



Extrapolação superior da curva-chave para uma microbacia hidrográfica localizada no município de Caxias do Sul - RS

Fernando Bonotto Missiaggia¹, Marcio Vicente Duarte Adami², Taison Anderson Bortolin³, Rossano Belladonna⁴, Tiago De Vargas⁵

¹Universidade de Caxias do Sul (fbmissiaggia1@ucs.br); ²SAMAE (mvadami@samaecaxias.com.br);

³Universidade de Caxias do Sul (tabortol@ucs.br); ⁴SAMAE (rbelladonna@samaecaxias.com.br);

⁵SAMAE (tvargas@samaecaxias.com.br)

Resumo

Este artigo apresenta a determinação da curva-chave para uma microbacia hidrográfica localizada no município de Caxias do Sul – RS. A microbacia possui área de 3,53 km² e a estação fluviométrica (exutório) localizada nas coordenadas 29°7'15,867"S e 51°8'43,171"O. Os métodos hidrométricos utilizados para quantificar a vazão foram o da meia-seção, com o uso do molinete, e o método do flutuador, cujo cálculo foi adaptado a partir da metodologia da distribuição da velocidade da água em canais livres em uma seção transversal. O monitoramento abrangeu o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2017, totalizando 41 campanhas de vazão, acompanhadas de coleta de dados em régua linimétrica. Para a extrapolção da curva-chave foi empregado o método logarítmico, enquanto que, para o ajuste dos parâmetros da equação, foi utilizado o método de mínimos desvios quadrados. A Eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) da curva extrapolada teve um valor acima de 0,98, apresentando um elevado grau de eficiência entre os dados de vazão observada pela vazão calculada. Portanto a curva-chave é uma ferramenta hidrológica utilizada na obtenção de série de vazões em canais livres e sua extrapolção possibilitará a obtenção de valores extremos de vazão, a partir de níveis linimétricos não contemplados durante as campanhas de medição.

Palavras-chave: Curva-chave. Meia-seção. Extrapolção.

Área Temática: Recursos Hídricos.

Upper extrapolation of the rating curve for a hydrographic microbasin located in the city of Caxias do Sul – RS

Abstract

This paper presents the determination of the rating curve for a hydrographic microbasin located in the city of Caxias do Sul - RS. The microbasin has an area of 3.53 km² and the fluviometric station (exuter) located at coordinates 29°7'15.867"S and 51°8'43.171"W. The hydrometric methods used to quantify flow were the half-section, using the windlass, and the float method, whose calculation was adapted from the methodology of water velocity distribution in free channels in a cross section. The monitoring covered the period from January 2014 to December 2017, totaling 41 flow campaigns, accompanied by data collection in linimetric rule. For the extrapolation of the rating curve, the logarithmic method was employed, while for the adjustment of the parameters of the equation, the least squares method was used. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of the extrapolated curve had a value above 0.98, presenting a high degree of efficiency between the flow data observed by the calculated flow. Therefore, the rating curve is a hydrological tool used to obtain series of flows in free channels and their extrapolation will allow the obtaining of extreme flow values, from linymetric levels not contemplated during the measurement campaigns.

Keywords: Rating Curve. Half-section. Extrapolation.

Thematic Area: Water Resources.



1 Introdução

O ciclo hidrológico é um processo que ocorre de forma dinâmica e contínua, influenciado por processos bastante aleatórios, como no caso da precipitação e vazão. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). O monitoramento hidrológico em bacias hidrográficas auxilia no diagnóstico da bacia, contribuindo para o entendimento das modificações do uso e ocupação do solo, sendo de relevante importância para o planejamento urbano municipal (GARCIA; PAIVA, 2006). Segundo Porto, Filho e Silva (2001), o conhecimento das vazões em uma bacia hidrográfica é fundamental e preponderante, visando a gestão dos recursos hídricos a médio e longo prazo, através do conhecimento da disponibilidade e demanda hídrica ao longo do tempo.

