

ERROS NA MEDIÇÃO DE VAZÃO – EFEITOS NA CURVA CHAVE

Lorenza Ferreira Oppa, Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, João Batista Dias de Paiva e Iris Rodrigues Marcon

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, eloiza@pq.cnpq.br

RESUMO

Em pequenas bacias, onde se originam os processos físicos envolvidos, depara-se com dificuldades inerentes aos métodos de medição de vazão e consequente construção de curvas cota vazão. A qualidade das informações fluviométricas depende da eficiência da avaliação dessas curvas, tornando-se importante a qualidade dessas informações. Entretanto, as dificuldades de uma coleta consistente, nas menores e maiores profundidades, podem, em alguns casos, impossibilitar a medição. Este trabalho objetiva avaliar os erros na medição de vazão e sua interferência na curva-chave. Foram feitas avaliações no erro de vazão em duas sub-bacias na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim (Rio Grande do Sul-Brasil), Rancho do Amaral e Rincão do Soturno. Esses erros foram feitos pela estimativa do erro da área da seção transversal do exutório e pela estimativa do erro da velocidade através de dados obtidos entre agosto de 2007 a março de 2008. Os resultados mostraram que, apesar da diferença de sensibilidade de cada aparelho, o maior erro é decorrente do erro da discretização da seção transversal.

ABSTRACT:

In small basins, where they give rise to the physical wrapped processes, come across difficulties inherent in the methods of measurement of flow and consequent construction of stage-discharge relation. The quality of the informations of the river depends on the efficiency of the evaluation of these curves, when the quality of these informations is becoming important. Meantime, the difficulties of a solid collection, in the least and biggest depth, can, in some cases, make the measurement impossible. This work aims to value the mistakes at the measurement of flow and sweats interference in the rating curve Evaluations were done in the error of flow in two sub-basins in the head of the Hydrological basin of the Rio Vacacaí Mirim (Rio Grande do Sul-Brasil), Rancho do Amaral and Rincão do Soturno. These errors were done by the estimate of the error of the area of the cross section of the exutório and by the estimate of the mistake of the speed through data obtained between August of 2007 to March of 2008. The results showed that, in spite of the difference of sensibility of each appliance, the biggest error is resulting from the error of the discretização of the cross section.

PALABRAS CLAVES:

Curva chave, Monitoramento dos Recursos Hídricos, Pequenas bacias.

INTRODUÇÃO

A compreensão dos regimes hidrológicos, para definição da disponibilidade hídrica e valores máximos e mínimos de vazão, resulta em grandes esforços no monitoramento de bacias hidrográficas. Em pequenas bacias, onde se originam os processos físicos envolvidos, depara-se com dificuldades inerentes aos métodos de medição de vazão e consequente construção de curvas cota vazão.

A qualidade das informações fluviométricas depende da eficiência da avaliação da curva-chave. Para uma boa avaliação é necessária a realização de medições de vazão em intervalos de profundidades que cubram toda a variação de nível do rio. Entretanto, nem sempre isso é possível, seja nas menores profundidades, onde em algumas situações as lâminas são tão baixas que inviabilizam o adequado posicionamento do equipamento, seja em lâminas altas nas quais há o transbordamento do mesmo para fora da calha fluvial, impossibilitando em alguns casos a medição. Outros aspectos de real significância, que nem sempre são considerados, são as lâminas baixas. Onde observa-se o escoamento no interior da camada de fundo entre as pedras do leito, que ocorre principalmente em pequenos rios de montanha. Rodrigues et al. (2003) mostram que essa vazão pode representar valores significativos no total da vazão medida.

No caso das vazões de cheia, uma causa visível de erro é a diferença de nível de água entre o início e o fim da medição. Em pequenas bacias, a passagem da onda de cheia é muito rápida. Nesses casos, não se utiliza a cota média para medição da vazão. O mais realístico é construir as curvas chave relacionando a cota em cada vertical de amostragem com a vazão de sua área de influência, obtendo posteriormente, de maneira indireta, a relação cota x vazão para toda a sessão a partir das curvas dos diversos segmentos em que ela foi dividida. Além das interferências relacionadas, se devem acrescentar os erros na medição de vazão.

As vazões são medidas periodicamente em estações fluviográficas. Já de forma contínua, são registrados os níveis de água nos rios e esses valores possibilitam encontrar o valor da vazão através da equação da curva chave. A equação da curva chave, comumente, é definida através dos dados de vazões medidas periodicamente.

Os dados coletados possuem erros que ocorrem ao longo das medições. Os principais erros na medida da vazão são devidos à estimativa da velocidade e área da seção transversal do escoamento.

Este trabalho objetiva avaliar os erros na medição de vazão e sua interferência na curva-chave. Foi desenvolvido com base em dados existentes de monitoramento de pequenas bacias hidrográficas formadoras da bacia do rio Vacacaí Mirim, no âmbito da Rede de Pesquisa em Bacias Representativas e Experimentais no Bioma da Mata Atlântica, na Região Sul do Brasil – Matasul.

