

ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DE CURVAS-CHAVES GERADAS PELO MODELO HEC-RAS E SWMM

Luísa Almeida Ventura^{1}, Priscilla Macedo Moura², Wilson dos Santos Fernandes³*

Resumo

A dificuldade, e muitas vezes impossibilidade, de utilizar métodos diretos para determinação de vazão faz com que seja usual a estimativa de modo indireto mediante o uso da relação cota-descarga, chamada curva-chave. Devido à importância das séries de vazão nos estudos hidrológicos e ao fato da confiabilidade dos dados de descarga depender diretamente da qualidade dessa relação, esse artigo faz uma análise comparativa das curvas-chaves sintéticas geradas pelo modelo hidráulico HEC-RAS e da curva-chave gerada pelo modelo hidrológico e hidráulico SWMM. Esta comparação foi feita para a estação fluviométrica de monitoramento 24 localizada na calha principal do ribeirão Arrudas, Belo Horizonte. Os resultados mostraram que as curvas-chaves sintéticas obtidas utilizando o escoamento permanente no HEC-RAS para a faixa de rugosidade utilizada para o concreto apresentaram-se abaixo da curva-chave gerada pelo SWMM.

Palavras-Chave: Curva-chave, SWMM, HEC-RAS.

PRELIMINARY COMPARATIVE ANALYSIS OF RATING CURVES DEVELOPED BY HEC-RAS AND SWMM MODEL

Abstract

Direct measurements of discharge are difficult, and even impossible. Therefore, the traditional and simple way to gather information on current discharge is then to measure the water level with gauges and to use the stage-discharge relationship, known as rating curve. Due to the importance of flow series in hydrological studies and the importance of rating curves because the reliability of discharge data values highly depends on a satisfactory stage-discharge relationship, this article compares synthetic rating curves developed by the hydraulic model HEC-RAS and the rating curve developed by the hydrological and hydraulic model SWMM. This comparison was made for the fluviometric monitoring station 24 located in the main channel of the Arrudas stream, Belo Horizonte. The results showed that synthetic rating curves derived using steady flow in the HEC-RAS for the roughness range used for concrete were below the rating curve developed by the model SWMM.

Keywords: Rating curve, SWMM, HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

A medição de vazão em uma seção fluvial através de métodos diretos é um processo demorado, dispendioso e em alguns casos até impossível, principalmente durante as cheias (Brusa e Clarke, 1999; Braca, 2008; Al-Abadi, 2014). Por isso, uma maneira mais simples de ter acesso a esses dados é através da medição do nível de água seguida da utilização de uma relação cota-vazão: a curva-chave.

¹ Mestranda, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG (SMARH-UFMG), CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG. Correio eletrônico: luisa.al.ventura@gmail.com

² Prof^a. Dr^a. Eng^o, Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (UFMG-EHR), CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG. Correio eletrônico: priscilla.moura@ehr.ufmg.br

³ Prof. Dr. Eng^o, Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (UFMG-EHR), CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG. Correio eletrônico: wilson@ehr.ufmg.br

Braca (2008) enfatiza a importância da curva-chave devido à confiabilidade dos dados de descarga depender diretamente da qualidade dessa relação. Porém, a relação cota-vazão para uma dada seção transversal não é necessariamente única, uma vez que as descargas dos rios são influenciadas por diversos fatores que nem sempre são compreendidos e quantificáveis (Sefe, 1996). A vazão não é função apenas da cota, mas também da geometria, declividade longitudinal e rugosidade do canal, bem como das condições e controles hidráulicos a montante e a jusante do ponto de monitoramento.

As curvas-chaves geralmente são definidas usando uma série de medidas de nível e vazão (Pinto *et al.*, 1976; Jacon e Cudo, 1989; Herschy, 1993), sendo a estabilidade da sua relação o fator que define o número de medições de descargas necessárias. O intervalo limitado pelas cotas mínimas e máximas observadas é definido como intervalo de calibragem, portanto o problema da definição da curva-chave corresponde ao ajuste nesse intervalo e a extrapolação para valores inferiores e superiores aos observados (Filho *et al.*, 2003). Brusa e Clarke (1999) e Clarke e Brusa (2001) apresentam trabalhos que quantificam os erros inerentes a essa extrapolação.