Na engenharia, as medições de vazão são de extrema importância para projetos e estudos de dimensionamento de barragens, sistemas de abastecimento de água, projeto de usinas hidrelétricas, estruturas de drenagem urbana, irrigação, navegação, capacidade do recurso hídrico em receber efluente de tratamento e entre outras. Para cada aplicação, que necessite dos dados históricos de vazão, há diferentes requerimentos quanto à qualidade de dados, forma de apresentação e custos envolvidos (MAIDMENT, 1992).

A vazão ou descarga de um rio é o volume de água que passa através de uma seção transversal na unidade de tempo, sendo que para a hidrometria, essa vazão está diretamente relacionada com a cota linimétrica. Algumas das técnicas mais utilizadas para medição da vazão são: medição e integração da distribuição de velocidades; método acústico; método volumétrico; método químico; uso de dispositivos de geometria regular (vertedouros) e medição com flutuadores. O método mais utilizado no Brasil é a medição e integração da distribuição de velocidade na seção com o uso do molinete hidrométrico (SANTOS et al., 2001).

A aplicação das técnicas de hidrometria para a medição de vazão devem contemplar uma série representativa de dados, resultado de diversas campanhas realizadas ao longo dos anos, que contemplem períodos pluviométricos caracterizados como chuvosos e de estiagem. O conhecimento da relação da cota com a vazão (traçado da curva-chave) permite substituir medições contínuas de descargas por medições contínuas de cotas, a partir dos dados obtidos em réguas linimétricas ou pelo uso de linígrafos automáticos (TUCCI, 2002). Numa série de vazões, níveis linimétricos mais elevados são essenciais para um bom ajuste da curva-chave por permitir a obtenção de valores extremos de vazão, porém, em virtude da característica de uma dada seção de monitoramento, essas cotas podem não ser medidas, devido à impossibilidade técnica e riscos a integridade da equipe. Em função desta limitação, torna-se necessário o uso de métodos de extrapolação superior da curva-chave para cotas maiores daquelas já medidas na seção de monitoramento.

Neste contexto, este artigo tem como principal objetivo a determinação e a extrapolação da curva-chave para uma microbacia hidrográfica localizada no município de Caxias do Sul-RS. Os métodos utilizados para a quantificação da vazão foram da meia-seção e do flutuador. Posteriormente, a série medida foi submetida ao método logarítmico para extrapolação superior da curva-chave, a fim de atender cotas linimétricas superiores e não medidas ao longo da série de campanhas de vazão. Deste modo, torna-se possível o ajuste da curva-chave para eventos de precipitações intensas, quando reiteradamente, em função de limitações técnicas, não se dispõe de uma equação ideal para transformar os dados de nível em vazão.

