

IV-016 - DETERMINAÇÃO DE CURVA-CHAVE EM PONTO ESPECÍFICO DO RIO JORDÃO, SITUADO NA BACIA DO RIO PARANAÍBA**Marcio Ricardo Salla⁽¹⁾**

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Carlos Eugenio Pereira

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Liliane Magnavaca de Paula

Arquiteta, mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Uberlândia.

Caroline Humberto Machado

Graduanda na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Endereço⁽¹⁾: Rua João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG - CEP: 38400-092 - Brasil - Tel: (34) 3239-4170 - e-mail: mrsalla@feciv.ufu.br

RESUMO

A elaboração da curva-chave facilita muito o estudo de autodepuração através de modelos matemáticos de qualidade da água, seja qual for o curso de água, uma vez que apenas com o conhecimento da cota líquida medida na régua graduada já é o suficiente para saber a descarga na seção. É importante salientar que uma curva-chave somente é válida enquanto a seção transversal permanecer inalterada. Daí é que se evidencia a importância da escolha correta desta seção transversal. Este artigo apresenta a curva-chave em um ponto no rio Jordão, à montante da confluência com o córrego Brejo Alegre, localizados no município de Araguari (MG), na UPGRH PN-1 - Bacia Hidrográfica do rio Paranaíba. Faz parte de um estudo de autodepuração do rio Jordão em função da descarga de poluentes do córrego Brejo Alegre. Tal estudo está fundamentado na inexistência de tratamento de efluente doméstico neste município. As coordenadas do ponto de estudo foram obtidas em campo com o aparelho *Global Position System* (GPS) Geodésico, modelo ProMark 2, e que apresenta 18° 36.721 Latitude S, 48° 06.711 Longitude W e 647 metros de altitude. Os trabalhos experimentais ocorreram no período de maio de 2010 até abril de 2011, totalizando 6 pontos (h x Q), salientando que pontos adicionais ainda serão obtidos. Os parâmetros a e b da equação da curva-chave foram obtidos através de regressão linear. Já o parâmetro h_0 foi obtido através da ferramenta *Solver* do Excel fixando os parâmetros a e b previamente obtidos. Através do método de mínimos quadrados, a curva de regressão apresentou um valor de 14,85, considerado satisfatório em função dos poucos pontos experimentais. A curva-chave resultante forneceu a equação $Q = 3,421.(h+1,003)^{4,148}$, onde Q é a vazão em m³/s e h é a cota líquida na posição de fixação da régua graduada. É esperado que, com a maior quantidade de pontos experimentais, a curva de regressão apresentará menor resultado dos mínimos quadrados.

PALAVRAS-CHAVE: Curva-Chave, Molinete, Rio Jordão, Araguari-MG.

INTRODUÇÃO

A curva-chave correlaciona a vazão e a altura da lâmina de água em um curso de água, geralmente obtida de forma experimental. As medidas são realizadas em campo em uma seção transversal pré-estabelecida no curso de água. A escolha da seção e a fixação de uma régua graduada deve permitir uma relação segura entre a vazão e o nível de água. As medições são realizadas mensalmente ou de forma esporádica dependendo do regime de chuvas com o fim de se obter dados nas épocas de estiagem e chuvosa.

A literatura da área indica que o maior problema na medição da vazão é a escolha de seção mais apropriada que garanta segurança na relação entre os níveis de água e as vazões. A seção para controle deve apresentar fácil acesso, ter uma forma regular para facilitar a operação de levantamento do par cota x vazão, ser um trecho retilíneo e com declividade constante, sendo importante que a velocidade esteja entre 0,2 e 2,0 m/s. Assim, assegurados tais critérios, a curva-chave se mantém válida por muito tempo.

O município de Araguari/MG está inserido, hidrologicamente, na bacia do rio Paranaíba, o qual possui o rio Jordão como um de seus cursos de água, que por sua vez, recebe o Córrego Brejo Alegre como afluente. Esse córrego caracteriza-se como um rio perene, com nascentes pontuais de baixa vazão na área urbana do município, além de contribuições difusas do lençol freático, também com baixas vazões. Visto que parte da área urbana lança os esgotos domésticos diretamente neste córrego, sem nenhum tipo de tratamento, o estudo da capacidade de autodepuração do córrego Brejo Alegre e do rio Jordão é fundamental na gestão e prognóstico da qualidade das águas dos rios encontrados nesta bacia.