BACIA EM ESTUDO

O Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (GHIDROS) vêm monitorando pequenas sub-bacias na região central do Estado do Rio Grande do Sul com áreas variando de 0,35 km² a 600 km², com diferentes condições de topografia e uso do solo. Dentre as bacias monitoradas destaca-se a bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim, cujos dados foram utilizados neste trabalho. A localização da bacia é apresentada na Figura 1.

A parte alta da bacia do Vacacaí Mirim drena área de mata nativa, característica do Bioma Mata Atlântica, apresentando ainda agricultura de cultivos anuais e permanentes, pecuária, balneários e área em urbanização.

Atualmente estão sendo monitoradas duas sub-bacias embutidas e seqüenciais na cabeceira do Rio Vacacaí Mirim, através de estações fluviográficas localizadas no Rancho do Amaral e no Rincão do Soturno, com áreas de aproximadamente 5 Km² e 12 Km², respectivamente. A figura 2 apresenta imagem das bacias. Este monitoramento faz parte da Rede de Pesquisa em Bacias Representativas e Experimentais do Bioma Mata Atlântica, na Região Sul do Brasil (<http://www.ufsm.br/matasulufsm>).

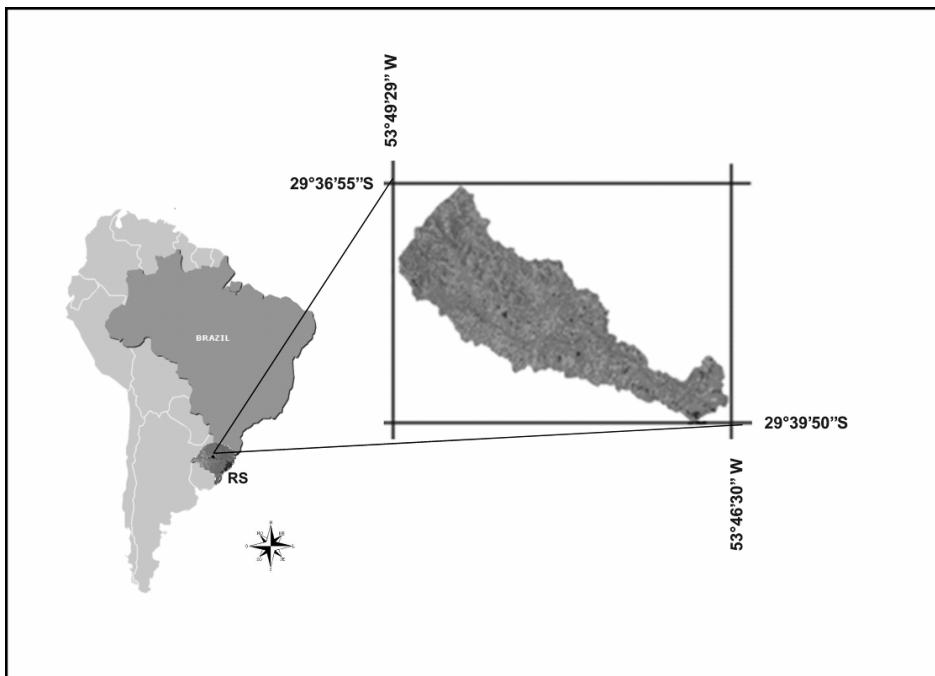


Figura 1. - Localização da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim.



Figura 2. – Imagem das bacias hidrográficas monitoradas.

Sub-Bacia Rincão do Soturno

A Sub-Bacia Rincão do Soturno possui aproximadamente 12 Km² de área. A estação fluviográfica possui seção transversal com 8 m de largura e o nível da água varia entre 0,17 m e 1,0 m. As medidas de nível são feitas continuamente pelo registrador de nível Thalimedes (OTT). Esse equipamento está configurado para registrar o nível em intervalos de tempo de 1 minuto e sempre que houver uma variação de pelo menos 0,5 cm. Variações inferiores de nível são devido a flutuação natural da superfície do escoamento.

O exútorio da sub-bacia do Rincão do Soturno possui coordenadas 29°38'37,5" Latitude Sul e 53°48'3,3" Longitude Oeste. As figuras 3 e 4 apresentam fotografia e desenho da seção transversal da estação fluviográfica desta sub-bacia.

Na localidade do monitoramento, o uso do solo é predominantemente de campo, pastagem natural e mata nativa. Entretanto, possui algumas moradias rurais nas proximidades do rio, indicando início de urbanização.



Figura 3. - Seção fluviográfica da Sub-Bacia Rincão do Soturno.

