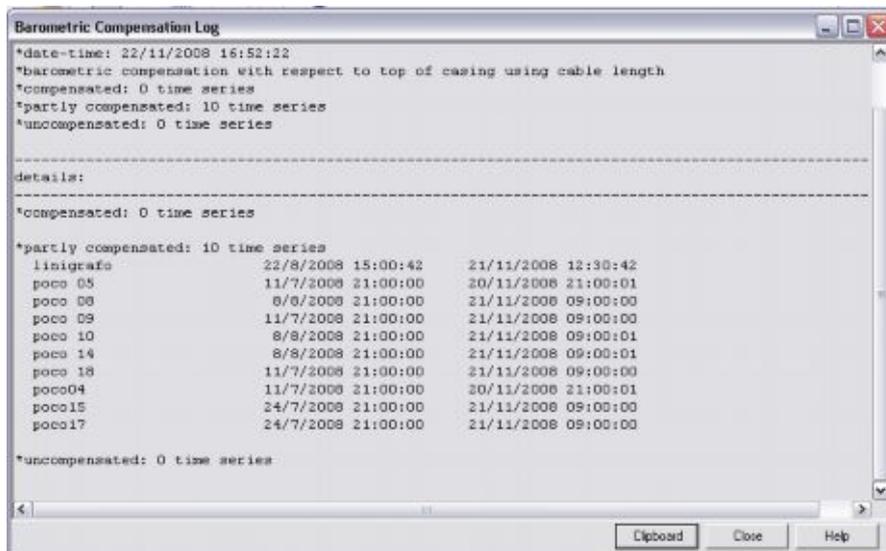


Figura 6

- Com os dados compensados, devem-se exportar os dados dos Divers: clicar com o botão direito do mouse no arquivo que se deseja exportar e clicar em “*export*” (Figura 7);

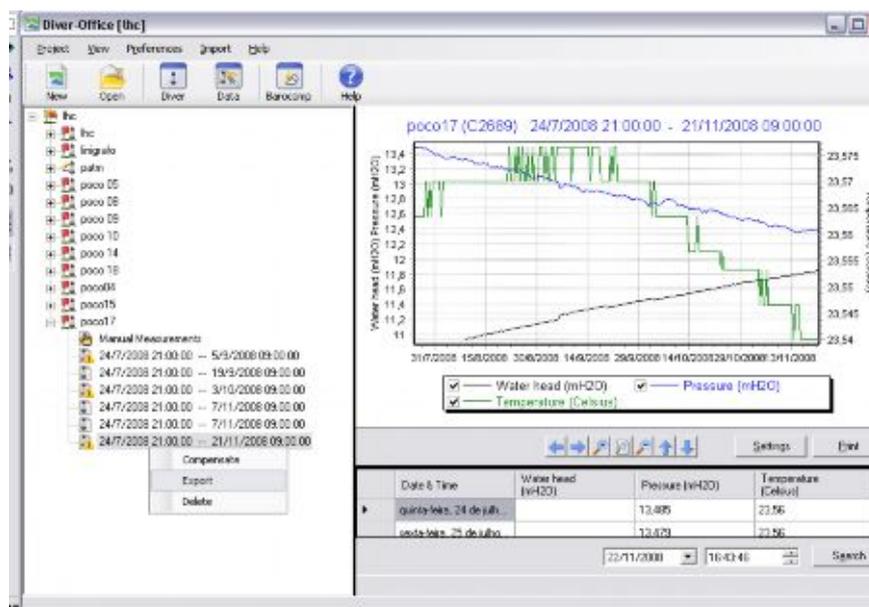


Figura 7

- Depois escolher a pasta para exportar os dados e escolher se os dados já estão compensados barometricamente ou não e clicar em “OK” (Figura 8);

