METODOLOGIA DE PSEUDO-EXTRAPOLAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DE CURVAS-CHAVE

André Luis Sefione[1], Joana Darc Freire de Medeiros[2],André Mitto Dornelles[3] e Joel Avruch Goldenfum[4]

Resumo - O objetivo deste trabalho é avaliar os métodos Logarítmico e de Stevens para extrapolação superior de curvas-chave utilizando 28 estações fluviométricas com perfis de seções transversais regulares, a partir de uma metodologia proposta e denominada de Pseudo-Extrapolação. Para tanto são suprimidas as medições na porção superior da faixa total de cotas medidas e a curva-chave é extrapolada nesta faixa, utilizando os métodos selecionados. Os resultados desta Pseudo-extrapolação são comparados com os de uma curva-chave ajustada a partir da faixa total de cotas medidas. Verificou-se, para as estações analisadas, a partir das diferenças entre as vazões estimadas pelas metodologias e aquelas calculadas pela curva-chave, que o método de Stevens apresenta erros menores e tende a subestimar as vazões máximas enquanto o método Logarítmico apresenta erros maiores e tende a superestimar as vazões máximas. A metodologia de Pseudo-Extrapolação mostrou ser uma ferramenta útil para o estudo e a comparação de diferentes métodos de extrapolação da curva-chave, devendo, portanto, ser utilizada para análise de outros métodos.

Abstract - The aim of this work is to evaluate the Logarithmic and Steven methods to extrapolating the rating curve using 28 hydrometric stations with regular traverse sections profiles, starting from a methodology proposal denominated Pseudo-extrapolation methodology. The rating curve was drawn in the total range of measured levels. The mensurations of the higher half of this range was suppresses and a Pseudo-extrapolation was performed, using the selected methods. The obtained results of the Pseudo-extrapolation were compared whit those of the rating curve initially computed. It was verified, for the analyzed stations, that the Steven method presents smaller mistakes and it

[1] Mestrando do IPH/UFRGS (sefione@if.ufrgs.br).

[2] Doutoranda do IPH/UFRGS (joana@if.ufrgs.br).

[3] Graduando do Curso de Eng. Civil da UFRGS (mito@vortex.ufrgs.br).

[4] Prof. Dr. do IPH/UFRGS (joel@iph.ufrgs.br).

tends to underestimate the maximum flood while the Logarithmic method presents larger mistakes and it tends to overestimate the maximum flood. The results showed that the Pseudo-extrapolation methodology is an useful tool for studying and comparing different methods of rating curve overstepping, owing, therefore, to be used for analysis of another methods.

Palavras-Chave : curva-chave ; extrapolação; vazão.

INTRODUÇÃO

A precisão dos dados utilizados em estudos hidrológicos é um dos componentes que mais influenciam no grau de confiabilidade dos mesmos, podendo contribuir para minimizar suas incertezas. Dentro desse conjunto de informações, os dados de vazão dependem diretamente de uma curva-chave de boa qualidade.

A curva-chave é uma ferramenta criada para determinação dos valores de vazão a partir do nível da água (cota) numa dada seção do curso d'água, permitindo o cálculo da vazão na referida seção a partir da leitura da cota num dado instante. Esta ferramenta é amplamente usada, uma vez que é praticamente impossível, até o momento, obter uma série histórica de vazões a partir de medições diretas. Por outro lado, as dificuldades normais de medição de vazão durante períodos de cheia, para determinação da curva-chave, impedem que a mesma seja estendida para as cotas mais altas registradas (cotas observadas), sendo essas vazões extremas uma informação importante em muitos estudos hidrológicos.

Para contornar este problema, foram criados alguns métodos para extrapolação da curva-chave a partir de informações ou parâmetros outros, possíveis de se medir ou estimar, como declividade da linha d'água, geometria da seção transversal ou rugosidade do trecho hidrométrico. No entanto, como toda extrapolação, estas metodologias apresentam incertezas, podendo comprometer seriamente os dados de vazão gerados na faixa extrapolada (Chevallier, 1997; Fill, 1987).

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa entre dois métodos tradicionais de extrapolação superior de curvas-chave em um conjuntos de estações fluviométricas e suas respectivas curvas-chave, com perfis de seção transversal semelhantes, utilizando a metodologia de Pseudo-estrapolação.

MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO DE CURVAS-CHAVE UTILIZADOS

Extrapolar a curva-chave significa prolongar criteriosamente a mesma, além da faixa de cotas registradas nas medições de vazão (cotas medidas), a fim de se evitar falhas no fluviograma ou com o propósito de se estimar a vazão para uma cota extrema qualquer, seja inferior ou superior (Fill, 1987).

Os métodos de extrapolação superior de curvas-chave utilizados neste trabalho foram: método Logarítmico e método de Stevens.