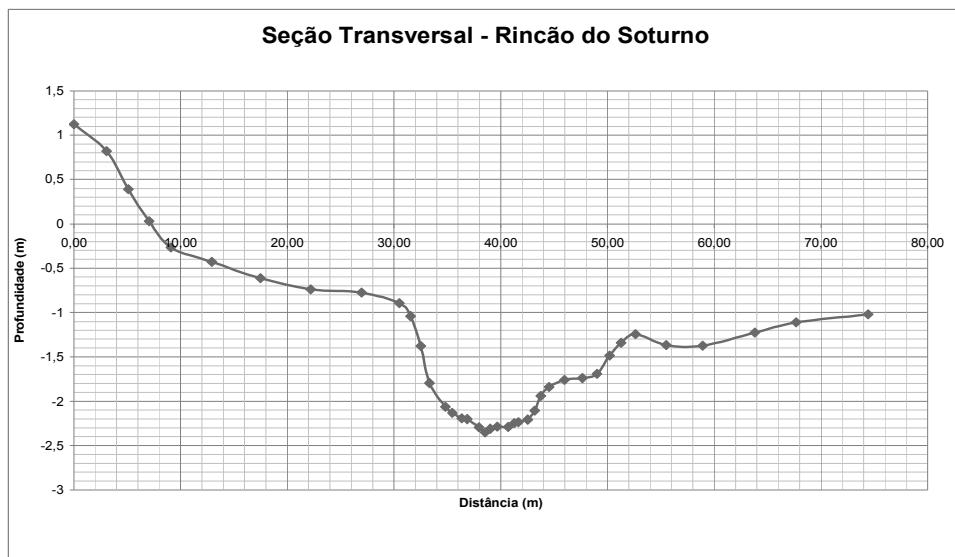


Figura 4. – Seção transversal da estação fluviográfica Rincão do Soturno.

Sub-Bacia Rancho do Amaral

A Sub-Bacia Rancho do Amaral possui 5 Km² de área, 5 m de largura do exutório e o nível da água varia de 0 a 47 cm. Essa bacia está embutida na Sub-Bacia Rincão do Soturno. As Figuras 5 e 6 mostram fotografia e desenho da seção fluviográfica da Sub-Bacia do Rancho do Amaral.



Figura 5. - Seção fluviográfica da Sub-Bacia Rancho do Amaral.

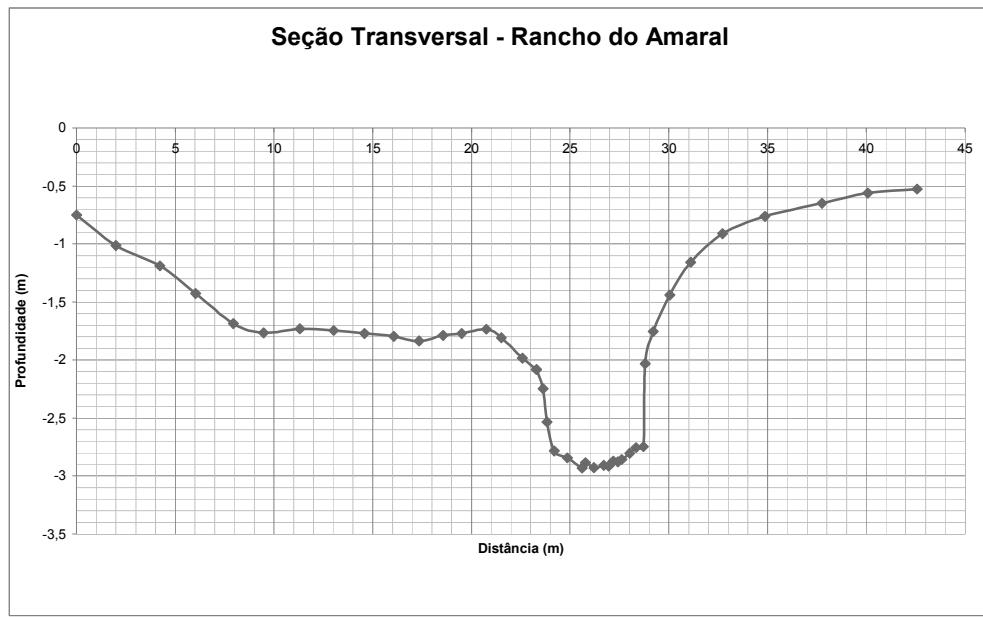


Figura 6. – Seção transversal da estação fluviográfica Rancho do Amaral.

O exutório da bacia possui coordenadas 29°37'49,7" Latitude Sul e 53°48'39,8" Longitude Oeste. A área é grande parte de mata nativa, possuindo também uma área campo e pastagem natural.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para medir descarga líquida é conhecida como área-velocidade. Esse método consiste no uso de um aparelho hidrométrico para determinar a velocidade e, conforme uma quantidade adequada de verticais, na representação da seção transversal. A largura do rio na seção de medição determina o número de verticais para a medida da velocidade. A profundidade utilizada é de apenas um ponto, localizada a 60% desta, pois o nível de água do rio não ultrapassa 1 m (Gomes & Santos). O espaçamento entre verticais foi de 0,5 m para a estação fluviográfica Rancho do Amaral e 1,0 m para a estação Rincão do Soturno.

Semanalmente é realizada medição de vazão nas sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno. A medida de velocidade da água é feita de forma não estrutural com o uso de molinete, micromolinete da marca OTT ou sensor de velocidade magnético indutivo NAUTILUS da OTT (Martins & Paiva, 2001). O micromolinete e sensor de velocidade são aparelhos adequados para medir velocidade onde o nível do rio não ultrapasse os 60 cm como nas sub-bacias em estudo, conforme Santos et al (2001).

Os erros na avaliação da vazão são resultantes dos erros nas medições da velocidade e nas áreas das seções transversais. Por outro lado, a determinação da área depende do número de verticais e da precisão dos comprimentos e profundidades dos escoamentos. Esses erros são mais significativos em rios pequenos, pois quanto menor a descarga do rio maior serão os erros (Masood et al. (1976) apud Paiva (1987)). Para estimar o erro total foram considerados os erros de leitura de comprimento e profundidade, de medição de velocidade e de discretização da seção transversal.