A medição da vazão em curso de água (mais especificamente o rio Jordão) é um processo complexo que engloba equipamentos e pessoal treinado. A determinação da curva-chave é de fundamental importância para o estudo da autodepuração em curso de água através da utilização de modelagem matemática, tais como Modelo de Streeter e Phelps, QUAL2E, QUAL2K, entre outros. É nesta vertente que o presente artigo está inserido.

LOCAL DO ESTUDO

O ponto de estudo onde foi determinada a curva-chave situa-se no rio Jordão antes da confluência com o córrego Brejo Alegre, pertencente a bacia hidrográfica do rio Paranaíba, conforme ilustra a Figura 1. De acordo com o Sistema Estadual de Gestão de Recursos Hídricos (SEGRH), vinculado ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), o rio Jordão está inserido na Unidade de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos UPRH PN-1.

As coordenadas do ponto de estudo foram obtidas em campo com o aparelho *Global Position System* (GPS) Geodésico, modelo ProMark 2, e que apresenta 18° 36.721 Latitude (S), 48° 06.711 Longitude (W) e 647 metros de altitude.

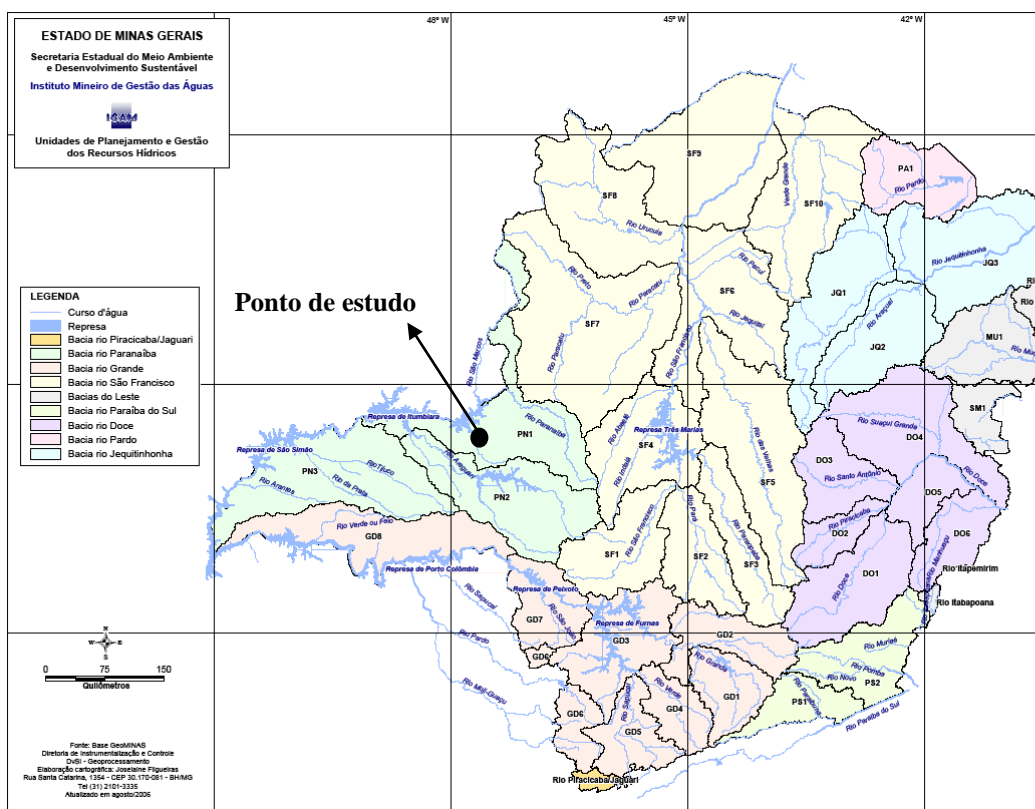


Figura 1: Identificação dos pontos de coleta, desde a montante do córrego Brejo Alegre (afluente do rio Jordão) até a confluência do rio Jordão com o rio Paranaíba. Fonte: <http://www.igam.mg.gov.br/geoprocessamento/mapas>

A escolha do ponto de estudo ilustrado na Figura 1 se fez em função da facilidade de acesso, proximidade com sede de uma propriedade rural e por apresentar seção transversal razoavelmente definida.