Método Logarítmico

Esse método baseia-se na hipótese de que a parte superior da curva-chave obedece uma equação do tipo:

$$Q = k(h - h_o)^n \qquad (1)$$

onde: k e n = coeficientes de ajuste para cada curva

h = cota referente a uma vazão Q

h_o = cota referente a descarga nula.

A extrapolação é feita, portanto, pelo simples prolongamento da equação Q=***f***(h), ajustada às medições disponíveis, até as cotas extremas observadas. O hidrólogo hoje tem à disposição softwares que auxiliam no ajuste e determinação da equação para cada curva-chave.

O método requer as seguintes condições: relação Q=f(h) unívoca; perfil transversal sem singularidades na faixa de cotas extrapoladas e permanência do controle entre as cotas médias e altas (Fill, 1987; Jaccon e Cudo, 1989; Tucci e Silveira, 1985).

Este método foi até a década de 80, muito utilizado no Brasil, para extrapolação superior da curva-chave à revelia de suas restrições (Fill, 1987).

Método de Stevens

Método baseado na fórmula de Chezy, que calcula velocidade do fluxo em canais sob escoamento uniforme:

$$V = C\sqrt{R_h i} \qquad (2)$$

onde: C - coeficientes variável, função do raio hidráulico (R_h) e da natureza do leito.

i - declividade da linha de carga assumida igual à declividade do fundo (I) e da linha d´água (J).

Igualando-se a equação de Chezy aàequação da continuidade tem-se:

$$\frac{Q}{A_m\sqrt{R_h}} = C\sqrt{J} \qquad (3)$$

onde: $C\sqrt{J}$ é o fator de declividade e $A_m\sqrt{R_h}$ é o fator geométrico da seção (A_m = área molhada).

Quando o fator de declividade é constante, o gráfico da Vazão pelo Fator geométrico da seção tende a uma reta bem definida nas cotas mais altas. Partindo-se dessa premissa, calcula-se o fator geométrico da seção para uma cota extrema (desde que o levantamento da seção transversal assim o permita) e projeta-se o valor calculado até o prolongamento da reta definida pela equação $Q = f(A_m\sqrt{R_h})$, obtendo-se o valor estimado da vazão.

O método requer as seguintes condições: escoamento pseudo-uniforme; fator geométrico da seção não variando entre cheia e depleção e um número suficiente de pontos alinhados no gráfico da vazão pelo fator geométrico da seção, refletindo a constância da curva (Fill, 1987; Jaccon e Cudo, 1989; Tucci e Silveira, 1985).

METODOLOGIA DE PSEUDO-EXTRAPOLAÇÃO

A metodologia para avaliação entre métodos de extrapolação superior de curva-chave proposta neste trabalho consiste nas seguintes etapas:

1. traçado e calibragem da curva-chave de forma criteriosa dentro da faixa total de cotas medidas - utilizou-se para tal o roteiro proposto por Jaccon e Cudo (1987) e o programa

Grafchav como apoio, ajustando-se uma equação do tipo $Q = k(h - h_o)^n$ (COPPE/UFRJ e CPRM, s.d.);

2. desconsideram-se as medições superiores da faixa total de cotas medidas, denominada de ***faixa de pseudo-extrapolação,*** e aplicam-se as metodologias de extrapolação nessa faixa, com base apenas nas medições inferiores (***faixa base***) – neste trabalho, utilizou-se como valor de referência na divisão das duas faixas a cota mais próxima à metade da faixa total de cotas medidas;
3. comparam-se as vazões estimadas pelas pseudo-extrapolações com as vazões determinadas pela curva-chave total anteriormente traçada.

Esta metodologia foi aplicada aos dois métodos de extrapolação descritos anteriormente (Logarítmico e Stevens), testados em 28 estações fluviométricas, com seções transversais sem nenhuma singularidade na faixa total de cotas medidas, denominadas de ***Seções Regulares*** (Figura 01). Entende-se aqui como singularidade um alargamento ou estreitamento brusco da seção transversal. Todos os dados necessários à realização desse estudo foram obtidos no banco de dados da ANEEL.

É importante frisar que os métodos foram aplicados em todas as estações, a despeito das condições necessárias a cada método, na expectativa de verificar a importância de se atender a tais condições.

Trabalhou-se com estações fluviométricas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo escolhidas aquelas que apresentavam: pelo menos 20 medições disponíveis; faixa total de cotas medidas acima de 2,0 m ; uma dispersão aceitável das medições e levantamentos disponíveis da seção transversal.