2 Material e Métodos

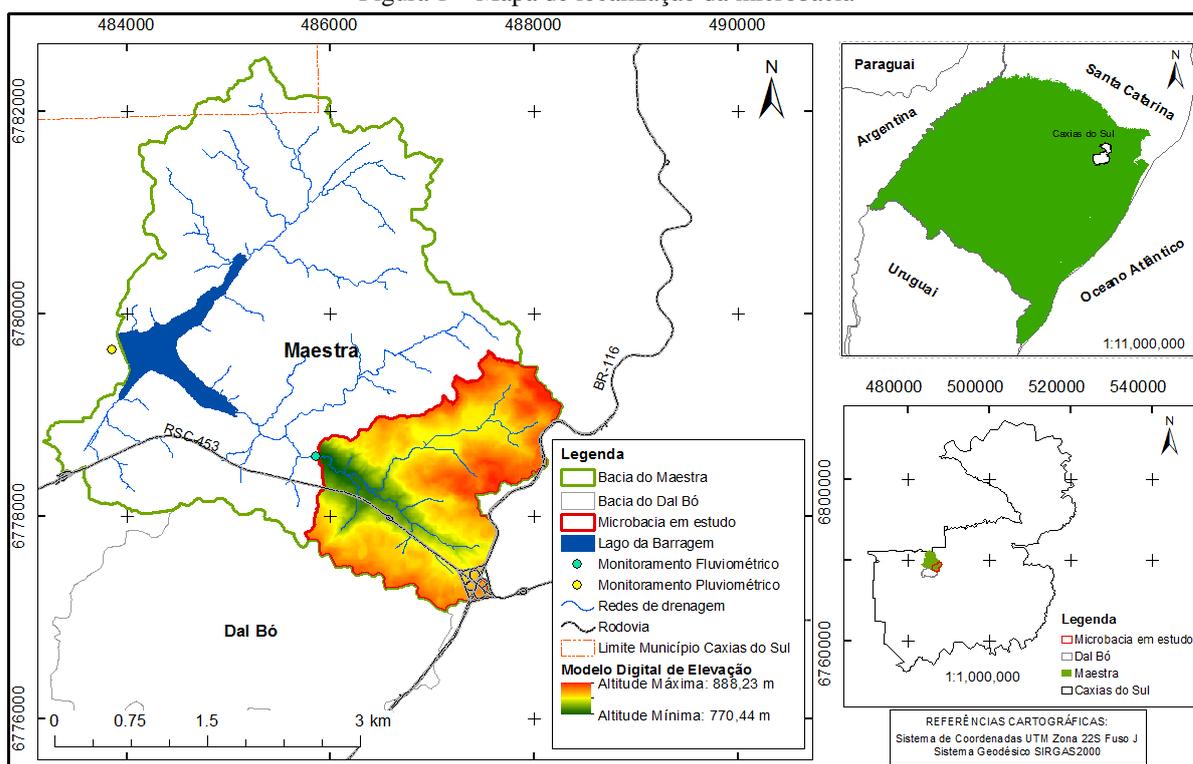
O presente estudo foi desenvolvido numa microbacia hidrográfica situada na bacia do Maestra, localizada no município de Caxias do Sul na região fisiográfica da encosta superior do nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). A microbacia abrange uma área de



3,53 km² e possui o seu exutório delimitado na seção de monitoramento fluviométrica, localizada nas coordenadas (29°7'15,867"S e 51°8'43,171"O). A bacia do Maestra está inserida na bacia do Taquari-Antas, sendo que a presente microbacia é caracterizada por forte influência da atividade antrópica, através da inserção de edificações e vias pavimentadas. Dessa forma, em função da crescente urbanização, parte da rede hidrográfica passou por um processo de canalização ao longo do seu curso.

A microbacia possui uma variação altimétrica entre 888,23 metros e 770,74 metros, sendo que o talvegue principal possui um comprimento total de 3,47 km e declividade de 33,85 m/km.

Figura 1 – Mapa de localização da microbacia



2.1 Método de medição de vazão com uso do molinete hidrométrico

O método consiste na medição da descarga líquida, em que o molinete é posicionado contra o fluxo do curso d'água, gerando um determinado número de rotações por segundo em sua hélice. A partir de uma equação característica deste molinete, o número de rotações obtido, durante a realização do teste, é aplicado nessa equação, com o intuito de quantificar uma determinada velocidade. Dessa forma, a vazão pelo método convencional é obtida através do somatório do produto da velocidade pela área molhada da seção transversal (SANTOS et al., 2001).

Para as medições a vau, foram utilizados os seguintes materiais: micromolinete hidrométrico e contador de pulsos eletrônico totalizador da marca Hidromec (Figura 2); trena graduada em escala centimétrica; régua de PVC para medição batimétrica do curso d'água; prancheta para anotação dos dados medidos. A equação do molinete ($V=0,25481 \cdot \text{Número de rotações} + 0,01650$), utilizada para o cálculo da velocidade, foi determinada através da calibração no Laboratório de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).



Figura 2 - Instrumentos para medição de vazão a vau



A metodologia de trabalho em campo (Figura 3) foi baseada em Santos et al. (2001), conforme Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Distância para medições da velocidade do fluxo em função da largura do rio

| Largura do rio [m] | Distância entre verticais [m] |
|--------------------|-------------------------------|
| < 3 | 0,3 |
| 3 a 6 | 0,5 |
| 6 a 15 | 1,0 |
| 15 a 30 | 2,0 |

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2001).