Estimativa de erro na avaliação da área da seção transversal

O erro devido à discretização da seção transversal foi avaliado conforme Masood et al. (1976) apud Paiva (1987). Conforme esse autor, a área é medida por determinado número de medidas discretas de profundidades e espaçamentos. Contudo, se é assumido que as medidas verticais são igualmente espaçadas através da largura da superfície da água, tem-se:

$$\hat{A} = \left[\frac{1}{2}(Y_1 + Y_N) + \sum_{i=2}^{N-1} Y_i \right] d_x \quad [1]$$

Onde:

\hat{A} = área estimada da seção transversal;

Y = profundidade de água;

d_x = espaçamento entre medidas verticais;

N = número de medidas verticais.

Os autores citados analisam o erro na determinação da área da seção transversal de canais, devido à discretização, chegando à seguinte equação:

$$\frac{E_A}{C_V} = \frac{11}{N^{1.56}} \quad [2]$$

Onde:

E_A = erro na determinação da área da seção transversal devido à discretização;

$$C_V = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \mu_y)^2}}{\mu_y}$$

$$\mu_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

Entretanto, a aplicabilidade da equação [2] depende do tipo de seção analisada, sendo quantificada pelos seus primeiros quatro momentos, através dos coeficientes:

$$a_1 = \frac{\mu'_1 - B/2}{B} \cdot 100 \quad [3]$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{\mu'_2}}{\mu'_1} \cdot 100 \quad [4]$$

$$a_3 = \frac{\mu'_3}{\sqrt{\mu'_2}} \quad [5]$$

$$a_4 = \left(\frac{\mu'_4}{\mu'_2} - 3 \right) \quad [6]$$

Onde:

$$\mu_r = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i \cdot (x_i - \mu'_1)^r}{\sum_{i=1}^N Y_i}$$

$$\mu'_r = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i \cdot (x_i)^r}{\sum_{i=1}^N Y_i}$$

x_i = distância a partir de uma margem de água;

r = ordem do momento;

B = largura da superfície da água.

A aplicabilidade da equação [2] depende da faixa de variação destes coeficientes. Para avaliar este erro foram utilizados duas medições de vazão para cada estação, que corresponde aos eventos limites (superior e inferior) observados. Na sub-bacia Rincão do Soturno as variações dos momentos estão nos limites recomendados. Para o Rancho do Amaral as variações dos momentos a_2 e a_4 não ficaram na faixa recomendada, porém foram aplicadas para fins de comparação. Esta limitação ocorreu devido às irregularidades da seção transversal do Rancho do Amaral, relativas à pequena dimensão e granulometria grosseira do material do leito, que pode ser observado na figura 5. Como os momentos dependem da seção analisada a irregularidade da seção pode ter sido a

motivo da não conformidade com as faixas de variação nesse caso. O número de verticais utilizadas variou de 9 a 5.

Os erros de medição de comprimentos e profundidades foram avaliados pelo desvio padrão de uma série de medições realizadas “in loco”. O erro total na estimativa da área foi computado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros devido à discretização e erro de leitura de comprimento e profundidades.

Estimativa de erro da velocidade

Foram considerados todos os valores de velocidade obtidos para construção das curvas-chave no período monitorado. Como para a determinação da velocidade em cada vertical foram realizadas 3 medidas, estes valores foram separados por faixas de velocidade e determinados seus desvios em relação à média. Esses dados foram tratados trabalhando com o desvio padrão de cada ponto. O erro na medição da velocidade foi obtido da média dos desvios padrões dos erros, dividido pela raiz de n medidas de velocidade, conforme Vasconcelos (2007). Neste caso n é igual a 3. A avaliação foi realizada separadamente para os três tipos de aparelhos que foram utilizados: sensor de velocidade (Nautilus, OTT), micromolinete e molinete.

Estimativa de erro da vazão

Para estimativa do erro da vazão foi utilizada, conforme Vasconcelos (2007), a seguinte equação:

$$\Delta Q = V \cdot \Delta A + A \cdot \Delta V \quad [7]$$

Onde:

ΔQ = Erro da vazão;

ΔA = Erro da área;

ΔV = Erro da velocidade;

V = Velocidade média (m/s);

A = Área estimada da seção transversal (m^2).

RESULTADOS

Os valores dos erros devido à discretização da seção transversal foram de 0,0296 m^2 e 0,0202 m^2 para a estação Rincão do Soturno, respectivamente para as vazões máximas e mínimas medidas, representando 7 e 15% da área medida. Da mesma forma, para a estação Rancho do Amaral, foram obtidos os erros devido à discretização da área de 0,0765 m^2 e 0,0063 m^2 , representando 5 e 14 % da área medida, respectivamente para a máxima e mínima vazão medida. Quanto aos erros de medição de profundidades e comprimentos, foram encontrados valores que variaram entre 0,03 a 0,3%. Assim, os erros na medição de comprimentos com relação aos erros de discretização tornam-se desprezíveis.