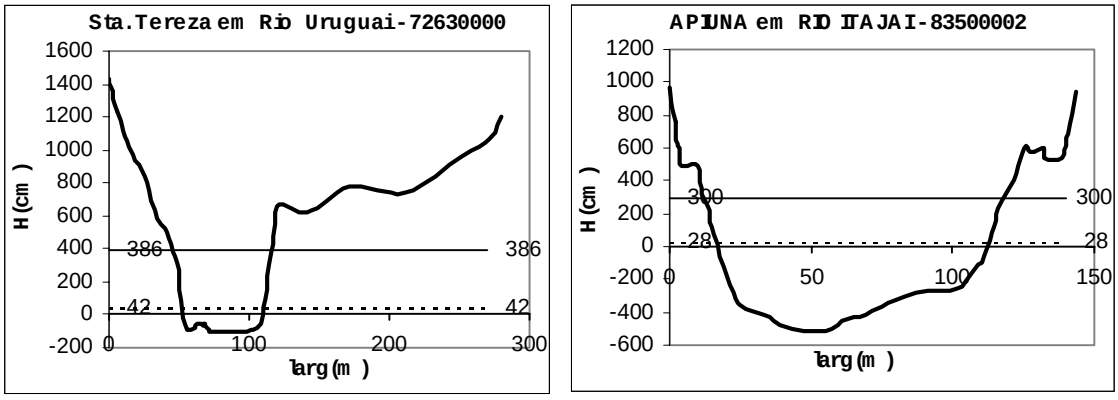


Figura 01: Exemplos de seções transversais regulares dentro da faixa de cotas medidas.

Diante dos diversos levantamentos de seção transversal para cada estação, utilizaram-se os seguintes critérios na escolha de uma seção para aplicação das metodologias: data do levantamento do perfil dentro do período de validade da curva-chave; perfil mais estável, tendo como base a evolução dos traçados no decorrer do tempo.

Na aplicação do método Logaritmo, calibrou-se uma nova curva-chave apenas para as medições da faixa base, utilizando-se dos mesmos critérios e ferramentas de calibração da curva-chave total. Nesse caso ajustou-se necessariamente uma equação do tipo $Q = k(h - h_o)^n$**,** com o auxílio do programa Grafchav. Esta equação, aplicada às cotas da faixa de pseudo-extrapolação, permitiu o cálculo das vazões. Na Figura 02 tem-se um exemplo de como as medições superiores podem desviar (estação 73960000) ou não (estação 73550000), a curva-chave total da pseudo-extrapolação feita a partir da faixa base.

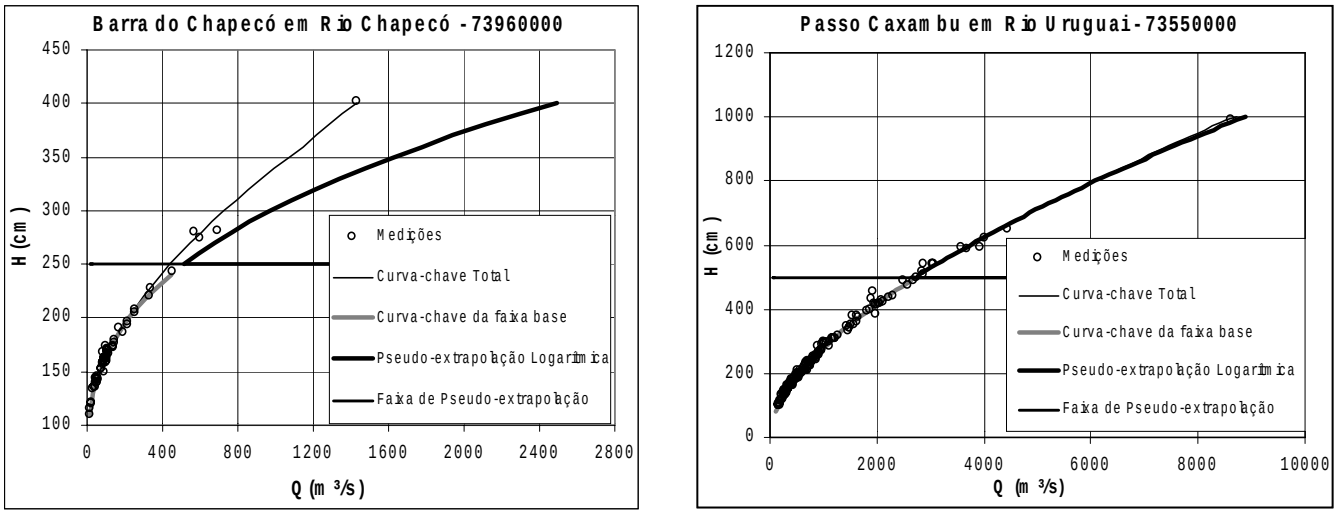


Figura 02 - Exemplos da aplicação do método Logarítmico na extrapolação da curva-chave.

A extrapolação da curva-chave pelo método de Stevens foi realizada com o auxílio da planilha *Excel***.** Gerou-se o gráfico de $A_m\sqrt{R_h}$ *x Q* para a faixa base e ajustou-se uma ***linha de tendência (linear)*** aos pontos extremos do gráfico que definem uma reta, obtendo-se uma função de Q=***f***($A_m\sqrt{R_h}$), fornecida pela própria planilha. A função obtida, aplicada ao produto de $A_m\sqrt{R_h}$, referente à faixa de pseudo-extrapolação, forneceu os valores das vazões. Na Figura 03 nota-se a opção pela divisão do gráfico em dois ou mais trechos quando era evidente a mudança na inclinação da "reta" (estação 71800000); caso contrário ajustou-se uma única reta aos pontos (estação 83300200).