Convencionalmente, a curva-chave pode ser obtida por métodos matemáticos (Pinto *et al.*, 1976; Ghimire e Reddy, 2010). Todavia, devido à complexidade dessa relação que muitas vezes é variável no tempo, nem sempre é possível definir uma curva-chave simples, mesmo com técnicas tradicionais de modelagem. Assim, diversos trabalhos buscam aperfeiçoar curvas-chaves utilizando modelos, além de procurar entender e quantificar as incertezas inerentes ao processo. Propostas que incorporam a complexidade da relação cota-vazão são apresentadas em substituição às tradicionais curvas-chaves. Um exemplo é o uso de modelos hidrodinâmicos, que tem aumentado nos últimos anos (Perumal e Sahoo, 2007 e Bao *et al.* 2009).

Uma alternativa à tradicional relação cota-vazão é apresentada por Perumal e Sahoo (2007) e Perumal *et al.* (2007) que estudam e quantificam a aplicabilidade de métodos de propagação simplificados derivados diretamente das equações de Saint-Venant. Aricò *et al.* (2010) utilizam a medição sincronizada do nível em duas seções separadas por alguns quilômetros de distância para estimar a vazão na estação a montante para calibração do coeficiente de Manning através da resolução das equações de Saint-Venant de forma difusa e completa. Reistad *et al.* (2007) e Doherty (2010) utilizam o *software* HEC-RAS para a calibração desse mesmo coeficiente de rugosidade com o nível de água. Oliveira *et al.* (2016) e Formiga *et al.* (2016) utilizam um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Saint-Venant para a determinação de vazão em canais abertos com calibração feita com auxílio de algoritmos genéticos multiobjetivo. A busca da determinação do coeficiente de Manning nos modelos hidrodinâmicos dos trabalhos supracitados ocorre, segundo Bao *et al.* (2009), devido à alta sensibilidade desse parâmetro.

No Brasil, desde 2001, a Agência Nacional de Águas (ANA) coordena a Rede Hidrometeorológica Nacional com o monitoramento hidrológico em estações distribuídas por todo o país. Porém, além da distribuição geográfica dessas estações não ser homogênea, as adversidades ligadas à logística para operação hidrométrica contribuem significativamente para a diminuição das medições em algumas regiões (Barros *et al.*, 2014; Alves *et al.*, 2014). Objetivando mudar esse quadro, foi elaborada a Resolução Conjunta nº3/2010, da ANA e da Agência Nacional de Energia Elétrica que responsabilizou as entidades utilizadoras dos recursos hídricos para geração de energia hidrelétrica pelo monitoramento hidrológico.

Formiga *et al.* (2016) enfatizam que em áreas urbanas, ainda existe o agravante dos trechos canalizados apresentarem variações rápidas do hidrograma, o que resulta em elevados valores de aceleração. Somado a isso, as altas velocidades nos canais também dificultam, e até impossibilitam, as medições de vazões na seção.

O ribeirão Arrudas, localizado no município de Belo Horizonte, é um exemplo dos problemas citados acima. As estações localizadas ao longo de sua calha principal registram apenas informações de nível, e não existem registros de vazão ou velocidade. Dessa forma, o presente artigo objetiva realizar uma avaliação da relação cota-vazão sintética para a estação de monitoramento 24 gerada no HEC-RAS a partir de uma metodologia subjetiva, confrontando-a com a curva-chave gerada pelo modelo do SWMM, que servirá como referência por considerar tanto as características hidráulicas como hidrológicas da bacia e por ser um modelo que permite a calibração com dados observados de nível. Assim, apesar da comparação ser realizada entre modelos, será possível verificar se as curvas-chaves sintéticas se aproximam das geradas por um modelo calibrado da bacia servindo como embasamento para futuros trabalhos que utilizem essas curvas-chaves na calibração de modelos hidrológicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A bacia do ribeirão Arrudas é uma das principais da cidade de Belo Horizonte. Ela se localiza na região sul do município com uma área de 207,76 km² e engloba também os municípios de Contagem e Sabará, sendo que sua maior parte, aproximadamente 85%, encontra-se em Belo Horizonte, assim como as áreas mais densamente ocupadas. Sua nascente encontra-se na Serra do Cachimbo, BH, e seu leito principal é formado pelo encontro das águas dos córregos Jatobá e Barreiro, com uma extensão até a foz de 30,6 km e declividade de 7m/km, o que ocasiona escoamentos em altas velocidades (SUDECAP, 2015).