MATERIAIS E MÉTODOS

No Brasil, devido ao alto custo de implantação e manutenção, existem deficiências de redes hidrométricas e consequentemente de dados históricos e, na maioria das vezes, as redes existentes dificilmente cobrem todos os locais de interesse necessários para o planejamento hídrico de uma região. É necessário estimar as vazões com base em metodologias apropriadas para preencher essas lacunas nos estudos de hidrologia.

A curva-chave aqui definida foi obtida através do levantamento da seção transversal e, posteriormente, da determinação da velocidade média do escoamento.

Determinação da seção transversal

Com base em metodologia descrita por Porto (2000), para a determinação do perfil da seção transversal é necessário seguir uma sequência operacional, sendo:

- na seção de interesse, estica-se uma corda resistente ou cabo de aço graduado de 1 metro em 1 metro, perpendicular ao curso de água e um pouco acima da superfície líquida, que serve de referência para as medições;
- utiliza-se, como pontos de fixação da corda resistente ou cabo de aço, réguas graduadas ou piquetes;
- determina-se as distâncias verticais $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ em cada marcação (de 1 metro em 1 metro) da corda resistente ou cabo de aço até o leito do curso de água, utilizando como base a régua graduada ou piquete, através do uso da mangueira de nível;
- após determinadas as distâncias verticais entre a corda resistente ou cabo de aço até o leito do curso de água de 1 metro em 1 metro, traçam-se retas que unem estas profundidades, em programa computacional, chegando a uma seção transversal teórica muito próxima da seção transversal real, conforme esquema ilustrado na Figura 2, sempre utilizando a régua graduada ou piquete como referencial;

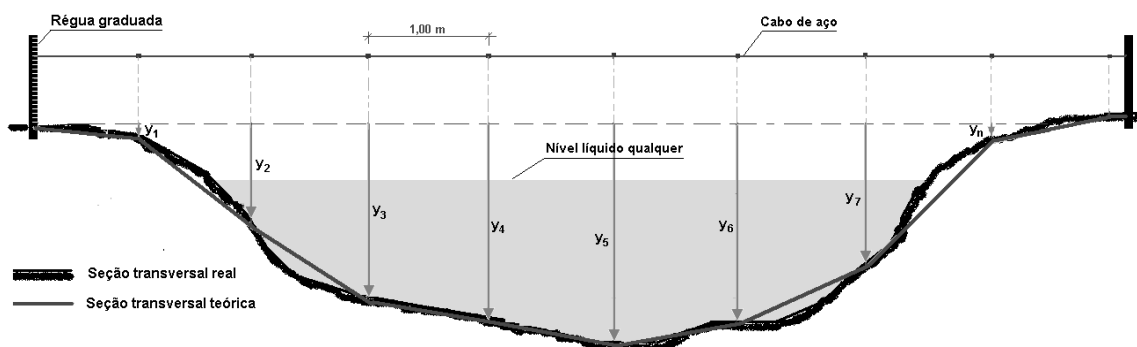


Figura 2: Traçado da seção transversal teórica sobre a seção transversal real do canal.

- caso a seção transversal do canal seja muito irregular, deve-se reduzir o intervalo entre as obtenções das profundidades líquidas para chegar o mais próximo possível da seção transversal real, e;
- a fixação de régua graduada ou piquete é fundamental para a próxima determinação de seção transversal, em uma nova medida, onde apenas com a diferença de nível entre o piquete ou régua graduada e o nível líquido é possível estimar a nova seção transversal molhada. Os resultados foram satisfatórios através da utilização de programa computacional (neste artigo, o *software* AutoCAD). É importante informar que o piquete e régua graduada foram instalados em local firme e seguro, garantindo a sua imobilidade em caso de intempéries, que servirá de referência para medição do nível da água em futuras visitas a campo.

Na escolha deste ponto de estudo existiram algumas preocupações, onde considerou-se local de fácil acesso, seção com forma regular que facilita a operação de levantamento dos pares cota-vazão, trecho retilíneo e com declividade constante, margem e leito não erodíveis que mantêm a geometria da seção transversal inalterada ao

longo do tempo. Evitou-se trabalhos de campo em dias chuvosos onde, dependendo da intensidade de precipitação, a vazão no curso de água altera-se muito ao longo do dia, principalmente pela contribuição difusa do escoamento superficial.