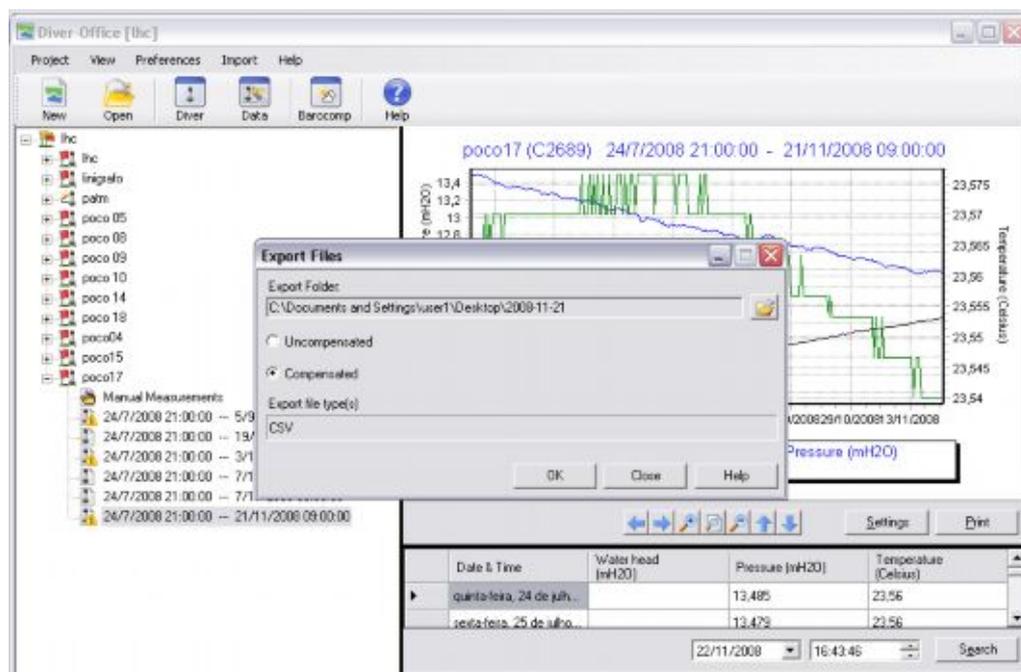


Figura 8

- Assim, se o processo de exportação dos dados ocorrer sem nenhum problema, aparecerá a mensagem “the following files have been exported sucessfully” (Figura 9).