Tabela 2 – Pontos de amostragem, posição dos pontos e cálculo da velocidade média na subdivisão

| Profundidade (m) | Nº de pontos | Posição dos pontos | Velocidade média na vertical |
|------------------|--------------|------------------------------|--|
| 0,15 a 0,6 | 1 | 0,6 p | $V=0,6$ |
| 0,6 a 1,2 | 2 | 0,2 e 0,8 p | $V=(V_{0,2} + V_{0,8})/2$ |
| 1,2 a 2,0 | 3 | 0,2; 0,6 e 0,8 p | $V=(V_{0,2} + 2*V_{0,6} + V_{0,8})/4$ |
| 2,0 a 4,0 | 4 | 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p | $V=(V_{0,2} + 2*V_{0,4} + 2*V_{0,6} + V_{0,8})/6$ |
| > 4,0 | 6 | S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; p e F | $V=(V_s + 2*(V_{0,2} + V_{0,4} + V_{0,6} + V_{0,8}) + V_F)/10$ |

p = profundidade [m]; S = superfície; F = fundo; V = velocidade

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2001).

Figura 3 – Medição de vazão a vau no exutório da bacia



2.1.1 Método de cálculo da meia-seção

Os cálculos utilizados para quantificar a vazão pelo método da meia-seção seguiram as seguintes equações apresentadas no Quadro 1.



Quadro 1 – Cálculos desenvolvidos para determinação da velocidade da seção

| | | |
|----------------|---|-------------------------------|
| Primeiro passo | Cálculo da largura dos segmentos | $L_n = (d_{n+1} - d_{n-1})/2$ |
| Segundo Passo | Cálculo da área dos segmentos | $A_n = L_n \times P_n$ |
| Terceiro Passo | Cálculo da velocidade no segmento para $n \geq 1$ | $Q_n = V_n \times A_n$ |
| Quarto Passo | Somatório das vazões de cada subdivisão | $\sum Q_n = V_n \times A_n$ |

L_n = Largura [m]; d_{n+1} = Distância [m]; A_n = Área [m²]; P_n = Profundidade na subdivisão [m]; Q_n = Vazão na subdivisão [m³/s]; V_n = Velocidade da subdivisão [m/s].

2.2 Método de medição de vazão com o uso do flutuador

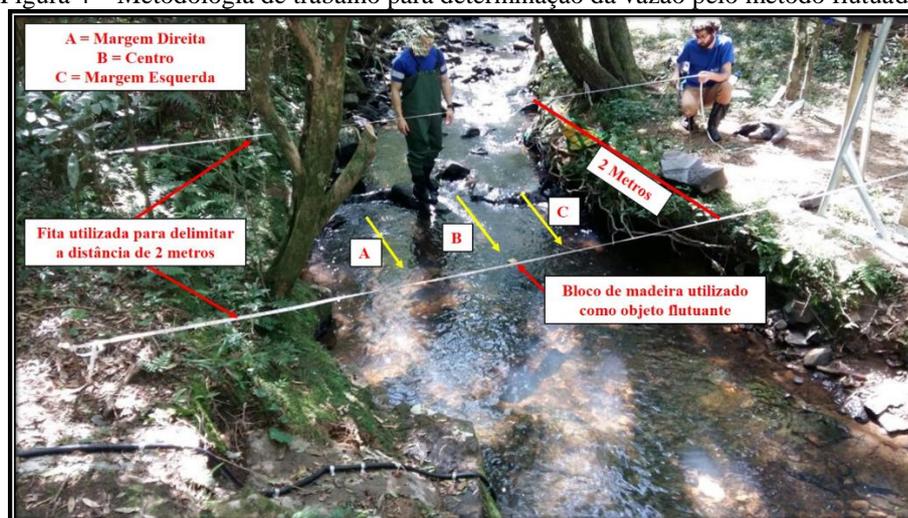
O método do flutuador consiste na determinação da velocidade de deslocamento de um objeto flutuante ao longo de um trecho do rio de comprimento conhecido (SANTOS et al., 2001). Para as medições com o método flutuador foram utilizados os seguintes materiais: trena centimétrica; cronômetro; bloco de madeira com dimensões de 5 cm/5 cm/1 cm; levantamento topográfico da seção transversal.