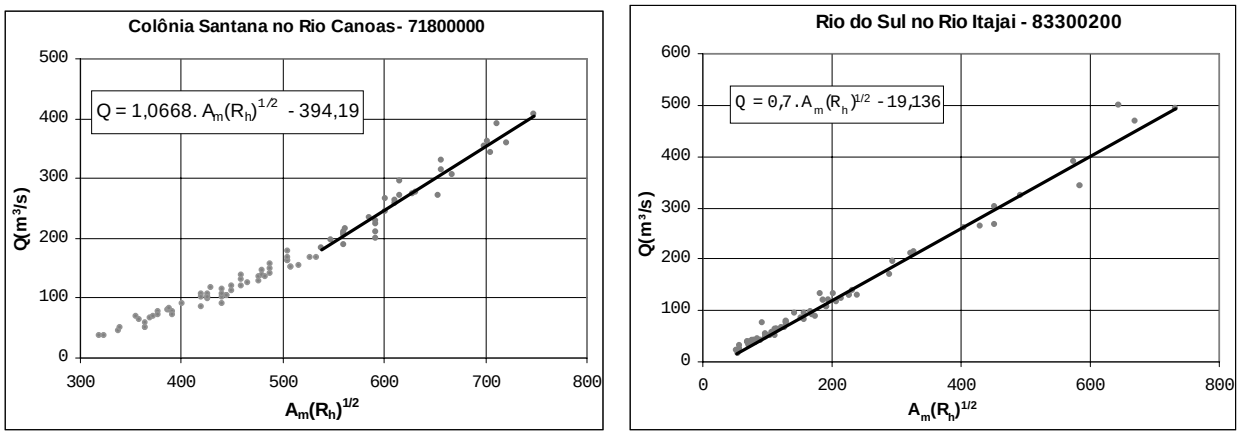


Figura 03 - Exemplos da obtenção da reta de $Q=f(A_m(R_h)^{1/2})$ no método de Stevens.

O passo seguinte à aplicação das metodologias de extrapolação nas diversas estações foi o cálculo das diferenças entre as vazões estimadas pelas duas metodologias e a vazão calculada pela curva-chave total. Para tal, foram utilizadas as vazões calculadas de 10 em 10 cm de cota na faixa de pseudo-extrapolação.

Foram definidos dois tipos de diferenças ou erros, para auxílio na comparação entre as metodologias. Para tornar esses valores proporcionais, permitindo compará-los entre estações completamente diferentes, dividiu-se sempre as diferenças pela máxima vazão obtida da curva-chave total, adimensionalizando os erros.

Erro na Cota Máxima (Ex)

$$Ex = \frac{Qe_m - Qc_m}{Qc_m} \tag{4}$$

Onde: $Qe_{\mathbf{m}}$ – vazão pseudo-extrapolada na cota máxima.

Qc_m – vazão da curva-chave na cota máxima

O cálculo deste erro permite avaliar a existência de sub ou super estimativa de cada metodologia na cota máxima extrapolada, visto ser o valor desta vazão uma referência no processo de extrapolação da curva-chave.

Erro Médio (Em)

$$Em = \frac{\sum \left| \frac{Qe_h - Qc_h}{Qc_m} \right|}{n} \quad (5)$$

Onde: Qe_h – vazão pseudo-extrapolada na cota *h*.

Qc_h – vazão da curva-chave na cota ***h.***

Qc_m – vazão da curva-chave na cota máxima.

Esse erro corresponde à média dos erros na faixa extrapolada, lembrando que os mesmos foram calculados em intervalos de cota de 10 cm.

RESULTADOS

A Tabela 01 mostra os dois tipos de erros calculados pelos métodos Logarítmico e de Stevens em todas as estações. Os valores em negrito referem-se ao menor erro em valor absoluto entre as duas metodologias. As células em cinza claro realçam as estações onde os erros Ex e Em entre as duas metodologias possuem mesma ordem de grandeza. Nesses casos, considerou-se os dois métodos com o mesmo desempenho, dada a subjetividade no traçado da curva-chave total e na faixa base (método Logarítmico) e a subjetividade na escolha do trecho de reta final no gráfico $A_m \sqrt{R_h}$ ***x Q*** (método de Stevens).

