

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DE CURVA-CHAVE: ESTUDO DE CASO NO RIO TUBARÃO-SC

*Juliana Andrade Campos*¹, Fernanda Eimael Rolim¹, Franciele Zanandrea¹, Fernando Dornelles¹ & Joel Avruch Goldenfum¹*

Resumo – A curva-chave é a técnica mais frequente empregada na conversão de dados de cota em vazão no Brasil. A extrapolação superior da curva-chave é uma necessidade nas estações fluviométricas, uma vez que a faixa de medições de vazões normalmente é inferior as vazões de cheias. O presente estudo tem como objetivo analisar diferentes metodologias de extrapolação superior da curva-chave na estação fluviométrica Rio do Pouso, em Tubarão-SC. Os métodos de extrapolação avaliados foram: Stevens, Manning e Logarítmica e os resultados foram comparados com as vazões disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de águas (ANA). O método de Stevens foi o que apresentou menores desvios em relação às vazões da ANA, enquanto que o método Logarítmico e Manning subestimaram as vazões máximas, apresentando aumento de erro relativo nas cotas extremas.

Palavras-Chave – curva-chave, extrapolação, vazões extremas.

EVALUATION OF UPPER EXTRAPOLATION METHODOLOGIES OF THE RATING-CURVE: CASE STUDY IN TUBARÃO-SC RIVER

Abstract - The rating-curve is the tool most frequently used to convert water depth data into flow in Brazil. The upper extrapolation of the discharge curve is necessary in fluviometric stations, since the range of flow measurements is usually lower than flood flows. The present study aims to analyze different methodologies of upper extrapolation of the rating-curve in the flow station Rio do Pouso in Tubarão-SC. The extrapolation methods evaluated were: Stevens, Manning and Logarithmic, and the results of the extrapolation were compared with the flows provided by the National Water Agency (ANA). The Stevens method presented greater similarity with the ANA flows, whereas the Logarithmic and Manning method underestimated the maximum flows, presenting increase of relative error in the extreme dimensions.

Keywords – rating-curve, extrapolation, extreme flows.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são considerados um bem público dotado de valor econômico (Lei Federal do Brasil Nº 9.433/1997) que têm uma significativa importância para o Brasil, e devido a isso a sua quantificação é de grande interesse na geração de energia elétrica, irrigação e abastecimento. Interesse este que é estendido a outras áreas como controle de cheias, gerenciamento de secas, bem como na preservação ambiental. Assim, dados de vazão são fundamentais para elaboração de projetos e pesquisa nas áreas de interesse dos recursos hídricos, que se valem de modelagem no seu gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos (Collischonn, 2001). A modelagem também tem grande aplicação no saneamento básico, assim como para a elaboração de sistemas de monitoramento, prevenção e alerta de inundações, diminuindo os danos econômicos aos municípios atingidos (Alcoforado e Cirilo, 2001).

As series de vazões são a base de entrada das simulações hidrológicas. A importância do conhecimento de dados confiáveis são a base para a calibração dos modelos, necessários a previsão de vazões e na estimativa de ocorrência de eventos de inundação. Dados fidedignos de vazões também

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH/UFRGS; e-mail: *juliana_esa@outlook.com; fernanda.erolim@gmail.com; franciele.zanan@gmail.com; fds_eng@yahoo.com.br; joel@iph.ufrgs.br

são necessários nas análises de frequências para a determinação de vazões associadas a tempos de retorno, utilizadas na concepção de projetos de engenharia hidráulica. Em suma, dados de vazões confiáveis são de extrema importância ao correto gerenciamento dos recursos hídricos.

A utilização de métodos diretos para determinar a vazão numa seção fluvial é uma tarefa demorada e, frequentemente, envolve elevados custos, pois os equipamentos exigem equipe técnica especializada na operação, assim como manutenção frequente. Tudo isso inviabiliza a obtenção de uma série contínua de medição de descarga por métodos diretos. Por essas razões, a estimativa das vazões é realizada de forma indireta mediante o uso da curva-chave (Brusa e Clark, 1999). A construção da curva-chave é realizada com visitas à seção de monitoramento, com o objetivo de medir os níveis de água com o auxílio de uma régua linimétrica juntamente com a respectiva vazão e, na sequência, relacioná-las por meio de uma equação (Almeida e Anache, 2013).