O trabalho em campo consistiu na utilização de uma trena centimétrica na calha do curso d'água, esta foi estendida por 2 metros de distância e o objeto foi arremessado em 3 posições diferentes, na parte esquerda, no centro e na parte direita da seção transversal conforme a Figura 4. Este procedimento foi adotado devido a diferença da distribuição da velocidade em canais abertos, conforme mostrado por Chadwick, Morfett e Borthwick (2017). Com o auxílio de um cronômetro, monitorou-se o tempo necessário para o objeto percorrer o trecho de 2 metros da trena e anotaram-se os valores na caderneta de campo. Ressalta-se que o método flutuador recomenda distâncias maiores que 10 metros, porém, devido à geometria do canal não foi possível realizar tal procedimento, adotando-se assim 2 metros.

O fator de correção da velocidade utilizado na Equação 1 do método flutuador foi baseado na metodologia da Embrapa (2007), onde considera o valor de 0,8 para rios com fundo pedregoso e 0,9 para rios com fundo barrento. Para o presente estudo o valor considerado foi de 0,85 devido a seção transversal apresentar fundo rochoso e presença de barro em algumas partes do trecho estabelecido para medição.

$$\text{Velocidade} = \text{Distância [m]} \cdot \text{Tempo [s]} \cdot \text{Fator Correção} \quad [1]$$

Figura 4 – Metodologia de trabalho para determinação da vazão pelo método flutuador

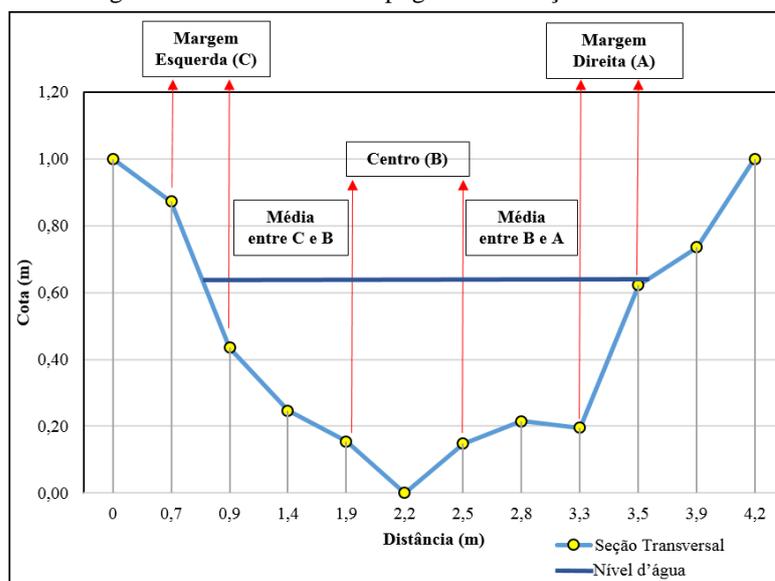


Com o valor da velocidade observada para os 3 trechos (esquerda, centro e direita), calculou-se a velocidade média entre a margem esquerda e o centro e também para a margem direita e o centro.



Para obter-se o valor da vazão total foi necessário multiplicar a velocidade em cada trecho pela área ocupada pela água na determinada subdivisão (Figura 5). A quantificação das áreas foi desenvolvida no *software* AutoCad a partir do levantamento topográfico da seção transversal e sempre recalculada quando alterada a cota linimétrica nos dias de medição. Os equipamentos topográficos utilizados para o levantamento batimétrico da seção transversal foram: Topcon GTS 212; tripé de alumínio para estação total modelo j30; prisma simples modelo AY01 circular de 64 mm e bastão de 2 m GLS-20B. O georreferenciamento dos pontos da seção transversal foram levantados a partir de dois marcos municipais cadastrados na rede Caxiense de Marcos Geodésicos (RCMGeo, 2014a; RCMGeo, 2014b).