Os gráficos das figuras 7 a 9 apresentam os desvios observados nas medidas de velocidade na seção fluviográfica Rincão do Soturno, para os três aparelhos: sensor de velocidade, micromolinete e molinete. Pode-se observar que não existe tendência marcante de crescimento destes erros com o valor da velocidade. Desta forma, pode-se considerar um valor constante médio para cada aparelho.

Os valores médios dos erros obtidos para a velocidade variam de acordo com o aparelho utilizado para a medida de vazões. Na estação fluviográfica Rancho do Amaral os erros foram de 0,0020 m/s para o sensor de velocidades Nautilus da OTT, 0,0038 m/s para o micromolinete e 0,0039 m/s para o molinete utilizado nas vazões altas. Essas variações são embasadas em velocidades que variaram entre 0,1728 m/s e 0,6779 m/s. Na estação fluviográfica do Rincão do Soturno os valores dos erros obtidos foram de 0,0012 m/s para o Nautilus, 0,0018 m/s para o micromolinete e 0,0034 m/s para o molinete. Estes resultados demonstram a sensibilidade de cada aparelho utilizado na determinação da velocidade.

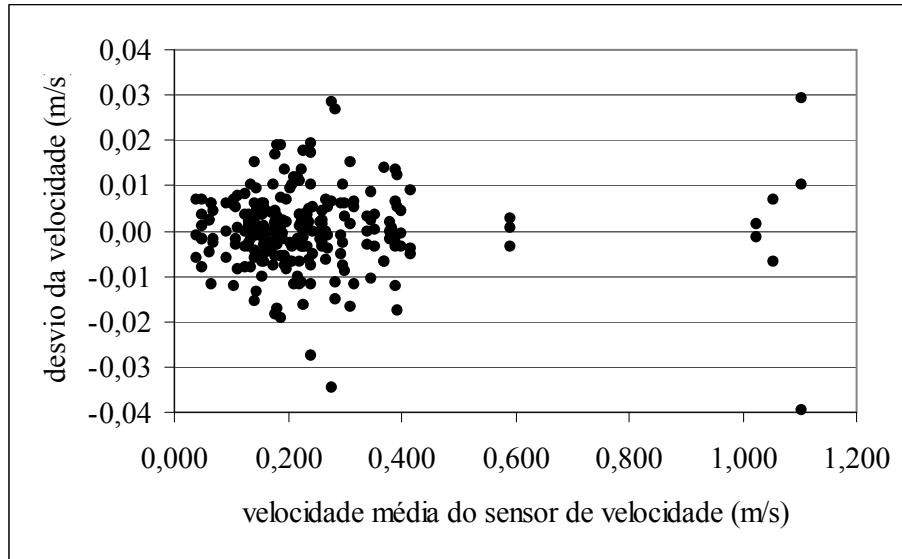


Figura 7. – Desvios da velocidade média observados no sensor de velocidade, para a seção Rincão do Soturno.

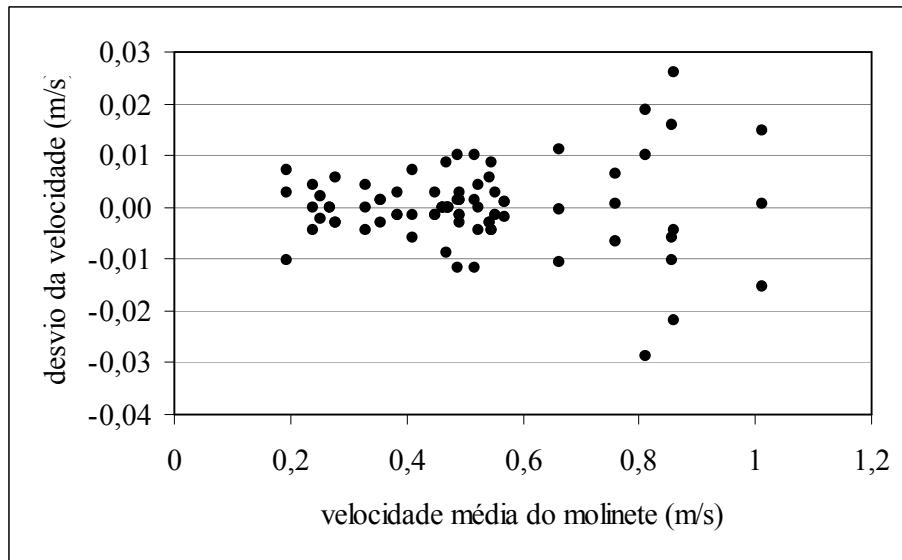


Figura 8. – Desvios da velocidade média observados no molinete, para a seção Rincão do Soturno.