Determinação da velocidade média

Existem diversos métodos para calcular a velocidade (pontual e média) em um canal de pequenas, médias e grandes dimensões. Para tanto pode-se utilizar, dependendo das características hidráulicas e da precisão desejada, o método da solução salina, da condutividade elétrica da água, colorimétrico, flutuadores, molinetes e etc. A seguir será feita uma sucinta descrição da metodologia com o molinete, equipamento este utilizado neste trabalho.

Os molinetes são aparelhos constituídos de palhetas, hélices ou conchas móveis, as quais, impulsionadas pelo líquido, dão um número de rotações proporcional à velocidade da corrente. Trata-se de um molinete fluviométrico, modelo MLN-4, devidamente calibrado em novembro de 2009 pela empresa fornecedora do equipamento, a qual emitiu certificado de calibração, obtendo a equação da velocidade pontual v (m/s) em função da rotação da hélice N (rps), conforme equação (1).

$$v = 0,2772.N + 0,0016 \quad \text{equação (1)}$$

A metodologia correta para a determinação da velocidade média do escoamento através da utilização de molinetes inclui:

- inicialmente determina-se a seção transversal molhada, de acordo com a metodologia descrita anteriormente;
- utilizando a mesma divisão de 1 m em 1 m na corda resistente ou cabo de aço esticado na seção transversal, são fixadas algumas verticais ao longo destas seções transversais do canal, onde são calculadas as velocidades pontuais através do molinete (respeitar os limites da Tabela 1) em pontos específicos desta vertical, e;
- apenas como exemplo, se a profundidade de uma sub-área é de 3,00 m, de acordo com a Tabela 1, fixa-se o molinete e mede-se a velocidade pontual nas profundidades, a partir da superfície: superfície (corresponde à 0,10 m da superfície), 20% da superfície (0,60 m), 40% da superfície (1,20 m), 60% da superfície (1,80 m) e 80% da superfície (2,40 m). A velocidade média para esta profundidade será a média aritmética da velocidade pontual para estes cinco pontos verticais.

Tabela 1: Posição do molinete na vertical em relação à profundidade.

Profundidade (m)	Posição
0,15 a 0,60	0,6.P
0,60 a 1,20	0,2.P e 0,8.P
1,20 a 2,00	0,2.P; 0,6.P e 0,8.P
2,00 a 4,00	S; 0,2.P; 0,4.P; 0,6.P e 0,8.P
Acima de 4,00	S; 0,2.P; 0,4.P; 0,6.P; 0,8.P e F

S (superfície) = corresponde à 0,10 m da superfície; F (Fundo) = corresponde àquela determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.

Em função do nível líquido variável encontrado no rio Jordão, principalmente na época chuvosa, torna-se necessário a utilização de barco ou bote para as medições, porém a equipe de trabalho não tinha esse equipamento e todos os levantamentos foram realizados com o molinete à vau diretamente dentro do curso de água.

Determinação da vazão média

Para a determinação da vazão através da utilização de molinete, uma vez calculada a velocidade média para uma vertical da sub-área, a vazão deste setor é resultante da velocidade média multiplicada por esta sub-área. A

sub-área é aproximada a um retângulo ou a um trapézio, sendo calculada diretamente no programa computacional *AutoCAD*.

A vazão total é a soma das vazões calculadas em todos os setores, conforme esquematizado na Figura 3, onde $Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = v_1 \cdot A_1 + v_2 \cdot A_2 + v_3 \cdot A_3 + v_4 \cdot A_4 + v_5 \cdot A_5 + v_6 \cdot A_6 + v_7 \cdot A_7$.