Vale lembrar que os casos de erro nulo, no método Logarítmico devem-se à curva-chave na faixa base que se iguala a curva-chave total da estação, na calibração dos autores, ou seja, a ausência das medições na faixa de pseudo-extrapolação não mudou a curva-chave na faixa base.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 01 nota-se que o método de Stevens é uma opção um pouco mais segura que o método Logarítmico para esse tipo de seção. Duas comparações servem de base para essa afirmativa:

- o método Logarítmico apresenta o menor erro na cota máxima (Ex) em 18 (64%) estações, o que sugere uma preferência por essa metodologia para esse tipo de seção, porém em 8 dessas estações os dois métodos apresentam erros de mesma ordem de grandeza o que reduz para 10 (35%) o número de estações onde o método Logarítmico é significativamente melhor contra 6 (21%) do método de Stevens;

- pelo método de Stevens 5 (18%) estações apresentam erro superior a 20% contra 7 (25%) estações no método Logarítmico - casos marcados com (*) na Tabela 01. Uma diferença aparentemente pequena porém considerando a média absoluta do erro na cota máxima desses casos temos 0,3860 para Stevens contra 0,4458 para o Logaritmo, uma diferença de 6%, que aumenta para 10% se excluirmos os valores extremos de 0,7586 na estação 87399000, para Stevens e 0,7977 na estação 73960000, para o método Logarítmico.

Verifica-se também que o método de Stevens, tende a subestimar as vazões enquanto que o método Logarítmico superestima as vazões. O método de Stevens subestima as vazões máximas em 20 (71%) das estações, o que é um número significativo. Mesmo considerando os casos onde a diferença é pequena, por exemplo +/- 5%, onde seria prudente, segundo os autores, não se definir uma sub ou super estimativa da vazão, tem-se 17 (60%) das estações subestimando e 6 (21%) superestimando a vazão máxima. Fazendo-se o mesmo raciocínio para o método Logarítmico tem-se 2 (7%) estações subestimando e 10 (36%) estações superestimando a vazão máxima com erros acima de +/- 5%.

No caso do erro médio (Em), as diferenças entre as duas metodologias diminuem, sendo que em 20 (71%) estações os erros encontram-se na mesma ordem de grandeza contra 12 (42%) do erro na cota máxima. Não há, no entanto, nenhuma inversão das análises anteriores considerando o erro médio.

Outro fato importante, que vem ao encontro das condições e restrições propostas pela bibliografia no caso do método de Stevens, é o fato de que em 6 estações onde o gráfico de $A_m \sqrt{R_h}$ *x Q* define bem uma reta (Figura 04) com um número significativo de pontos, os erros na cota máxima (Ex) e os erros médios (Em) estão entre os menores. Seus valores máximos são 0,0697 e 0,038 respectivamente, na estação Saudades (73900000).

As extrapolações obtidas pelos métodos de Stevens e Logarítmico, para as estações de Passo Migliavaca no rio Carreiro (86480000) e Passo Santa Tereza no rio Uruguai (72630000), são mostradas, a título de exemplo, nas Figuras 05 e 06 na seqüência.

Tabela 01: Valores dos Ex (Erro na Cota Máxima) e Em (Erro Médio) para as metodologias de extrapolação da curva-chave nas estações estudadas.

ESTAÇÃO	Ex		Em	
	Stevens	**Log**	**Stevens**	**Log**
70700000 – Passo Socorro	-0.1298	**0.0000**	0.0684	**0.0000**
71550000 – Passo Caru	-0.3617 **(*)**	**-0.0490**	0.1544	**0.0102**
71800000 – Colônia Santama	-0.0524	**0.0000**	0.0252	**0.0000**
72630000 – Passo Santa Tereza	**0.0755**	0.0828	**0.0347**	0.0355
72680000 – Passo Colombelli	-0.1490	**0.0000**	0.0754	**0.0000**
72849000 – Joaçaba	**-0.3359 (*)**	0.3815 **(*)**	**0.1154**	0.1906
73010000 – Marcelino Ramos	-0.1574	**0.0000**	0.0537	**0.0000**
73200000 – Ita	**0.1466**	0.4560 **(*)**	**0.0505**	0.1615
73330000 – Passo Alto Irai	**-0.0304**	0.2784 **(*)**	**0.0138**	0.1111
73550000 – Passo Caxambu	-0.1791	**0.0169**	0.0736	**0.0047**
73765000 – Passo do Quilombo	**-0.0335**	0.1589	**0.0187**	0.0568
73770000 – Porto Fae Novo	**-0.0215**	0.0320	**0.0090**	0.0144
73820000 – Passo Pio X	-0.2603 **(*)**	**0.0124**	0.1267	**0.0090**
73850000 – Passo Novo Erechim	-0.1436	**0.0463**	0.0843	**0.0123**
73900000 – Saudades	**0.0697**	0.3872 **(*)**	**0.0387**	0.1481
73960000 – Barra do Chapecó (aux)	**-0.0654**	0.7977 **(*)**	**0.0271**	0.3289 **(*)**
75295000 – Colônia Mousquer	**-0.2135 (*)**	-0.2298 **(*)**	**0.0827**	0.0914
82350000 – Jaraguá do Sul	**0.0328**	0.5902 **(*)**	**0.0441**	0.2755 **(*)**
83050000 – Taio	0.0777	**0.0000**	0.0391	**0.0000**
83300200 – Rio do Sul	0.1410	**0.1279**	**0.0470**	0.0673
83500002 – Apiuna	-0.1989	**0.0896**	0.0973	**0.0504**
83680000 – Timbó	-0.0931	**0.0000**	0.0312	**0.0000**
83690000 – Indaial	-0.1888	**-0.0185**	0.0587	**0.0036**
86480000 – Passo Migliavaca	0.0032	**0.0000**	0.0104	**0.0000**
86580000 – Santa Lúcia	-0.0977	**0.0000**	0.0494	**0.0000**
86720000 – Encantado	-0.0509	**0.0000**	0.0204	**0.0000**
87160000 – Nova Palmira	0.0190	**0.0401**	**0.0302**	0.0419
87399000 – Passo das Canoas (aux)	-0.7586 **(*)**	**-0.1659**	0.2457 **(*)**	**0.0574**
% de estações onde o método apresenta o **Menor** erro	36%	64%	43%	57%
% de estações onde o método **SubEstima** o valor da Q_{max}	71%	14%		
% de estações onde o erro é **Maior** que (+/-) 20% - **(*)**	18%	25%	4%	7%