Normalmente, as medições de vazões se distribuem no trecho central da curva-chave, ou seja, entre os valores mínimos e máximos de níveis observados. Por isso, existem problemas na reprodução de trechos superiores e inferiores da curva-chave (Brusa e Clark, 1999). A maior dificuldade na construção dos trechos menores da curva-chave advém de mudanças da geometria do leito decorrente das frequentes deposições de sedimentos e/ou erosão (Adami *et al.*, 2013). Já em relação a reprodução dos trechos superiores, o maior impasse se encontra devido à ausência de medições de vazões máximas, visto que se torna perigoso para a equipe de hidrometria realizar medições nestas situações onde a velocidade de escoamento é alta (Grison e Kobiyama, 2009). Por essas razões, é necessário a utilização de métodos de extrapolação de curva-chave para cotas maiores as vazões máximas observadas, para que se obtenha uma série contínua de dados de vazão. A partir dessa necessidade diversos métodos de extrapolação de curva-chave foram criados, dentre eles: Stevens, Manning, Logarítmico e Velocidade-Área (Sefione, 2002).

Com isso, este estudo tem como objetivo analisar diferentes metodologias de extrapolação da curva-chave para vazões superiores a máxima observada para que o usuário de dados de vazão tenha conhecimento do efeito do tipo de extrapolação na diversas aplicações de interesse. As metodologias de extrapolação utilizadas neste trabalho foram: Stevens, Manning e Logarítmica. Os resultados da extrapolação foram comparados com os resultados obtidos pela Agência Nacional de águas (ANA) por meio das vazões disponibilizadas para a estação fluviométrica selecionada para este estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O presente estudo foi realizado com dados da estação fluviométrica Rio do Pouso, código ANA 84580000, localizada no Rio de mesmo nome no município de Tubarão, estado de Santa Catarina, latitude $-28,42^\circ$ e longitude $-49,11^\circ$, conforme Figura 1. A estação situa-se na bacia hidrográfica do Rio Tubarão, que é composta por 4 sub-bacias: Bacia do Rio Capivari, bacia Braço do Norte, bacia Formadores do Rio Tubarão e bacia do Baixo Tubarão.

O município de Tubarão possui 97.235 habitantes (IBGE, 2010) e apresenta histórico de inundações severas no Rio Tubarão decorrente de sua localização em uma zona de baixa declividade, que recebe as vazões dos afluentes de suas cabeceiras em regiões elevadas com leitos de alta declividade. Esses fatores contribuem para uma resposta rápida aos eventos de chuva. Ainda, a urbanização do município se deu dentro da planície de inundações do Rio, o que ocasiona os desastres por fenômenos naturais.

Atualmente existem duas estações fluviométricas com série histórica de dados de vazão no município de Tubarão. A estação do Rio do Pouso foi escolhida para este estudo devido a sua maior disponibilidade temporal de dados, localização onde não se observa influência de jusante, e também

pela sua proximidade com a região urbana do município, representado adequadamente a vazão no trecho com urbanização nas margens. Essa estação contempla a contribuição das duas principais bacias que contribuem para a vazão do Rio Tubarão: bacia do Rio Braço do Norte e bacia dos formadores do Rio Tubarão.