As modelagens hidráulica e hidrológica foram feitas considerando apenas a calha principal do ribeirão Arrudas. Na região de interesse, o curso d'água encontra-se canalizado, com seções regulares do tipo retangular triangular de 10,90 m de largura, 6,35 m de profundidade e revestimento de concreto. Para este artigo foi considerada apenas a área de contribuição da estação de monitoramento 24, localizada na porção de montante da bacia do ribeirão Arrudas, chamada sub-bacia 24, com área de 48,12 km², conforme apresenta a Figura 1.

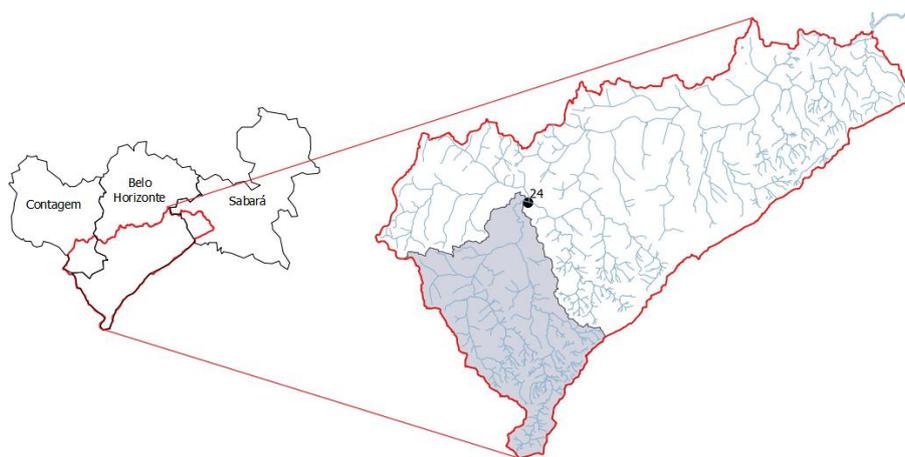


Figura 1 - Sub-bacia 24 dentro da bacia do ribeirão Arrudas, que pertence aos municípios de Contagem, Belo Horizonte e Sabará.

Elaboração das Curvas-Chaves Sintéticas

O modelo hidráulico foi desenvolvido no HEC-RAS versão 5.0 (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis Systems*), da *U.S. Army Corps of Engineers*, um software gratuito que tem como funções principais a modelagem do escoamento permanente unidimensional e pseudo-

bidimensional, e do escoamento não permanente, além da análise de transporte de sedimentos, contornos móveis e qualidade da água (USACE, 2016).

Para a simulação, utilizaram-se as seções georreferenciadas e os trechos correspondentes às seções canalizadas foram adicionados conforme apresentado no atlas do Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte (PBH, 2002). Dentre as funções disponíveis para obtenção do perfil de linha d'água foi utilizado o escoamento permanente que calcula através da equação da energia, utilizando um processo de resolução iterativo chamado *standard step*. A perda de carga entre duas seções é composta por duas parcelas: as perdas por atrito e por contração e expansão.

As curvas-chaves sintéticas foram elaboradas utilizando apenas informações da geometria da calha principal e do coeficiente de rugosidade de Manning, estimado na literatura segundo o material e as condições locais, metodologia comum em regiões onde não há informações de velocidade e vazão disponíveis.

Para efeito de comparação, foram simulados diversos valores para o coeficiente de Manning. Visando melhorar a representação do canal, foram interpoladas seções a cada 100 metros entre as inseridas e para as condições de contorno utilizou-se a profundidade normal de escoamento. Apesar dessa escolha para as condições de contorno, observou-se que elas não afetam a seção de interesse referente à estação 24 devido à grande extensão do ribeirão Arrudas.