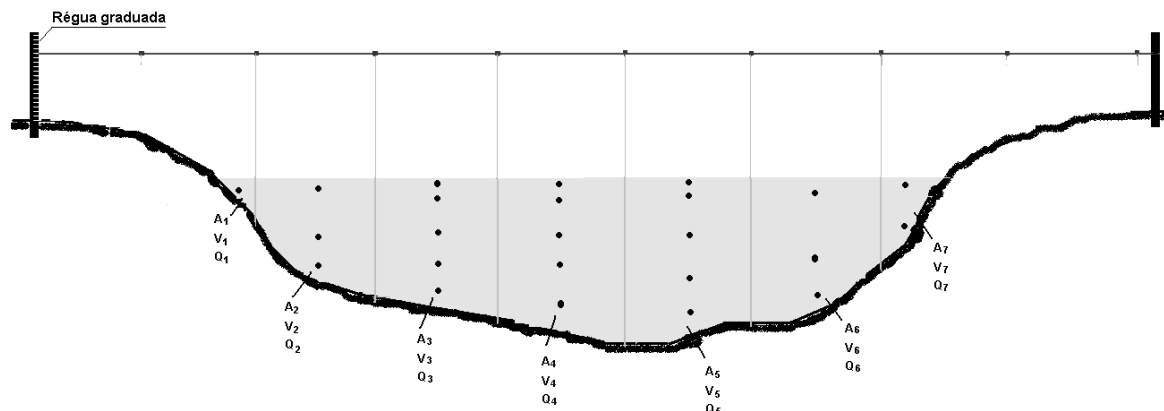


Figura 3: Cálculo da vazão total em um canal através da utilização de molinete, sendo • ponto de fixação do molinete para obtenção de velocidade pontual, onde a quantidade de pontos depende da profundidade da sub-área ou setor, conforme ilustrado na Tabela 1.

Determinação da curva-chave

A curva-chave relaciona a cota do escoamento fluvial (nível da água) com a vazão escoada (descarga), permitindo transformar as leituras de níveis das seções fluviométricas em vazões do escoamento fluvial. Em um estudo de autodepuração de curso de água, a determinação prévia da curva-chave agiliza os trabalhos pois, no dia de coleta de amostras, apenas a verificação do nível do líquido é suficiente para a estimativa da vazão na seção transversal de interesse.

A metodologia para obtenção da curva-chave é alcançada através de medições aleatórias (em dias diferentes), definindo uma relação entre a altura de água com a vazão, de tal forma que com o valor da cota linminimétrica se consiga a vazão correspondente.

O passo inicial para a determinação da curva-chave é a locação das réguas linminimétricas. Para isso, necessita-se conhecer os prováveis níveis mínimos (período de estiagem) e prováveis níveis máximos (período chuvoso) do curso de água. Tais informações podem ser obtidas através de conversas com moradores da região de estudo. A variação no nível líquido é diretamente proporcional à variação da largura de inundação do canal. Tendo o conhecimento prévio destes prováveis limites, é possível locar as réguas linminimétricas em locais apropriados. Tais limites extremos de fixação das réguas estão condicionados à largura máxima do canal obtida em épocas chuvosas. A Figura 4 ilustra um esquema de fixação das réguas para um canal com seção transversal qualquer.

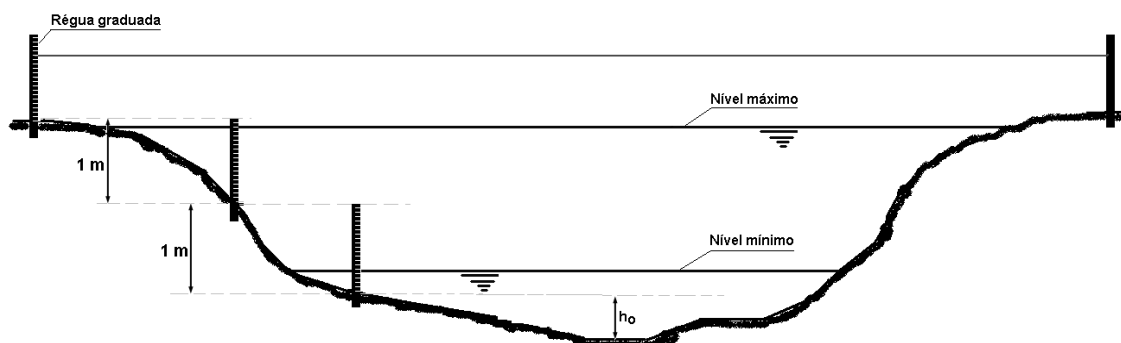


Figura 4: Esquema de fixação das réguas para um canal com seção transversal qualquer.

Os subitens anteriores citam as metodologias necessárias para a determinação da vazão em um dia e, em nível líquido qualquer. Para a obtenção da curva-chave repete-se esta metodologia para vários níveis diferentes, em dias diferentes, até que se tenha um número suficiente de dados altura x vazão para a definição da curva-chave local, sendo necessário englobar épocas chuvosas e de estiagens.