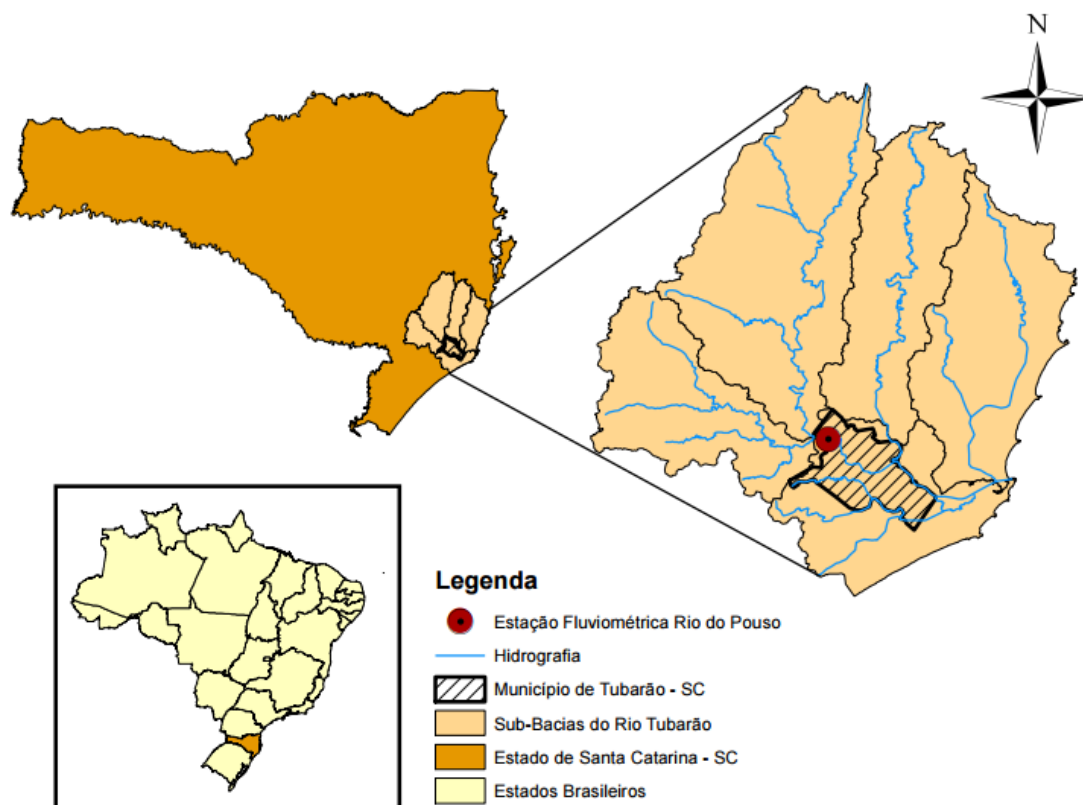


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Dados da Estação Rio do Pouso

Os dados da estação Rio do Pouso foram obtidos junto ao banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), que se constitui na base de dados hidrológicos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Os dados disponíveis desta estação abrangem o período de 1940 a 2006, totalizando 66 anos. Para este estudo foi adotado como referência o período de 1977 a 1996, pois nestes anos verificou-se o alinhamento de uma única curva-chave. A Figura 2 apresenta os dados de vazões calculadas pela ANA com suas respectivas cotas, em que pode-se observar o traçado da única curva-chave no período de análise.

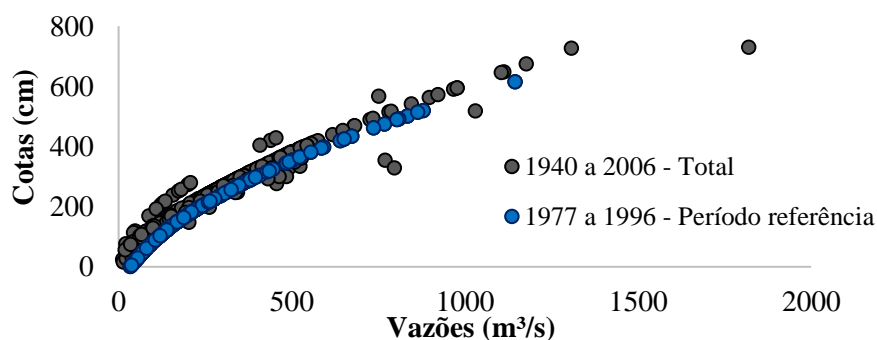


Figura 2 – Vazões e cotas na estação Rio do Pouso, Tubarão-SC.

Os perfis transversais da seção da estação Rio do Pouso foram levantados para diferentes anos, sendo que no período de referência deste estudo, foram encontradas informações sobre 5 levantamentos de seções transversais referentes aos anos de 1976, 1981, 1982, 1996 e 1996 (Figura 3). Ao longo do período de referência, foi observada uma mudança significativa na seção transversal apenas no levantamento feito em 1996, em coerência com o alinhamento da curva-chave da ANA (Figura 2).