Figura 5 – Levantamento topográfico da seção transversal



2.3 Extrapolação da curva-chave pelo método logarítmico

A partir das campanhas de vazão, foi possível a extrapolação da curva-chave para cotas maiores do que as medidas em campo. O método utilizado para a extrapolação da curva-chave foi o logarítmico. A Equação 2 de potência utilizada para a extrapolação dos dados de vazão é apresentada a seguir. Conforme Collischonn e Dorneles (2015), este tipo de equação é preferida porque se assemelha ao tipo de relação entre nível de água e vazão encontrado em equações de escoamento em regime permanente e uniforme, como as fórmulas de Manning ou Chézy.

$$Q = a(h - h_0)^n \quad [2]$$

Os passos tomados para a extrapolação da curva-chave foram desenvolvidos na planilha eletrônica Excel, e iniciaram com um valor arbitrário de 'h₀', como por exemplo, um valor igual a ZERO. Posteriormente foi possível determinar os valores de "X", "Y", "n" e "a", conforme Quadro 2. Para a resolução do quinto passo (Quadro 2), foi utilizado um método de minimização de desvios entre valores previstos pela Equação 2 e os valores medidos em campo de vazão, como o método de mínimos desvios quadrados (COLLISCHONN; DORNELES, 2015). Finalizando estes passos, utilizou-se a ferramenta Solver, disponível no Excel, com o intuito de buscar o melhor ajuste do valor 'h₀'. O procedimento tomado consistiu em definir como objetivo a variável ENS (Eficiência de Nash-Sutcliffe) para atingir o valor de UM (1), quando alterado a célula "h₀".



Quadro 2 – Passos para extrapolação da curva-chave

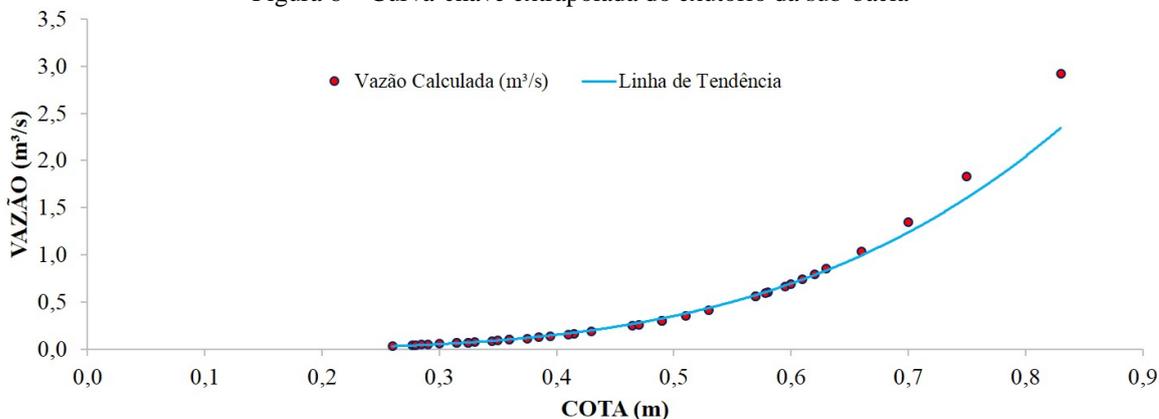
| | | |
|---------|------------------------------|---|
| Passo 1 | Cálculo de X | $X = \ln(h_i - h_0)$ |
| Passo 2 | Cálculo de Y | $Y = \ln(Q_i)$ |
| Passo 3 | Cálculo de n | $n = \left(N * \sum_{i=1}^N (X_i * Y_i) \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) * \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right) / \left(N * \sum_{i=1}^N X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2$ |
| Passo 4 | Cálculo de a | $\ln(a) = \bar{Y}_i - n * \bar{X}_i$ |
| Passo 5 | Eficiência de Nash-Sutcliffe | $ENS = 1 - \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{est})^2 / \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{obs}^{méd})^2$ |

hi = Cota medida na seção transversal [m]; Qi = Vazão medida pelo método da meia seção e flutuador [m³/s]; N = Número total de medições de vazão pelos métodos hidrométricos; \bar{Y} = Média aritmética de Y; \bar{X} = Média aritmética de X; ENS = Eficiência de Nash-Sutcliffe; Q_{obs} = Vazões medidas pelo método da meia-seção e flutuador [m³/s]; Q_{est} = Vazões calculadas pela equação da curva-chave extrapolada [m³/s]; $Q_{obs}^{méd}$ = Média aritmética das vazões observadas [m³/s].