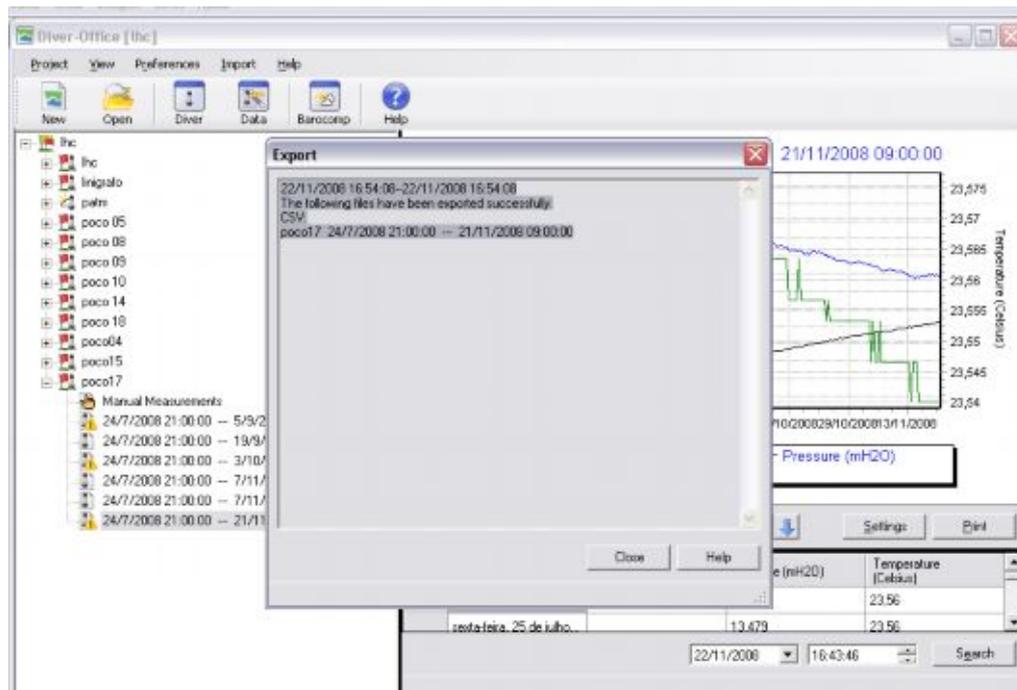


Figura 9

- Deve-se seguir este procedimento de exportação para cada Diver.

## Procedimento 004/2008

### Como obter dados do FLOATER

Versão 1.0 05/12/2008

- Inicialmente verificar se o cabo para a transmissão de dados foi constado no checklist;
- Conectar o cabo do Floater no PC. Notar que no cabo tem uma caixinha com uma bateria em seu interior. Para comunicação normal com o equipamento o led da caixinha se acenderá.
- Iniciar o software “WBedien32” (Figura 1);



Figura 1 – Tela inicial do Software WBedien32

- Clicar no Botão “MDS4: Floater...”. Os outros botões indicam outros equipamentos da marca SEBA HYDROMETRIE, na qual o software pode manipulá-los.
- Para a comunicação com o FLOATER, clicar em “Read/Operate”;
- Para ler os dados e zerar os dados do FLOATER, clicar em “Read and Restart” (Figura 2). Caso deseje ler os dados e não apagar os dados anteriores do FLOATER, clicar em “Read current values...” (Figura 2);

- Se houver falhas na comunicação verifique se o FLOATER está úmido, se o pino para a conexão do cabo está úmido ou conectado adequadamente, verificar se o cabo está conectado na porta USB correta e verificar se o cabo está com a bateria carregada.
- Quando houver comunicação do PC com o FLOATER, aparecerão os dados do FLOATER na parte inferior do software, ao lado da data e hora.

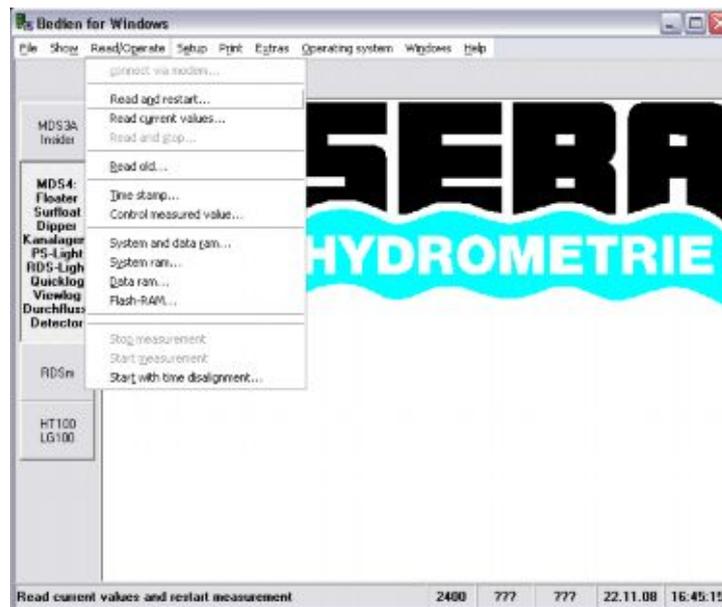


Figura 2

- Após clicar na opção “*Read and Restart*” ou “*Read current values...*” aparecerá a tela para gravar os dados do FLOATER. Assim, crie uma pasta com a data da coleta e para o nome do arquivo digite o nome do poço na qual está se fazendo a coleta dos dados.
- Depois só clicar em “*Salvar*” e pronto, os dados foram salvos no PC.