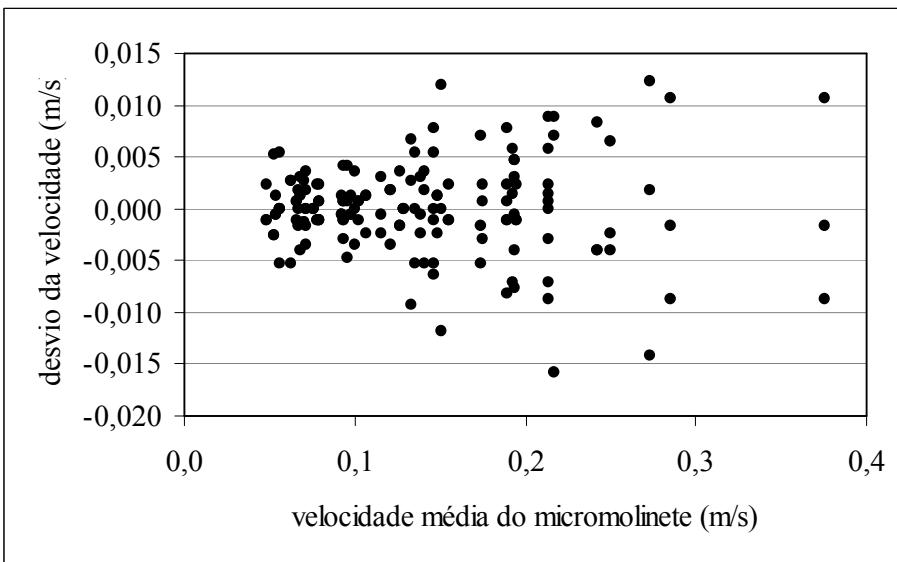


Figura 9. – Desvios da velocidade média observados no micromolinete, para a seção Rincão do Soturno.

Os gráficos das figuras 10 a 12 apresentam os desvios observados nas medidas de velocidade na seção fluvigráfica Rancho do Amaral, para os três aparelhos: sensor de velocidade, micromolinete e molinete. Pode-se observar que não existe tendência marcante de crescimento destes erros com o valor da velocidade. Desta forma, pode-se considerar um valor constante médio para cada aparelho.

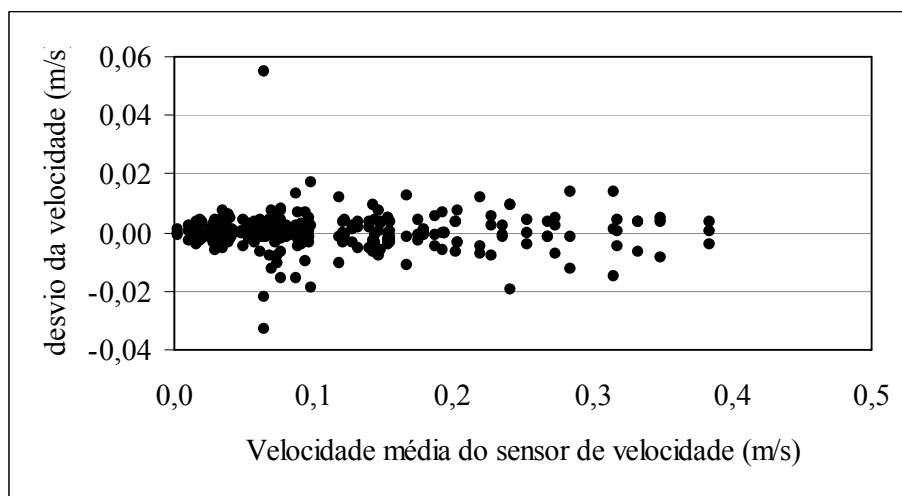


Figura 10. – Desvios da velocidade média observados no sensor de velocidade, para a seção Rancho do Amaral.

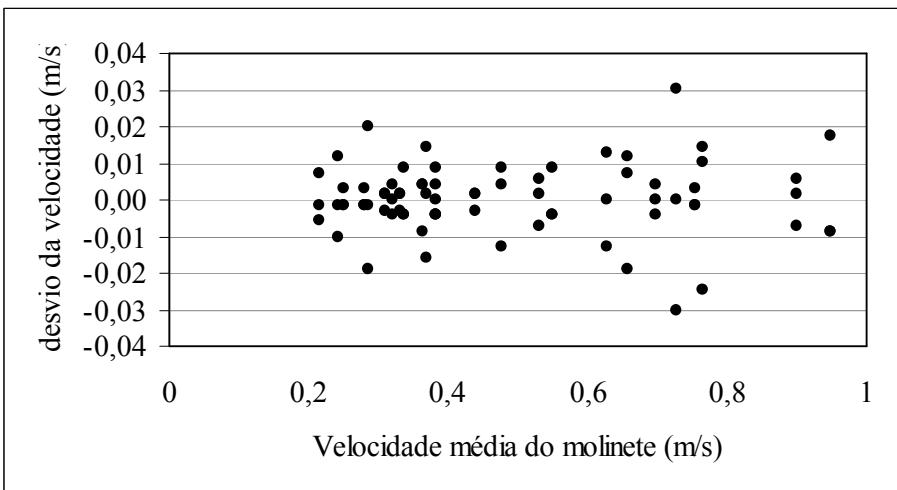


Figura 11. – Desvios da velocidade média observados no molinete, para a seção Rancho do Amaral.