3 Resultados e discussões

A partir da aplicação das técnicas hidrométricas para quantificar a vazão no exutório da microbacia, a construção da curva-chave foi desenvolvida através das medições das cotas linimétricas e suas respectivas vazões. A Figura 6 apresenta a extrapolação superior da curva-chave pelo método logarítmico, sendo que a Eficiência de Nash-Sutcliffe ajustada pelo Solver teve um valor acima de 0,98, apresentando um elevado grau de eficiência entre os dados de vazão observados pelos calculados, possibilitando realizar previsões mais acertadas nos períodos de cheia, onde encontram-se as vazões com valores extremos (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007).

Figura 6 – Curva-chave extrapolada do exutório da sub-bacia



A Equação 3 da curva-chave determinada pelo método logarítmico é mostrada a seguir, sendo a variável H utilizada para transformar os dados de cota linimétrica em vazão.

$$Q = 1,1734(H + 0,321)^{6,4671} \quad [3]$$

4 Conclusão

Os resultados deste trabalho permitiram concluir que a extrapolação logarítmica da curva-chave para cotas superiores teve um ótimo ajuste com o uso da planilha eletrônica Excel. Deste modo, cotas linimétricas acima daquelas já medidas pelo método da meia-seção e flutuador podem ser utilizadas na equação da curva para transformação de dados de nível em vazão. Entretanto será necessário a obtenção de novas vazões a partir de cotas superiores, visando evitar a superestimação ou subestimação da vazão.



O processo de arraste de sedimentos, material rochoso e erosão das margens mudam as características da seção transversal, exigindo medições periódicas das cotas e vazões da microbacia. Isto se deve à natureza do próprio método logarítmico, pois embora tenha como base, necessariamente, as medições realizadas, os seus parâmetros “n”, “a” e “h₀” levam em consideração as características da geometria e rugosidade da seção transversal.

Conclui-se, portanto, que o uso da curva-chave torna-se uma ferramenta indispensável para realização de modelagens hidrológicas da microbacia que envolvam a calibração e validação de variáveis hidrológicas. Além disso, estudos relacionados a demanda hídrica e de regionalização de vazões também necessitam dos dados históricos de vazão, sendo assim, um trabalho essencial a ser realizado no âmbito do planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Referências

CHADIWCK, Andrew; MORFETT, John; BORTHWICK, Martin. **Hidráulica para engenharia civil e ambiental**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: 2ª Edição revisada e ampliada, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Medição da vazão em rios pelo método do flutuador**. Concórdia, Santa Catarina, jul. 2007. Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/443939/medicao-da-vazao-em-rios-pelo-metodo-do-flutuador>>. Acesso em: Nov de 2017.

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela - RS**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos v. 11, n. 4, p. 99-108, 2006.

GUILHON, Luiz Guilherme; ROCHA, Vinicius Forain; MOREIRA, Jonatas Costa. **Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 3, p.13-20, 2007.

MAIDMENT, David R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1992. 1400 p.

PORTO, Rubem La Laina; SILVA, Ricardo Martins da; FILHO, Kamel Zahed **Medição de vazão e curva-chave**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2001. 49p.

RCMGeo. **Rede Caxiense de Marcos Geodésicos**. 2014a. Disponível em: < <https://geofiles.caxias.rs.gov.br/rcmgeo/398.pdf>>. Acesso em Janeiro de 2018.

RCMGeo. **Rede Caxiense de Marcos Geodésicos**. 2014b. Disponível em: < <https://geofiles.caxias.rs.gov.br/rcmgeo/397.pdf>>. Acesso em Janeiro de 2018.

SANTOS, Irani dos et al. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: LACTEC, 2001. 372 p.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2002. 943 p.