Elaboração das Curvas-Chaves com o SWMM

O SWMM da *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), desenvolvido no ano de 1971, é um modelo dinâmico de transformação chuva-vazão usado para um único evento chuvoso ou para simulações contínuas de longo prazo da quantidade e qualidade da água, especialmente em áreas urbanas. Este é determinístico, distribuído e discreto e computa suas variáveis em intervalos de tempo, onde a cada intervalo novos valores de entrada são acrescentados ao sistema. Assim, à medida que as variáveis de estado são atualizadas, as variáveis de saída relacionadas são calculadas (Rossman e Huber, 2016).

A bacia é retratada de forma retangular com inclinação constante e uma largura que drena toda a água para uma única saída. A estimativa do escoamento superficial é feita através da modelagem da bacia como um reservatório não linear fictício, combinando as equações de Manning e da continuidade resolvidas pelo processo iterativo de Newton-Raphson (Rossman e Huber, 2016).

Para elaboração da curva-chave foi utilizada a versão 5.1 do programa, o método de infiltração do SCS e para a propagação foi adotado o método da onda cinemática que utiliza a equação da continuidade em conjunto com a equação da quantidade de movimento simplificada em cada canal ou tubulação. A equação do momento requer que a inclinação da superfície de água seja igual ao do conduto, além disso, o máximo de água que pode ser transportado é o valor referente à seção plena na equação de Manning (Rossman, 2015).

O evento selecionado corresponde ao do dia 11/12/2013, que gerou um alerta laranja de inundação na estação analisada, o que corresponde à 80% da seção atingida. Foram utilizados dados de um dia antes e um dia depois do evento, assim os registros inseridos vão de 10/12/2013 a 00:00 até 12/12/2013 as 23:50. No total do período considerado, foi registrada uma precipitação acumulada de 140,6 mm, intensidade máxima em 10 minutos de 99,6 mm/h e profundidade máxima de 5,15 m. Para esse evento, o modelo conseguiu representar bem os tempos de pico e de recessão (Figura 2), apresentando um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,90. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros de entrada calibrados utilizando um algoritmo estocástico denominado *Dynamically Dimensioned Search* (Tolson, 2005).

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de entrada do SWMM.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Width (m)	2.874,22	Dstore-Imperv	6,00
% Slope	18,40	Dstore-Perv	12,82
% Imperv	44,26	%Zero-Imperv	61,50
N-Imperv	0,026	CN	40,40
N-Perv	0,895	Roughness (n)	0,029