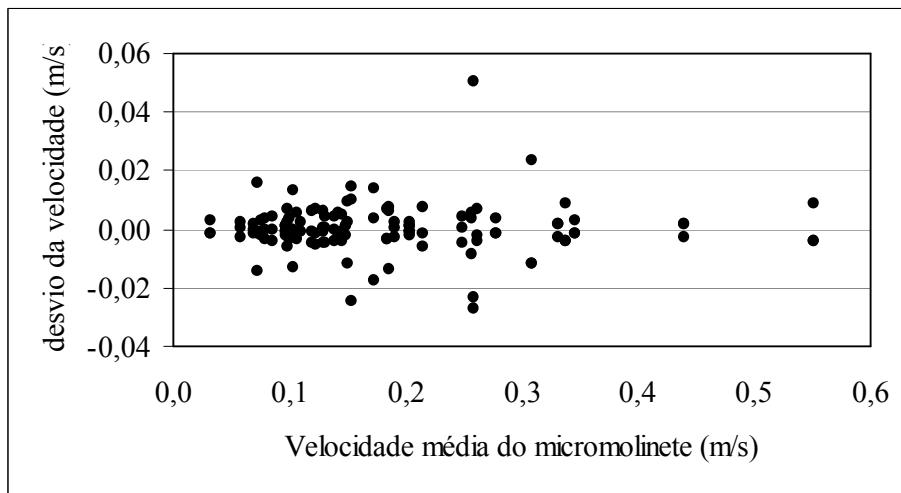


Figura 12. – Desvios da velocidade média observados no micromolinete, para a seção Rancho do Amaral.

Os erros totais da medida de vazão máxima medida, para a estação Rancho do Amaral variaram de $0,055 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,057 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,057 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando o sensor de velocidade, micromolinete e molinete, respectivamente. Para a vazão mínima os erros foram de $0,0012 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,0013 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,0013 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente para os três aparelhos, sensor de velocidade, micromolinete e molinete. Estes erros correspondem a 5,7 % e 15,1% da vazão medida. Observa-se que, apesar da diferença de sensibilidade de cada aparelho, a maior diferença é decorrente do erro da discretização da seção transversal. No caso da estação Rincão do Soturno os erros encontrados na máxima vazão medida foram para o sensor de velocidade, micromolinete e molinete de $0,0268 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,0288 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,0339 \text{ m}^3/\text{s}$, representando cerca de 1,2 % da vazão calculada. Para a vazão mínima os resultados foram de $0,0035$, $0,0036$ e $0,0038 \text{ m}^3/\text{s}$, representando cerca de 16% da vazão.

As figuras 13 e 14 apresentam os gráficos das curvas-chave das estações Rincão do Soturno e Rancho do Amaral, respectivamente. Os gráficos apresentam os pontos medidos e duas linhas representando os limites inferior e superior da curva-chave, baseados nos erros totais calculados. Foi considerado o ajuste dos pontos medidos e os erros resultantes, tendo por base os limites de 1 e 16% calculados para o Rincão do Soturno (figura 13) e 5 e 15% calculados para o Rancho do Amaral (figura 14).

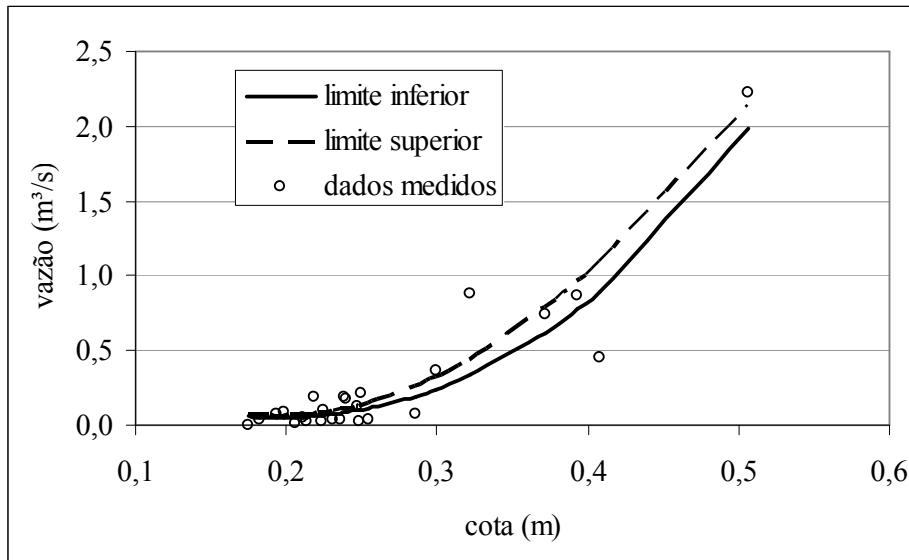


Figura 13. – Curva-chave da estação fluviográfica Rincão do Soturno.