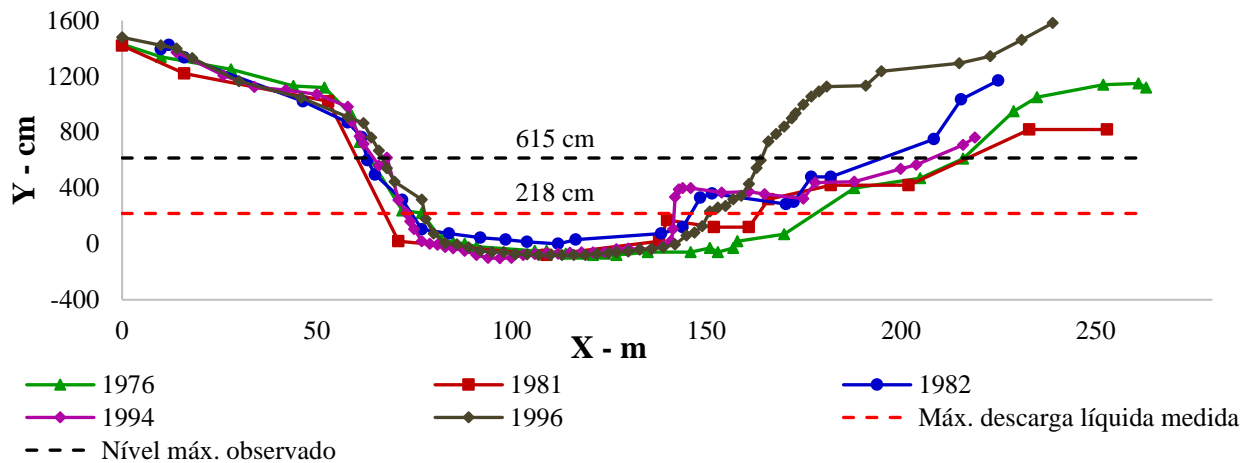


Figura 3 – Perfis transversais na estação Rio do Pouso, Tubarão-SC

Ajuste da curva-chave

Inicialmente, fez-se o ajuste da curva-chave conforme metodologia proposta por Jaccon & Cudo (1989), utilizando os dados de cotas e descarga líquida medidos no período de referência deste estudo (1977 a 1996). Empregou-se a expressão matemática da relação cota-descarga na forma exponencial:

$$Q = a(H - H_0)^n \quad (1)$$

sendo a , n : coeficientes de ajuste da curva-chave; H : cota referente a uma vazão Q ; H_0 : cota referente à vazão nula.

Os parâmetros a , n e H_0 foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, sendo eles $a=0,03121$; $n=1,58895$ e $H_0=-80$ cm.

Extrapolção da curva-chave

Em seguida, aplicou-se as metodologias de extrapolção superior na curva-chave ajustada. Utilizou-se três diferentes métodos de extrapolção: método de Stevens, método de Manning e método Logarítmico. Como dois destes métodos necessitam de informações geométricas da seção transversal estudada, foram calculados o perímetro molhado e a área molhada com base nos perfis transversais apresentados na Figura 3.

A seguir estão descritos os métodos de extrapolção de curva-chave utilizados para calcular as vazões nas cotas acima das medições de descarga.

Método Logarítmico: este método considera que o trecho superior da curva-chave obedece a mesma equação em forma de potência, mantendo, na faixa de valores extrapolados, os mesmos coeficientes a e n ajustados para aquele trecho. Assim, utilizando a Equação 1, calculou-se as vazões referentes as cotas na faixa de extrapolção.

Método de Manning: considera que a relação entre a raiz da declividade da linha d'água pelo coeficiente de rugosidade Manning tende a ser constante para vazões elevadas (Tucci e Silveira, 1985). Equação do método de Manning:

$$Km = \frac{\sqrt{J}}{n} = \frac{Q}{AmRh^{2/3}} \quad (2)$$

em que Km : coeficiente de extrapolação por Manning; J : Declividade da linha d'água (m/m); n : Coeficiente de rugosidade de Manning; Am : Área molhada da seção transversal (m²); Rh : Raio Hidráulico da seção transversal (m); Q : Vazão (m³/s).

Para este método, primeiramente calculou-se o Km para a faixa de dados da curva-chave ajustada, em seguida, verificou-se a existência de tendência assintótica da curva de relação entre Km e Cotas. Sendo confirmada esta relação, prolongou-se a equação para os valores das cotas de extrapolação. Com o Km estimado e Am e Rh calculados para os valores de cota da faixa de extrapolação, calculou-se a vazão por meio da equação 2.

Método de Stevens: Baseia-se na fórmula de Chézy, considerando que existe uma relação linear entre os fatores geométricos da seção e a vazão. Equação do método de Stevens:

$$\frac{Q}{Am\sqrt{Rh}} = C\sqrt{J} \quad (3)$$

em que Am : Área molhada da seção transversal (m²); Rh : Raio Hidráulico da seção transversal (m); Q : Vazão (m³/s); J : Declividade da linha d'água (m/m); C : Coeficiente de Chézy.