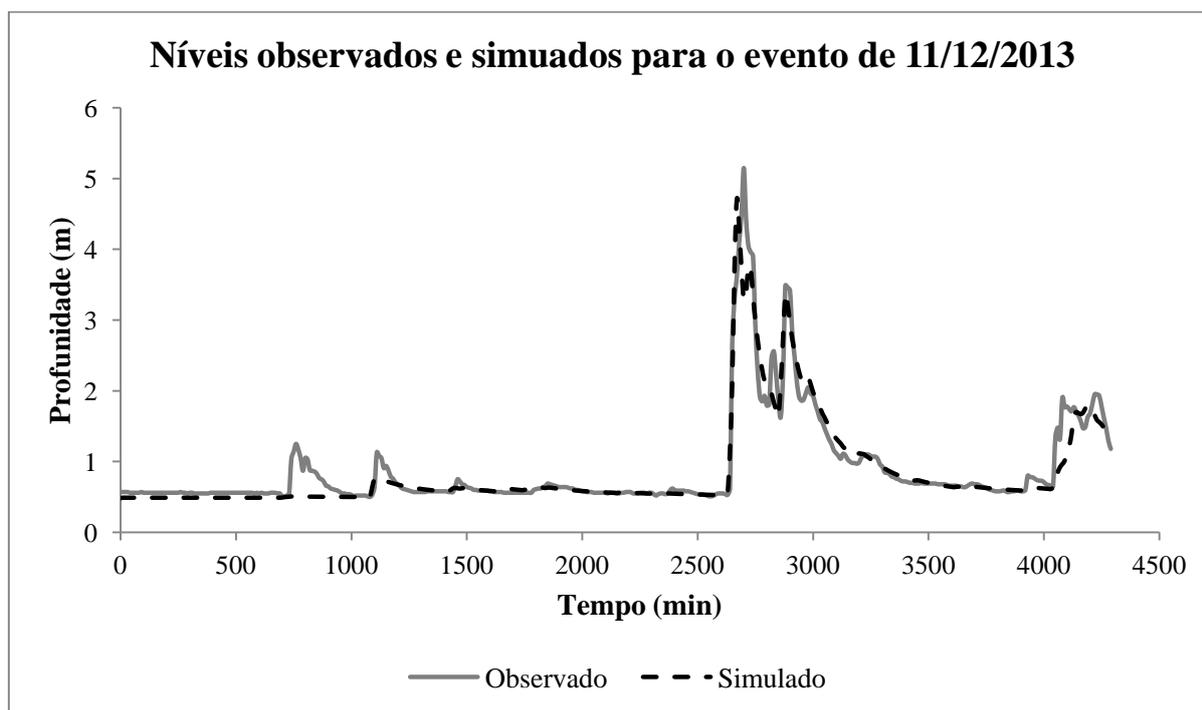


Figura 2 - Níveis observados e simulados com o SWMM para o evento 11/12/2013.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta as curvas-chaves sintéticas geradas pelo HEC-RAS e a gerada pelo SWMM para o evento do dia 11/12/2013. Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning mostrados são aqueles comumente indicados para o concreto na literatura, de 0,011 a 0,022 (Baptista e Lara, 2016), simulados no modelo hidráulico para fins comparativos. Além desses, foram simulados também o valor de 0,029, que corresponde ao coeficiente de Manning obtido na calibração do SWMM e o valor cuja curva-chave mais se aproxima daquela gerada pelo SWMM. A partir da análise visual, observa-se que a curva-chave do modelo calibrado no SWMM, gerada a partir de um coeficiente de rugosidade para o canal de 0,029, se ajustou à curva-chave do HEC-RAS correspondente ao coeficiente de rugosidade de Manning de 0,035.

Esse valor, fora da faixa esperada para o concreto, pode ser em parte explicado pelo regime de escoamento da simulação realizada no HEC-RAS, que foi o permanente. Formiga *et al.* (2016) ressalva que nos hidrogramas naturais dos rios os regimes são caracterizados por apresentar escoamento não permanente, com os termos de aceleração local e convectiva das equações de Saint-Venant com valores que não podem ser negligenciados, especialmente nas situações de cheias.

No modelo do SWMM, além das características hidrológicas da bacia serem consideradas, a propagação no canal é feita no regime não permanente. Dessa forma, espera-se que seu resultado seja mais próximo à realidade. Para confirmar esses valores, seriam necessárias medições de vazão ou velocidade no local. Mesmo uma estimativa de velocidade utilizando flutuadores já permitiria uma melhora no ajuste quanto à ordem de grandeza das vazões no ribeirão.