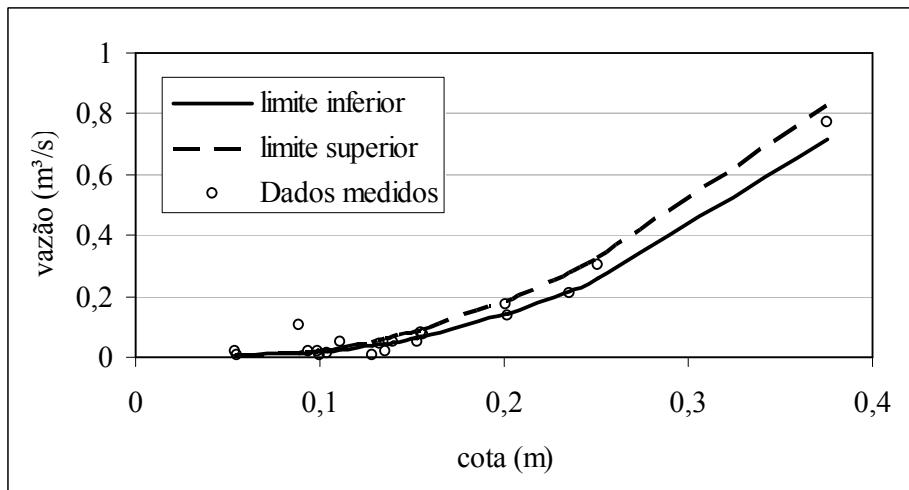


Figura 14. – Curva-chave da estação fluviográfica Rancho do Amaral.

Observa-se que nas curvas-chave os pontos medidos com cota baixa apresentam valores fora da faixa de erro calculada. Ao contrário das cotas altas que possuem valores dentro dos limites de erro. Como se trata de rios de montanha, parte do escoamento pode ocorrer sub-superficialmente, conforme Rodrigues et al (2003), trazendo erros na medida do escoamento superficial. Outros tipos de interferências podem ocorrer em cotas mais elevadas, como a construção de barramentos próximos a seção de medição, em pequenos intervalos de tempo, mostrando a impossibilidade de se ter um controle total das condições na seção monitorada. Este tipo de interferência ocorreu na estação Rincão do Soturno como pode ser observado na figura 15.



Figura 15. – Figura apresentando o barramento na seção Rincão do Soturno. Vista de montante para jusante.

4 – CONCLUSÕES

Este trabalho mostra os erros obtidos do monitoramento feito de agosto de 2007 a março de 2008 em duas sub-bacias embutidas e seqüências na cabeceira da Bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim. Através dos dados desse período foi possível fazer um estudo do erro da vazão nos pontos de monitoramento.

O cálculo do erro da área mostrou que quanto maior o número de verticais retiradas de uma seção menor será esse erro, pois o erro é menor na vazão alta onde são calculadas mais verticais, nas duas sub-bacias.

O erro nos aparelhos varia de um para outro nas duas sub-bacias. Entretanto, a variabilidade dos desvios padrões é harmônica não havendo tendência marcante de crescimento dos erros com o valor da velocidade. Observa-se que, apesar da diferença de sensibilidade de cada aparelho, a maior erro é decorrente do erro da discretização da seção transversal.

Rios de montanha apresentam singularidades de escoamento sub-superficial e leito rochoso que podem prejudicar a medição de vazão e construção da curva-chave em vazões baixas.

Construção de estruturas de barramento executadas pela população ribeirinha pode contribuir de forma significativa nos erros nos dados monitorados. Esta situação está fora do alcance da estrutura de monitoramento montada.

AGREDECIMENTOS

À MCT/FINEP/CT-HIDRO e CNPq pelo financiamento e pelas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gomes, J. & Santos, I. dos. (1999) “Análise comparativa de campanhas de medição de descarga líquida pelos métodos convencional e acústico.” In: *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais...Belo Horizonte - MG, 1999. CD-ROM.*

Martins, E. S. P. R. & Paiva, J. B. D. de. (2001) “Quantidade dos recursos hídricos.” In: *João Batista Dias de Paiva; Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva. (Org.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas..* Porto Alegre: ABRH, 2001, v. 1, p. 531-566.

Medeiros, M. J. & Naghettini, M. (2003). “O uso de regressão local ponderada não paramétrica para extração do ramo superior de curva-chave a partir das características geométricas da seção transversal.” In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais...Curitiba – PR: ABRH, 2003. CD-ROM.*

Paiva, E. M. D. (1987). “Desempenho de Revestimentos de canais em condições de campo”. *Dissertação (Mestrado em Engenharia)* – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

Paiva, J. B. D.; Paiva, E. M. C. D.; Paranhos, R. M. ; Emmer, R. (2001) “Curvas chave de vazões e de sedimentos de pequenas bacias hidrográficas rurais. O que representam?”. In: *Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva; João Batista Dias de Paiva. (Org.). Caracterização Quali-quantitativa da produção de sedimentos.* Santa Maria-RS: ABRH-UFSM, 2001, v. , p. 53-79.

Rodrigues, A.C.L.; Srinivasan, V.S.; Santos, C.A.G.A. Suzuki, K. (2003) “Resistência ao fluxo em canais íngremes com leito de cascalho.”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* Porto Alegre - RS: ABRH-UFSM, v.8, n.2, p. 57-73.

Santos, I.; Fill, H. D.; Sugai, M. R.; Buba, H.; Kishi, R. T.; Marone, E.; Lautert, L. F. (2001). “Medição de vazão líquida.” In: *Hidrometria Aplicada.* Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. 372p.

Vasconcelos, J. G. (2007). “*Apostila do curso de hidráulica experimental.*” Disponível em: <<http://www.unb.br/ft/enc/recursoshidricos/goes/ementasLH/Apostila%20Hidraulica%20Experimental.pdf>>. Acesso em 02 mar. 2008.