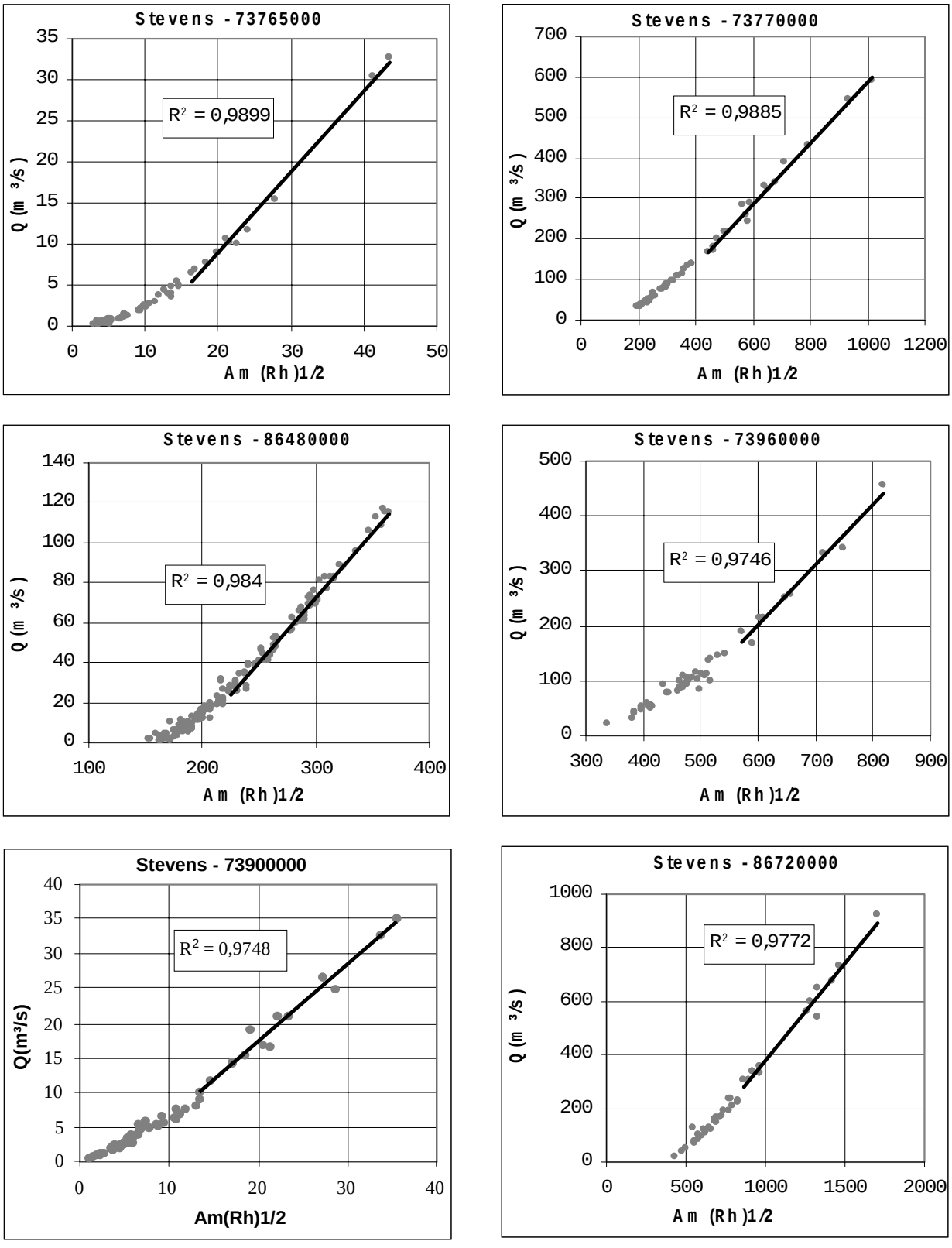


Figura 04 – Estações com melhores ajustes no gráfico $A_m \sqrt{R_h}\ x\ Q$,.