A vazão calculada através de equação matemática deve apresentar o mínimo desvio possível da vazão real, obtida através da equação potencial apresentada em Equação 2, ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

$$Q = a \cdot (h - h_0)^b \quad \text{equação (2)}$$

A cota h é obtida com relação a um referencial (no caso o cabo de aço), h_0 constitui um parâmetro desconhecido, que entende-se como sendo a leitura do nível de água para a vazão nula. Com isso, h_0 pode assumir valor positivo ou negativo, dependendo do zero da escala com relação ao fundo do canal.

A Equação 3 apresenta parâmetros que devem ser ajustados. A partir dos pares Q e h , a equação potencial (equação 2) é linearizada, determinando-se a e b por regressão linear e h_0 na ferramenta *SOLVER* do Excel mantendo-se fixos os valores de a e b obtidos na regressão linear. Para definir os parâmetros, fez-se:

$$\log Q = \log a + b \cdot \log(h - h_0) \quad \text{equação (3)}$$

É válido informar que, mesmo não sendo adotado neste trabalho, existem valores extremos nos períodos de estiagens e chuvosos que não estariam previamente inseridos dentro do intervalo da curva-chave estudado, necessitando a sua extrapolação. A extrapolação para cotas altas pode ser determinada pelo método logarítmico, método gráfico de Stevens e método de Manning.

RESULTADOS

A atividade preliminar a utilização do molinete foi o traçado da seção transversal no local de estudo. A Figura 5 ilustra a seção transversal indicando o local de fixação da régua graduada. O critério para a escolha da seção foi a facilidade de acesso, a proximidade com moradia rural, a percepção da ocorrência de regime de escoamento fluvial ($Fr \leq 1$) e no máximo crítico ($Fr = 1$) para o bom funcionamento do equipamento molinete.

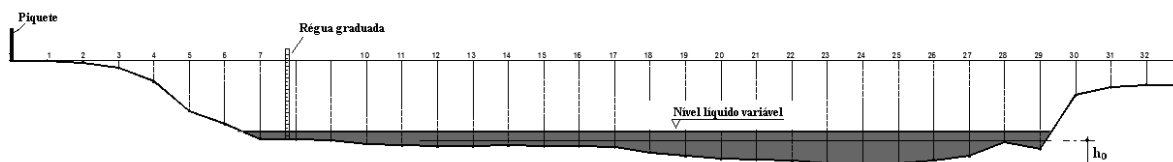


Figura 5: Seção transversal indicando o local de fixação da régua graduada.

Os trabalhos experimentais ocorreram no período de maio de 2010 até abril de 2011, totalizando 6 pontos ($h \times Q$), salientando que pontos adicionais ainda serão obtidos. Os pares de valores $h \times Q$ obtidos ao longo deste período de trabalho estão ilustrados na Tabela 2, sendo quatro medições realizadas em época chuvosa e duas medições em época de estiagem.

Tabela 2: pares de valores $h \times Q$ obtidos ao longo deste período de trabalho

Data	h (m)	$Q_{\text{calculada}}$ (m^3/s)	$\log(h - h_0)$	$\log(Q)$	Q_{estimada} (m^3/s)	$(Q_{\text{cal}} - Q_{\text{est}})^2$
14-05-10	0,22	10,82	0,09	1,03	7,87	8,69
11-06-10	0,20	5,66	0,08	0,75	7,35	2,86
08-12-10	0,33	10,01	0,12	1,00	11,25	1,55
01-02-11	0,42	15,57	0,15	1,19	14,76	0,66
28-02-11	0,48	16,54	0,17	1,22	17,52	0,95
11-04-11	0,54	21,02	0,19	1,32	20,65	0,14
$h_0 = -1,003$	$a = 3,421$		$b = 4,148$	Σ		14,85

A elaboração do gráfico de $\log(h-h_0)$ em função de $\log(Q)$ linearizou os dados viabilizando a obtenção dos coeficientes $a = 3,421$ e $b = 4,148$. Após a fixação destes coeficientes, a ferramenta *Solver* do Excel auxiliou na determinação da variável $h_0 = 1,003$, que coincide como a diferença de cota vertical entre o ponto mais baixo da seção transversal e a base da régua graduada, conforme a Figura 5 ilustra.

O valor de 14,85 para a soma dos quadrados da diferença entre a vazão medida e a estimada (método dos mínimos quadrados), conforme Tabela 2, mostra que maior quantidade de pares $h \times Q$ são necessários para reduzir este valor, resultando em uma curva-chave muito próxima da realidade.