Inicialmente verificou-se a existência de uma relação linear entre $AmRh^{1/2} \times Q$ para os dados da curva-chave, e em seguida, verificou-se a existência de uma equação linear nos pontos extremos da curva. Esta equação foi usada para calcular as vazões referentes às cotas extrapoladas.

A equação da curva-chave ajustada para os valores de cota e vazão medidos, foi utilizada para o cálculo das vazões até a cota 218 cm (cota da maior vazão medida no período de referência). A partir desta cota, as vazões foram calculadas para cada uma das metodologias de extrapolação apresentada.

Por fim, realizou-se o cálculo do erro relativo para fins de comparação das vazões geradas com as curvas de extrapolação disponibilizadas pela agência nacional de águas – ANA. O erro relativo foi calculado por meio da Equação 4:

$$Er = 100 \times Abs \left(\frac{Q1 - Q2}{Q1} \right) \quad (4)$$

onde: Er : Erro relativo médio (%); Abs : Valor absoluto; $Q1$: Vazão da série histórica da ANA-Hidroweb; $Q2$: Vazão calculada pelas extrapolações;

A determinação do erro relativo visa avaliar a diferença percentual obtida entre os métodos de extrapolação e as vazões da ANA. Quanto menor for o percentual dos erros relativos, mais próximos das vazões da ANA são os resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado do ajuste da curva-chave feito com a relação entre as descargas medidas na estação e os níveis observados é ilustrado na Figura 4. O coeficiente de determinação (R^2) entre as vazões medidas e ajustadas foi de $R^2 = 0,97$, mostrando a alta correlação existente.

As diferentes extrapolações da curva-chave avaliadas neste estudo apresentaram valores de vazão calculados muito próximos aos valores apresentados pela ANA nas cotas abaixo de 400 cm. Este comportamento pode ser observado na Figura 5.

Para as cotas acima de 400 cm, o método de extrapolação Logarítmica e Manning apresentaram valores de vazão inferiores às vazões da ANA, enquanto que a extrapolação da curva-chave construída pelo método de Stevens permanece muito semelhante à da ANA ao longo de todo o período

analisado, em todas as faixas de cotas consideradas. O que demonstra que, provavelmente, o método de extrapolação adotado pela ANA nessa seção foi o método de Stevens.

O comportamento das extrapolações das curvas-chave do presente estudo se assemelham aos resultados obtidos por Sefione (2002), em que o autor avaliou alguns métodos de extrapolação em diversas estações fluviométricas comparando com dados medidos. Em geral, ele afirma que o método de Stevens é o mais aplicável, com resultados mais satisfatórios, sempre se configurando entre as melhores opções para aplicação, o que justificaria a escolha da ANA. Observa-se que os métodos de Manning e Logaritmo apresentam vazões subestimadas quando comparadas ao método de Stevens, o mesmo foi observado por Sefione (2002). O autor também conclui que o método de Manning foi o que apresentou os menores valores de vazão dentro dos métodos avaliados, como também observado neste trabalho.

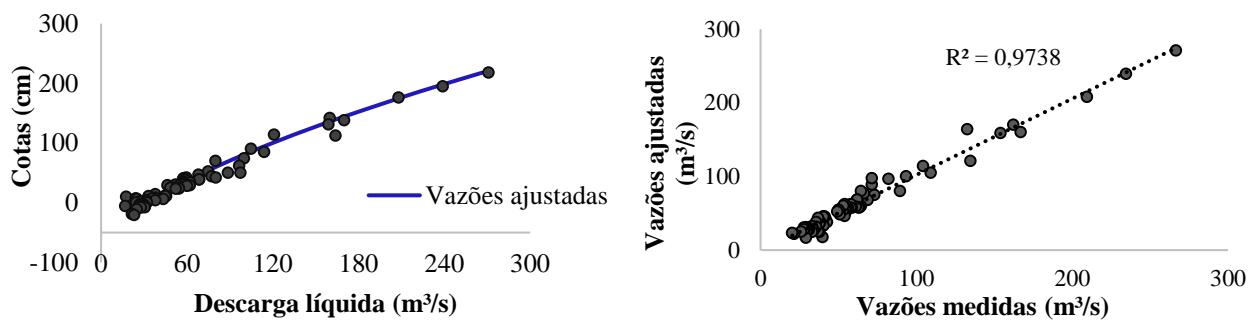


Figura 4 – Ajuste da curva-chave (faixa de dados medidos) e coeficiente de determinação R^2 .