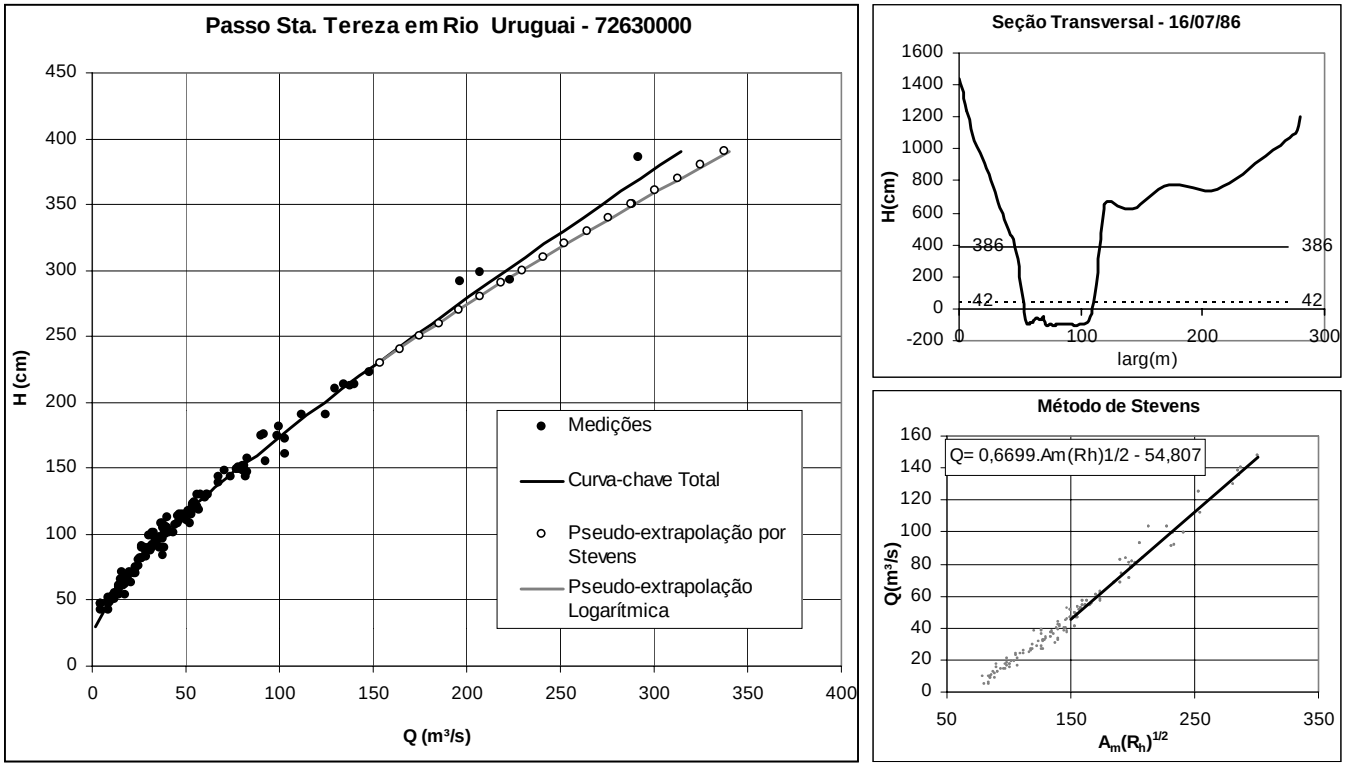


Figura 05 - Exemplo das extrapolações por Stevens e Logarítmica na estação Passo Sta Tereza.