## CALIBRAÇÃO DO FLOATER

- Para calibrar o FLOATER é preciso fazer uma leitura manual da profundidade do aquífero em relação ao terreno.
- Depois se deve clicar em “*Setup*” e “*b value alignment*” (Figura 3);

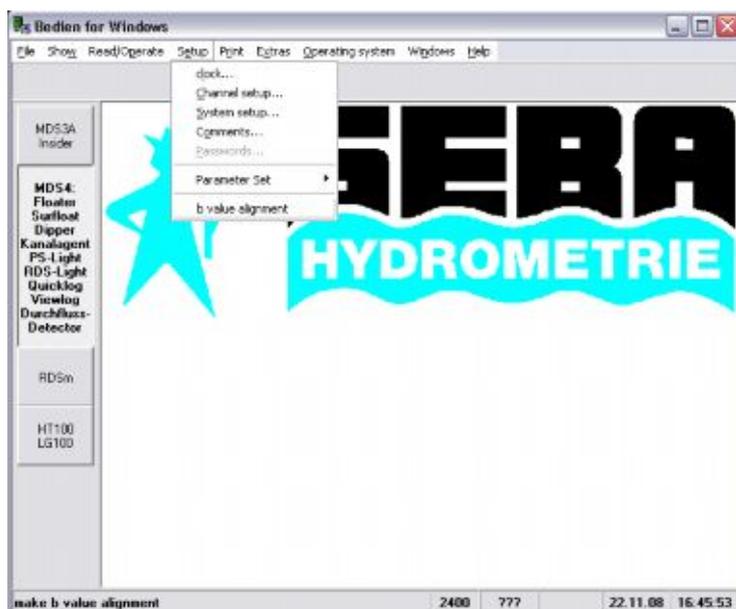


Figura 3

- Clicar em “*get value*” e automaticamente aparecerá na tela o valor da ultima leitura do FLOATER. Depois deve-se colocar o valor da medida correta, feita a partir do medição manual. Notar que o valor deve ser (negativo). Clicar o botão “*Enter*” do teclado.
- Assim, a constante “*b*” da equação do FLOATER para a obtenção dos dados será alterada.

## PÓS-PROCESSAMENTO

- Para exportar os dados do formato do FLOATER deve-se abrir o software “*WBedien32*” e clicar em “*File*”, “*file converts*” e “*MDS-3 to ASCII*” (Figura 4);

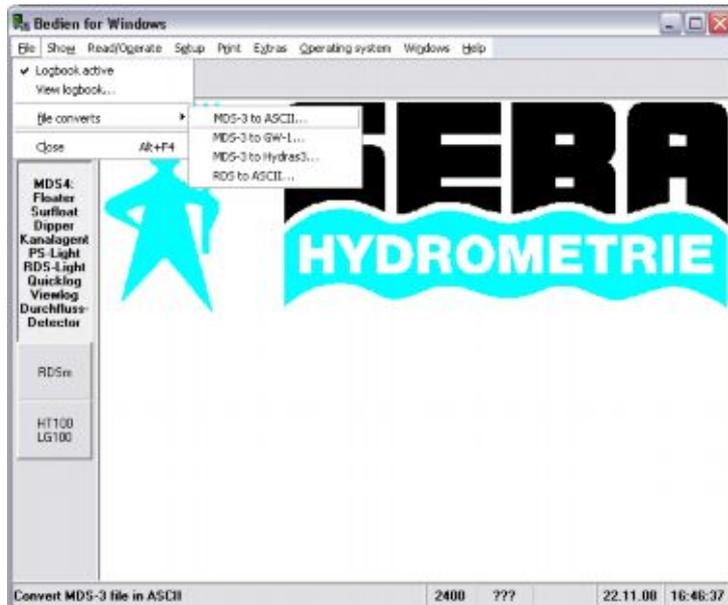


Figura 4

- Depois procurar a pasta onde o arquivo foi salvo e selecionar o arquivo no qual será exportado “From”. Depois colocar o nome do arquivo em formato ASCII “To” e selecionar a pasta que será exportado. Finalmente clicar em “Convert”.