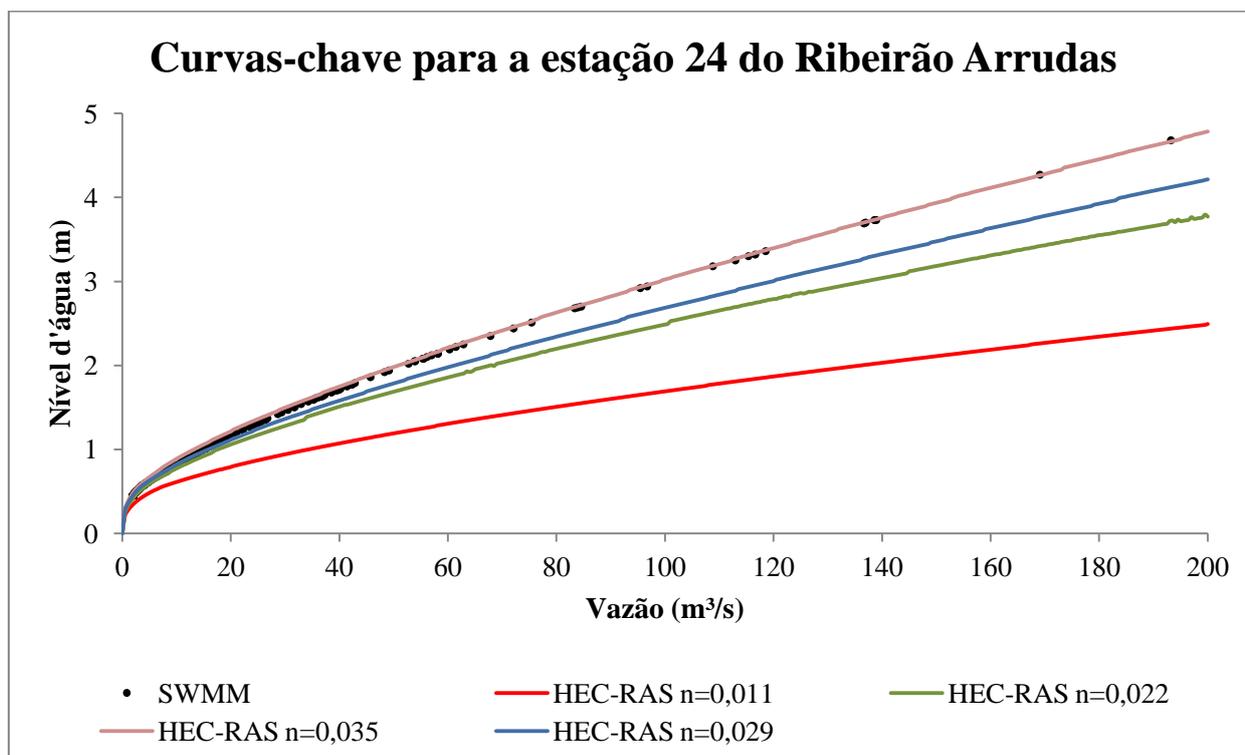


Figura 3 - Curvas-chaves para estação 24 geradas pelo HEC-RAS e pelo SWMM, onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que, a princípio, as curvas-chaves sintéticas obtidas da simulação no escoamento permanente a partir da estimativa do coeficiente de rugosidade de Manning na literatura não apresentam uma boa representatividade. As curvas-chaves para a faixa de rugosidade utilizada para o concreto apresentaram-se abaixo da curva-chave adotada como verdadeira, gerada pelo SWMM.

A realização desse tipo de análise em uma bacia que possua monitoramento de vazão permitiria uma conclusão mais segura quanto à boa representação dos modelos estudados. Como a bacia do ribeirão Arrudas não apresenta vazões nem velocidades medidas, a comparação foi feita entre modelos, tomando como referência o modelo que além de ter apresentado um bom ajuste na calibração para a região, também considera mais variáveis no processo de cálculo.