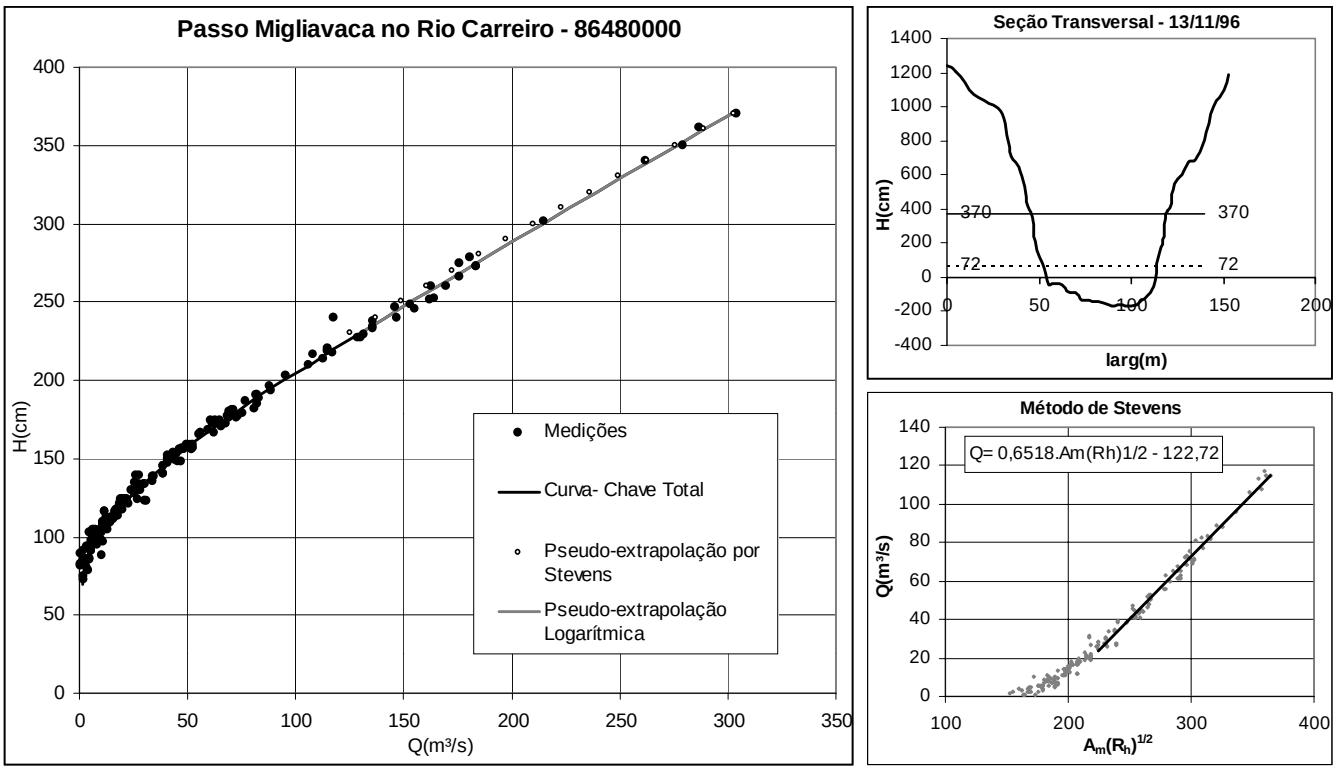


Figura 06 - Exemplo das extrapolações por Stevens e Logarítmica na estação Passo Migliavaca.

CONCLUSÕES

A metodologia de pseudo-extrapolação foi desenvolvida neste trabalho, com o objetivo de fazer uma análise comparativa entre os métodos de Stevens e Logarítmico para extrapolação superior de curvas-chave. Esta metodologia compara os resultados de uma curva-chave determinada utilizando todo conjunto de dados de uma seção com outra curva ajustada a dados abaixo de uma cota de referência (faixa-base) e extrapolada para a faixa de dados ignorada no ajuste (faixa de pseudo-extrapolação).

A metodologia foi aplicada a um conjunto de 28 estações fluviométricas, com perfis de seção transversal regulares. Os resultados obtidos neste trabalho permitem afirmar que, para as estações avaliadas, o método de Stevens apresentou erros menores que o método Logarítmico, tanto no que se refere a erro na cota máxima, quanto para o erro médio. Observou-se, também, que o método de Stevens tende a subestimar as vazões máximas, enquanto que o método Logarítmico apresenta alguma tendência de superestimá-las.

A metodologia de pseudo-extrapolação mostrou ser uma ferramenta útil para o estudo e a comparação de diferentes métodos de extrapolação da curva-chave, devendo, portanto, ser utilizada para análise de outros métodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEVALLIER, P. Aquisição e Processamento de Dados. In: Tucci, C. E. M. et al. *Hidrologia, ciência e aplicação.* Porto Alegre: ABRH. P 485-525. 1997.

COPPE/UFRJ e CPRM. *Sistema Grafchav para definição de curvas cota x vazão de uma estação fluviométrica, Manual do Usuário*. Rio de Janeiro: Laboratório de Hidrologia COPPE, UFRJ, s.d.

FILL, H. D. Informações Hidrológicas. In: Barth, F. T. et al. *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos.* São Paulo: ABRH. Vol. 1. p. 94-210. 1987.

JACCON, G. e CUDO, K. J. Calibragem de postos fluviométricos: roteiro cuidados e recomendações. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. São Paulo: ABRH. Vol.2 p. 279-287. 1987.

JACCON, G. e CUDO, K. J. *Curva-chave, análise e traçado*. Brasília: MME-DNAEE. 1989.

TUCCI, C. E. e SILVEIRA, R. L. *Análise de consistência de dados fluviométricos*. Porto Alegre: IPH,UFRGS, 1985.