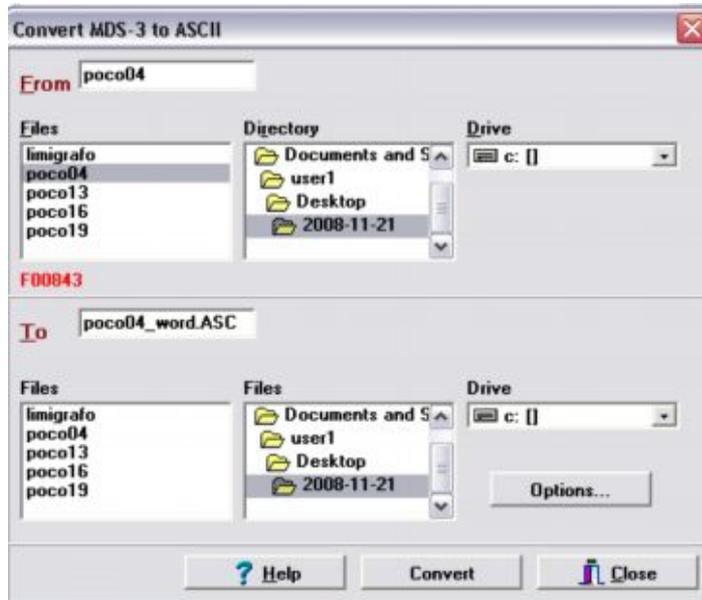


Figura 5

- Aparecerá a tela “Function executed!” se a exportação for executada com sucesso (Figura 6);



Figura 6

- Depois é só refazer este procedimento para todos os arquivos na qual serão exportados e está finalizada esta etapa.

## Procedimento 005/2008

### Como obter dados do FLO-TOTE3

Versão 1.0 06/12/2008

- Inicialmente verificar se o cabo para a transmissão de dados foi constado no checklist;
- Conectar o cabo do Flo-Logger ao PC;
- Iniciar o software *Flo-Ware* (Figura 1);

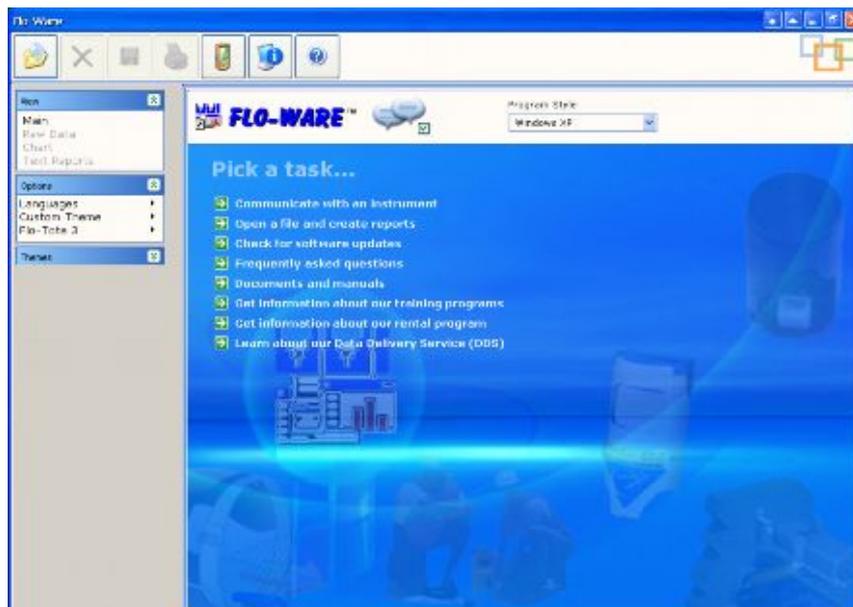


Figura 1

- Para coletar os dados do Flo-Tote3, clicar em “*Communicate with an instrument*”, depois em “*Flo-Tote3*” e “*Communications*” (Figura 2);
- Verificar se o aparelho está com bateria, se o cabo está conectado na porta USB correta.