Os resultados preliminares apresentados nesse artigo fazem parte de uma análise de caráter exploratório. Novas simulações para outras sub-bacias e para outros eventos devem ser feitas a fim de analisar o comportamento do ribeirão Arrudas em diversos pontos. Além disso, recomenda-se a realização de simulações no regime não permanente no HEC-RAS para melhor caracterizar a situação local e se possível, a realização de campanhas de medição a fim de se obter dados para melhorar o ajuste da curva chave.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-ABADI, A. M. *Modeling of stage-discharge relationship for Gharraf River, southern Iraq, using backpropagation artificial neural networks, M5 decision trees, and Takagi-Sugeno inference system technique: a comparative study. Applied Wat Sci*, p. 407-420. 2014.
- ALVES, F. V. FERNANDES, M. T. F. C. L. MAXIMIANO, A. A. MENDONÇA. L. S. T. CRUZ, H. P. Resolução conjunta ANA/ANEEL N° 03/2010: implementação e reflexos no monitoramento hidrológico do país. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. *Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2014.
- ARICÒ, C. CORAO, G. TUCCIARELLI, T. MEFTAH, M. B. PETRILLO, A. F. MOSSA, M. *Discharge estimation in open channels by means of water level hydrograph analysis. Journal of Hydraulic Research*, v. 48, n. 5, p. 612-619. 2010.
- BAO, W. M. ZANG, X. Q. QU, S. M. *Dynamic correction of roughness in the hydrodynamic model. Journal of Hydrodynamics*, v. 21, n. 2, p. 255-263. 2009.
- BAPTISTA, M. B. LARA, M. M. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. Editora UFMG, 4ª ed. Belo Horizonte, 2016.
- BARROS, M. M. F. MELO, C. R. MELO, S. C. COSTA, F. A. GUEDES, P. A. Análise dos efeitos da redução de medições de descarga líquida sobre a qualidade das curvas-chaves no rio Tracunhaém: um estudo de caso. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. *Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2014.
- BRACA, G. *Stage-discharge relationship in open channels: practices and problems. FORALPS Technical Report*, 11. Università degli Studi di Trento, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Trento, 2008.
- BRASIL. Resolução Conjunta nº 3, de 10 de agosto de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, 10 de agosto de 2010.
- BRUSA, L. C. CLARKE, R. T. Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: Bacia do rio Ibicuí, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 4, n. 3, p. 91-95, jul./set. 1999.
- CLARKE, R. T. BRUSA, L. C. *The precision of low flows estimated from rating curves: a case of study from Brazil. Integrated Water Resources Management*, v. 272, p. 296-275. 2001.
- DOHERTY, R. *Calibration of HEC-RAS models for rating curve development in semi arid regions of Western Australia*. In: AHA Conference, Perth. *Anais do AHA Conference*, 2010.
- FILHO, D. P. SANTOS, I. FILL, H. D. Sistema de ajuste e extrapolação de curva de descarga – Stevens. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2003.
- FORMIGA, K. T. M. OLIVEIRA, F. A. PEREIRA, T. S. R. SOARES, A. K. Calibração de um modelo hidrodinâmico em um canal urbano utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo. *Revista Ciência e Engenharia*, v. 25, n. 2, p. 19-28, jul./dez. 2016.
- GHIMIRE, B. N. S., REDDY, M. J. *Development of stage-discharge rating curve in river using genetic algorithms and model tree*. In: *International Workshop Advances in Statistical Hydrology*, 2010, Taormina. *Anais do International Workshop Advances in Statistical Hydrology*, 2010.
- HERSCHY, R. *The stage-discharge relation. Elsevier Applied Science*, p. 11-15. 1993.

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

OLIVEIRA, F. A. PEREIRA, T. S. R. SOARES, A. K. FORMIGA, K. T. M. Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 4, p. 707-718, out./set. 2016.

PBH. Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem – Bacia do Ribeirão Arrudas. *Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte*, Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2002.

PERUMAL, M. MORAMARCO, T. SAHOO, B. BARBETTA, S. *A methodology for discharge estimation and rating curve development at ungauged river site*. *Water Resources Research*, v. 43. 2007.

PERUMAL, M. SAHOO, B. *Applicability criteria of the variable parameter Muskingum stage and discharge routing methods*. *Water Resources Research*, v. 43. 2007.

PINTO, N. L. S. HOLTZ, A. C. T. MARTINS, J. A. GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia Básica*. São Paulo, E. Blücher, 1976.

REISTAD, K. S. ØVERLEIR, A. P. BOGETVEIT, L. J. *Setting up rating curves using HEC-RAS*. VANN, p. 20-30. 2007.

ROSSMAN, L., A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency. 2015.

ROSSMAN, L. A. HUBER, W. C. *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised)*. United States Environmental Protection Agency. 2016.

SEFE, F. T. K. *A study of the stage-discharge relationship of the Okavango River at Mohembo, Botswana*. *Hydrologic Science Journal*, p 97-116. 1996.

SUDECAP – SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. *Plano municipal de saneamento de Belo Horizonte – 2012/2015*. Belo Horizonte, vol. I/II, 2015.

TOLSON, B. A. *Automatic Calibration, Management and Uncertainty Analysis: Phosphorus Transport in the Cannonsville Watershed*. Tese de Doutorado, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, EUA, 2005.

USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual*. Versão 5.0. 960 p. 2016.