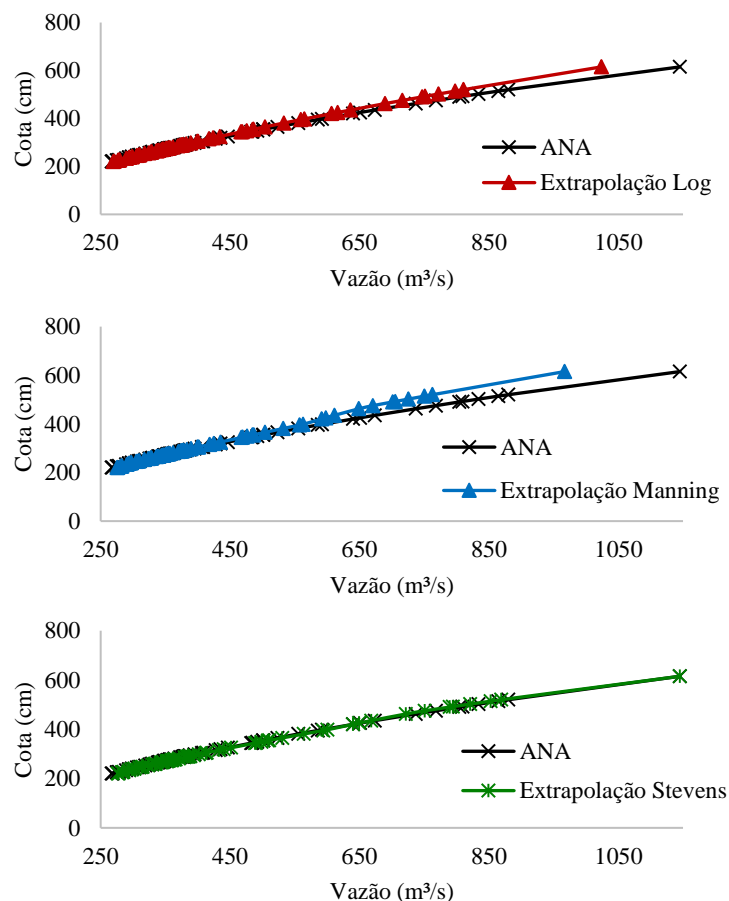


Figura 5 – Comparação entre as curvas-chave extrapoladas pelos diferentes métodos e as vazões da ANA.

Analisando o resultado do erro relativo das vazões extrapoladas em relação as vazões da ANA, nota-se que a metodologia de Stevens apresentou os menores valores de erro relativo, sendo a maior diferença observada, de 3,35%, na menor cota extrapolada. A metodologia de extrapolação Logarítmica apresentou erro relativo de 10,60% e a maior diferença encontrada foi no método de Manning com 15,56%, ambos na cota máxima observada na série (Figura 6).

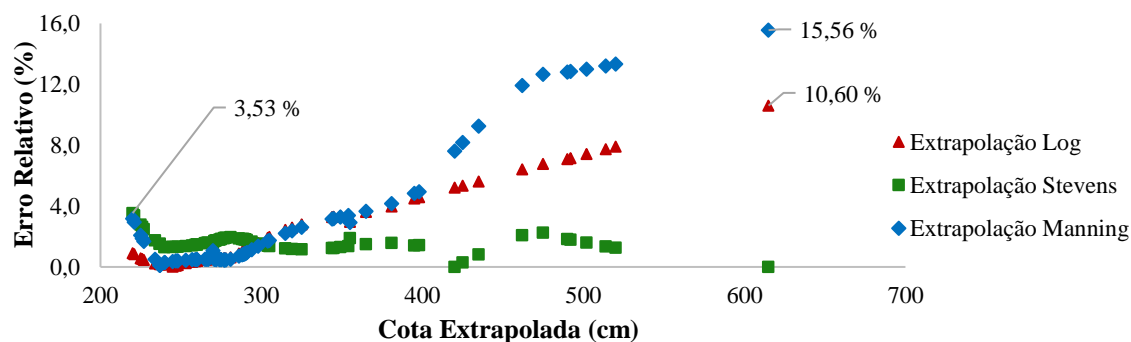


Figura 6 – Variação percentual dos Erros Relativos.