Figura 2

- Para a leitura dos dados adquiridos pelo equipamento, clicar em “*Read Meter*” e depois em “*Read Main Memory*” (Figura 3);

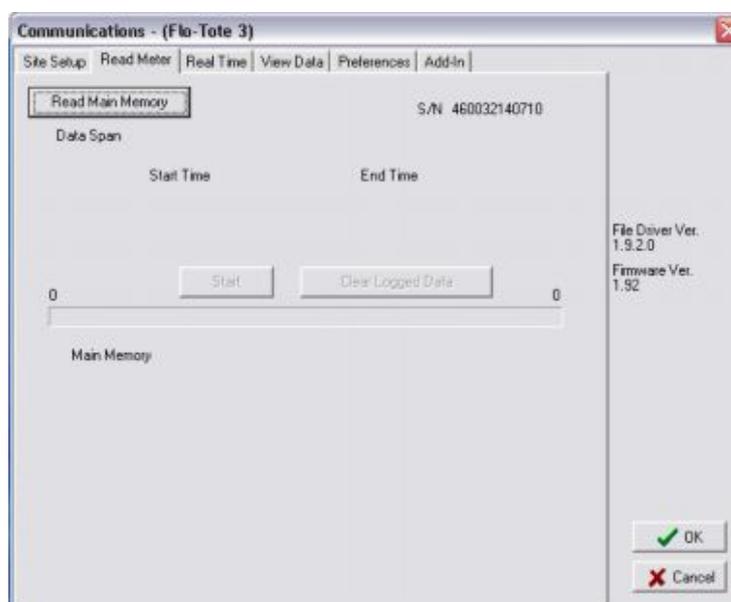


Figura 3

- Se não houver problemas de comunicação, aparecerão na tela a data de início das coletas e a data do fim (data da coleta) “*Start Time*” e “*End Time*”;

- Clique em “*Start*” e coloque um nome para o arquivo que será feito o download. Depois aparecerá uma barra azul para o acompanhamento do download dos dados do equipamento

para o PC. Quando estiver terminado o download dos dados aparecerá uma mensagem informando que os dados foram salvos (Figura 4);

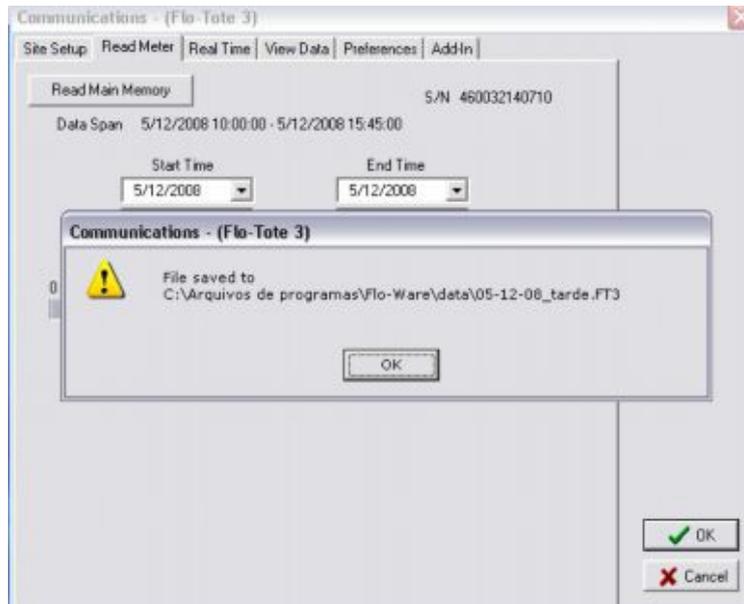


Figura 4

## NOVA CONFIGURAÇÃO

- Para se fazer uma nova configuração, clique em “*Site Setup*” (Figura 5);