A Figura 6 ilustra a linearização dos dados, mostrando um aceitável ajuste dos dados estimados aos medidos devido ao coeficiente de determinação $r^2 = 0,8265$. Como já dito anteriormente, a aproximação do r^2 a 1,0 será real quando mais dados estiverem disponíveis, principalmente para a época de estiagem.

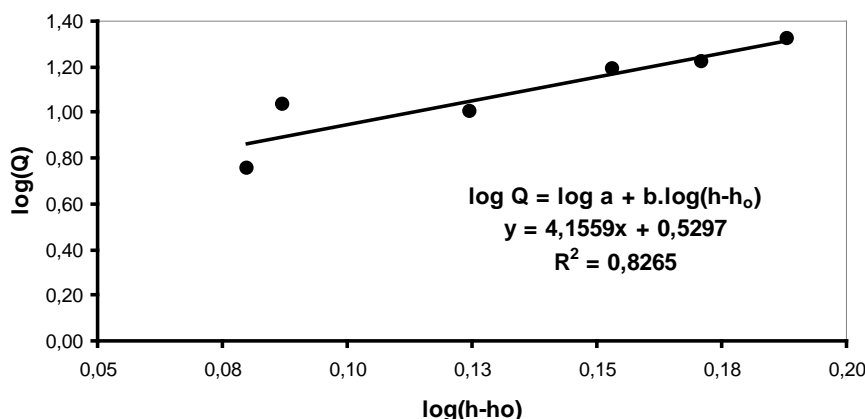


Figura 6: Linearização dos dados.

Os coeficientes a , b e h_0 fornecem a equação potencial ilustrada na Figura 7 e que se caracteriza como a equação da curva-chave para o local de estudo escolhido no rio Jordão. Observa-se que a curva potencial ajusta-se bem aos dados medidos ao longo do ano.

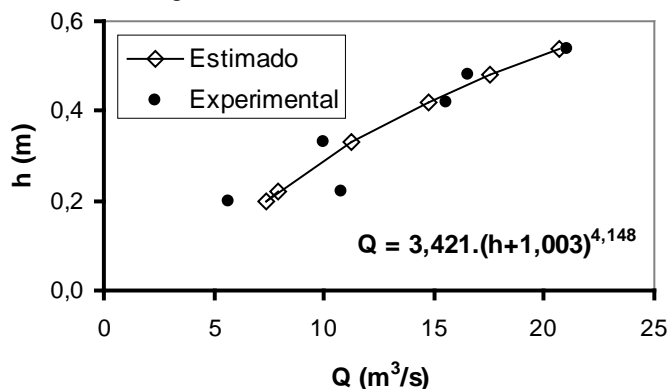


Figura 7: Curva potencial da curva-chave com bom ajuste aos dados medidos para o local de estudo escolhido no rio Jordão.

CONCLUSÕES

A elaboração da curva-chave facilita muito o estudo de autodepuração através de modelos matemáticos de qualidade da água, seja qual for o curso de água, uma vez que apenas com o conhecimento da cota líquida medida na régua graduada já é o suficiente para saber a descarga na seção. É importante salientar que uma curva-chave somente é válida enquanto a seção transversal permanecer inalterada. Daí é que se evidencia a importância da escolha correta desta seção transversal.

Apesar da reduzida quantidade de pares $h \times Q$ alcançados ao longo deste período, a curva potencial apresentou satisfatório ajuste aos dados medidos. É evidente que maior quantidade de pares $h \times Q$, principalmente na época de estiagem, possibilitará maior ajuste, tornando a equação da curva-chave próxima da realidade.

As determinações das velocidades pontuais na época chuvosa geraram enorme dificuldade, em função da elevada profundidade na calha principal do rio além da velocidade acentuada, lembrando que neste trabalho foi necessário entrar no curso de água para fixação do molinete nas diversas posições ao longo da seção transversal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO NETTO, J.M. (1975). Manual de Hidráulica – Volume II – 6ª edição revista e complementada.
2. CORRÊA, I. C. S. Metodologia para o cálculo de vazão de uma seção transversal a um canal fluvial. Instituto de Geociências. UFRGS. Porto Alegre. 2007.
3. TUCCI, C. E. M. Princípios da Hidrometria. Instituto de Pesquisa Hidráulicas. UFRS. Porto Alegre. 2003.
4. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. Volume 7. DESA/UFGM. 2007.