Observa-se que para a metodologia de extrapolação Logarítmica e de Manning, as diferenças relativas entre as vazões extrapoladas e as vazões da ANA vão aumentando proporcionalmente nas cotas mais altas, enquanto que na metodologia de Stevens, os erros oscilam em média, entre 1 e 2%, em que o maior ocorre na cota mais baixa.

Os resultados observados corroboram com a hipótese de que a metodologia utilizada pela ANA foi a de Stevens para a extrapolação das medições na estação Rio do Pouso, devido a grande semelhança observada no período de referência. A extrapolação log apresentou resultados levemente inferiores às vazões da ANA, a principal desvantagem observada neste método é que a medida em que se aumentam as cotas (vazões extremas), os erros relativos vão ficando maiores. Apesar disso, os resultados apresentados foram além das expectativas, uma vez que este método não considera fatores geométricos, de rugosidade ou declividade da linha d'água. Já o método de Manning subestimou as vazões em relação a ANA, também aumentando o erro relativo nas vazões extremas.

Os métodos que mais se aproximaram foram os métodos Logarítmico e de Stevens, mesmo havendo diferença na abordagem desses dois métodos, pois o método de Manning e o de Stevens consideram características físicas da seção, diferente do método Logarítmico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como propósito comparar os resultados de extrapolação superior de curvas-chave, feitas por três métodos diferentes, com intuito de avaliar, fornecer e consistir os dados de vazões acima da faixa de medições de descarga em campo. Essa avaliação foi realizada visto a importância da obtenção de dados de vazões de cheia fidedignos que sirvam de dados de entrada em diversas simulações hidrológicas.

O método Logarítmico apresentou vazões extremas subestimadas, quando comparadas com as vazões calculadas pela ANA. Também foi observado que este método aumenta o erro relativo em relação aos resultados da ANA à medida em que as cotas aumentam. O método de Manning também subestimou os valores em relação as vazões da ANA. Neste método, o erro relativo foi ainda maior que o método Logarítmico para as cotas elevadas. O método de Stevens apresentou uma extrapolação da curva-chave muito semelhante à obtida pela ANA, levando a acreditar que mesma possa ter utilizado esta metodologia de extrapolação na estação Rio do Pouso, no período avaliado.

Comparando os três métodos, observa-se que o método de Stevens fornece as maiores vazões para as mesmas cotas quando comparados aos métodos Logarítmico e de Manning. O método de Manning foi o que apresentou resultados mais distantes do método de Stevens, no entanto esses dois métodos consideram características físicas da seção. Os métodos que mais se aproximaram foram os métodos Logarítmico e de Manning, mesmo havendo diferença na abordagem dos dois métodos, pois o método Logarítmico apresenta apenas uma abordagem matemática.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo integra do Projeto “Plano Municipal de Macrodrenagem do Município de Tubarão-SC”, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com suporte financeiro do Município de Tubarão-SC. Os autores agradecem ao Cnpq e Capes pelas bolsas de Mestrado/Doutorado e de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M. V. D., *et al.* (2013). Curva chave–estudo de caso da bacia hidrográfica do Spultura, Caxias do Sul–RS. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves-RS, Nov,2013, pp 1-6.

ALCOFORADO, R. G.; CIRILO, J. A. (2001). Sistema de suporte à decisão para análise, previsão e controle de inundações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4, pp. 133-153.

ALMEIDA, I. K.; ANACHE, J. A. A. (2013). Estimativas de vazões e traçado de curvas-chave. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves-RS, Nov,2013, pp 1-7.

ANA. Agência Nacional de Águas. HidroWeb – *Sistemas de Informações Hidrológicas*. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 15/03/2017.

BRASIL. Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos hídricos. Diário Oficial Da União. 1997.

BRUSA, L. C.; CLARKE, R. T. (1999). Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: Bacia do Rio Ibicuí, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídrico*. 4 (3) pp. 91-95.

COLLISCHONN, W. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 6, n. 1, Jan/mar 2001, p. 95-118.

GRISON, F., KOBİYAMA, M. (2009). Erros e certezas na estimativa de vazões e o traçado de curvas-chave. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande-MS, Nov, 2009 pp.1-12.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010). *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro, RJ: IBGE. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em 02 jun. 2016.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.

SEFIONE, A. L. (2002). Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (IPH/UFRGS).