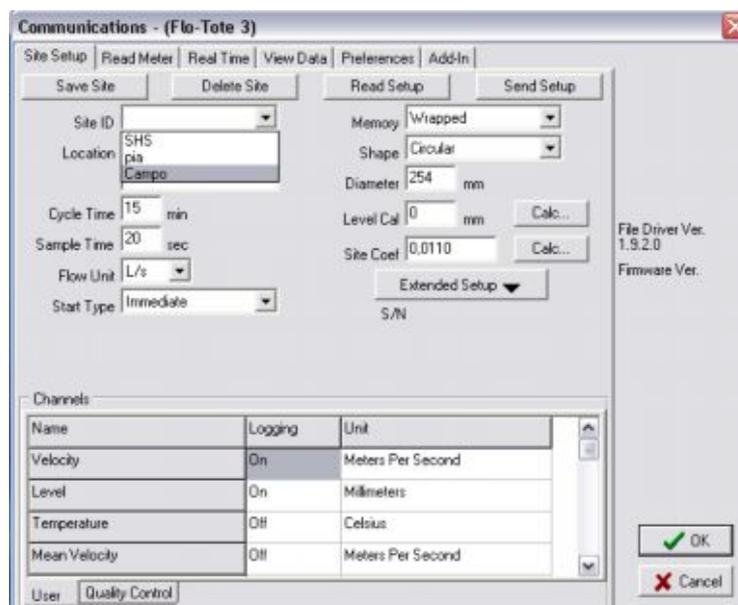


Figura 5

- Determine o nome do local das medições “*Site ID*”, do ciclo entre cada medição “*Cycle Time*” e do tempo de amostragem para a determinação dos valores a serem medidos “*Sample Time*”. No caso do campo, o Flo-Tote3 mede lâmina d’água e velocidade. Escolha a unidade e quando as coletas irão se iniciar “*Flow unit*” e “*Star Type*”, respectivamente;
- Configurado o equipamento, deve-se salvá-los clicando em “*Save Site*” e depois enviá-lo ao equipamento clicando em “*Send Setup*”;
- As configurações só serão utilizadas se aparecer a tela “*Send setup complete*”, Figura 6.

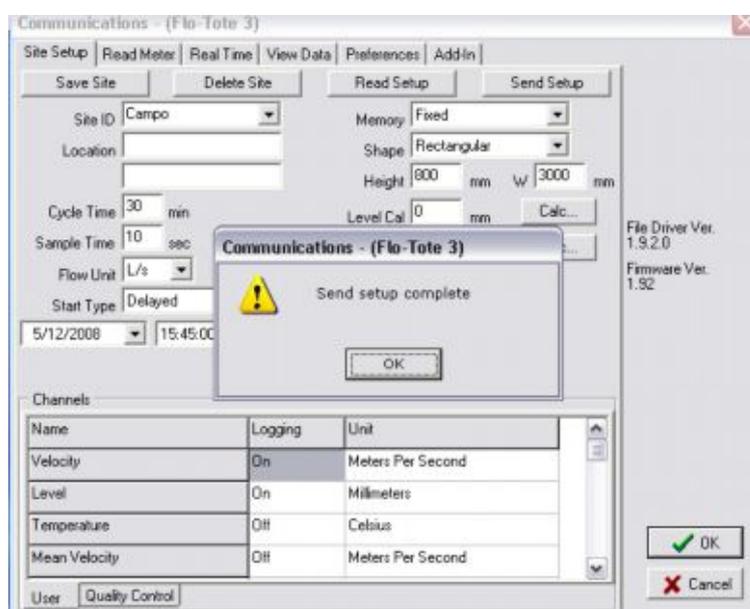


Figura 6

- Caso deseja-se ler as configurações que o equipamento está utilizando, deve-se clicar em “*Read Setup*”.
- Caso deseja-se medir as variáveis instantaneamente, deve-se clicar em “*Real Time*” e depois em “*Start*”. Para finalizar esta coleta momentânea, deve-se clicar em “*Stop*”.