AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE MANNING EM UM CANAL FLUVIAL

Fernando Grison[1]*; *Aline de Almeida Mota*[2]; *Masato Kobiyama*[3]; *Albert Teixeira Cardoso*[4] & *Leonardo Romero Monteiro*[5]

Resumo – O entendimento sobre a resistência ao fluxo d'água em um canal de rio vem sendo tema de muitos estudos científicos relacionados aos recursos hídricos. Uma maneira muito usual de se quantificar essa resistência é pelo coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo estimar o coeficiente de Manning e verificar sua variabilidade com a vazão do rio dos Bugres. O coeficiente de Manning foi estimado pelo método de Barnes e pelo método de Cowan. Foi construída uma relação entre o coeficiente de Manning, estimado pelo método de Barnes, e cota d'água medidos em campo. Com essa relação, valores de coeficiente de Manning foram calculados para uma série anual de cotas, monitorada com intervalo de 10 minutos. A análise dos resultados mostrou que o coeficiente de Manning é extremamente variável com a cota d'água e sua influência na vazão é significante. Valores fixos para o coeficiente de Manning, como sugere o método de Cowan, podem ser inadequados e a tendência nesse caso é que, em média, os valores de vazão sejam superestimados.

Palavras-Chave – Coeficiente de rugosidade de Manning, Método de Barnes, Rio dos Bugres

EVALUATION OF METHODS FOR ESTIMATING MANNING's COEFFICIENT IN A FLUVIAL CHANNEL

Abstract – The understanding of the water flow resistance in a river channel has being the subject of many scientific studies related to water resources. A very common way to quantify this resistance is the roughness coefficient of Manning's formula. The present work aimed to estimate Manning's coefficient and verify its variability with the discharge of Bugres river. It were applied two methods for estimating Manning's coefficient: the Barnes method, and the Cowan's method. An adjustment equation was obtained by relating Manning's coefficient, estimated by the Barnes method, and stage water that were measured in field observations. The adjustment equation was used to calculate the values of Manning's coefficient for an annual stage series monitored at intervals of 10 minutes. The results showed that Manning's coefficient is highly variable with the variation of stage water and its influence on the discharge is significant. Fixed values for Manning's coefficient, as suggested by Cowan's method, may be inappropriate and, on average, the discharge values tend to be overestimated in this case.

Keywords – Manning's roughness coefficient, Barnes method, Bugres river

[1]Professor Assistente I, Engenharia Hídrica, CDTec/UFPel, Caixa Postal 354, Pelotas/RS, 96001-970, Brasil. E-mail: fernando.grison@ufpel.edu.br

[2]Bolsista do CNPq, Doutoranda no Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS. E-mail: alinemota10@gmail.com

[3]Bolsista do CNPq, Professor associado IV, IPH/UFRGS. E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br

[4]Mestre em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFSC, CTC/ENS/LabHidro. E-mail: albertcardoso@hotmail.com

[5]Bolsista do CNPq, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS. E-mail: monteilo@hotmail.com

*Autor Correspondente

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são compreendidos como fontes de valor econômico essencial para a sobrevivência e desenvolvimento dos seres vivos (Kobiyama *et al*., 2008). Por isso, é necessário que haja uma gestão mais eficaz desses recursos, o que requer conhecimento científico. Assim sendo, pode-se dizer que quanto mais se sabe sobre a hidrologia, mais fácil é julgar propostas e alternativas e comparar custos e benefícios para o desenvolvimento econômico e ambiental (Leopold, 1997).

Entre os vários estudos científicos relacionados aos recursos hídricos existem aqueles que buscam o entendimento sobre a resistência ao fluxo d'água em um canal de rio desde a década de 50 (Einstein & Barbarossa, 1952; Leopold & Maddock, 1953). Conforme varia essa resistência, a quantidade de água disponível também varia. Impactos ambientais como a destruição da zona ripária, urbanização, degradação do solo, entre outros, influenciam diretamente na resistência ao fluxo de água em um rio. Por isso, análises de resistência são importantes para a preservação dos canais naturais e consequentemente da qualidade e quantidade de água dos rios.

Uma maneira muito usual de se quantificar a resistência ao fluxo é pelo coeficiente de rugosidade, *n*, da fórmula de Manning. A fórmula de Manning é considerada a equação de resistência mais utilizada em trabalhos tanto técnicos quanto científicos. Por isso, alguns trabalhos (Leopold & Maddock, 1953; Cowan, 1956; Barnes, 1967; Limerinos, 1970; Dingman, 1971; Knighton, 1975; Yen, 1992) têm discutido sobre os valores adotados para *n* e também sobre a variação desses valores. Hydrologic Engineering Center (1986) relatou que os engenheiros mais experientes em trabalhos de campo têm encontrado uma grande variação nos valores de *n*. Além disso, a popularização do uso dessa equação resultou no desenvolvimento de diversos métodos que fornecem estimativas rápidas do valor de *n*. Porém é preciso ter cuidado com estimativas desse coeficiente, pois a rugosidade é o fator que mais se altera com a mudança de vazão (Rhodes, 1977).

Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivo estimar o coeficiente *n* e verificar a sua variabilidade com a vazão na exutória da Bacia Hidrográfica do rio dos Bugres (BHRB) que está localizada no norte do estado de Santa Catarina e inserida em sua totalidade no município de Rio Negrinho. Depois disso, quantificar a influência de *n* no cálculo de quantidade de água no rio dos Bugres.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do rio dos Bugres (BHRB), município de Rio Negrinho – SC, (Figura 1) possui um sistema fluvial de 5ª ordem e sua área é de 66,41 km². Na sua exutória foi instalada estação automática composta por um transdutor de pressão (para o monitoramento do nível d'água), um sensor de turbidez, um *datalogger* (para armazenamento dos dados), além de um painel solar e bateria para fornecerem energia ao sistema (Grison, 2013). O intervalo de monitoramento é de 10 minutos.

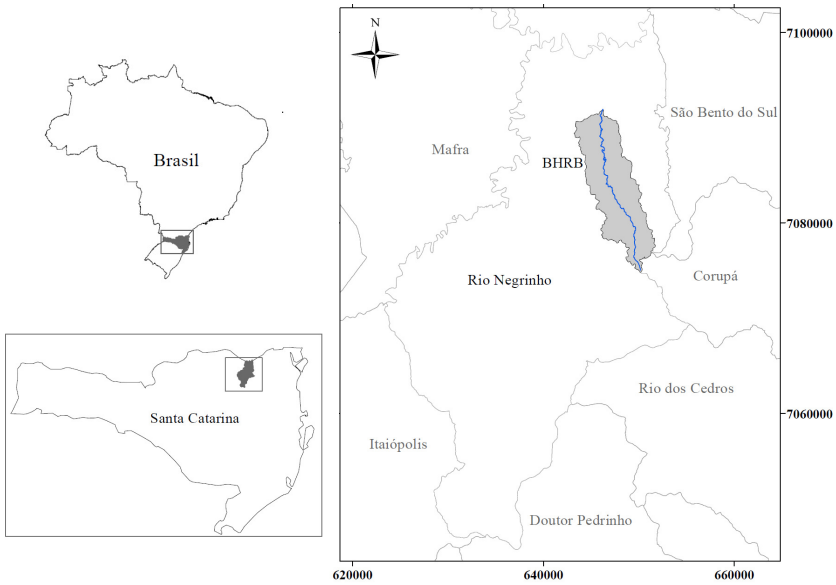

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres

2.2 Aplicação do Método de Barnes

Barnes (1967) modificou o método de Dalrymple & Benson (1966) que estimou a vazão por área e declividade. Naquele método, considera-se que a equação de energia para um trecho de rio natural, definido entre duas seções (seções 1 e 2, uma a montante e outra à jusante, respectivamente) é dada por:

$$\left(h+h_v\right)_1=\left(h+h_v\right)_2+\left(h_f\right)_{1,2}+k\left(\Delta h_v\right)_{1,2} \tag{1}$$

onde h é a elevação da superfície d'água entre duas seções (m); h_v é a carga de energia cinética ($v^2/2g$) (m); h_f é a perda de energia devido ao atrito no trecho (m); Δh_v é a variação da energia cinética (m); e k é um coeficiente com valor zero para trechos contraídos e 0,5 para trechos expandidos.

Com base na Equação (1), a declividade de atrito (S) pode ser calculada:

$$S=\frac{h_f}{L}=\frac{\Delta h+\Delta h_v-k\left(\Delta h_v\right)}{L} \tag{2}$$

onde Δh é variação do nível d'água entre duas seções (m); e L é o comprimento do trecho entre duas seções (m).

O método de Barnes consiste em determinar um valor médio de n para um trecho de rio considerado entre duas ou mais seções transversais. A estimativa pelo método requer medição de vazão, declividade superficial da água e topobatimetria das seções transversais. Com base nas Equações (1) e (2), a estimativa do coeficiente n (s.m$^{-1/3}$) entre varias seções (1, 2, 3, ….M-1, M) de um mesmo trecho de rio é dada por:

$$n=\frac{1}{Q}\cdot\sqrt{\frac{\left(h+h_v\right)_1-\left(h+h_v\right)_M-\left[\left(k\Delta h_v\right)_{1,2}+\left(k\Delta h_v\right)_{2,3}+\cdots+\left(k\Delta h_v\right)_{(M-1),M}\right]}{\frac{L_{1,2}}{Z_1Z_2}+\frac{L_{2,3}}{Z_2Z_3}+\cdots+\frac{L_{(M-1),M}}{Z_{(M-1)}Z_M}}} \tag{3}$$

sendo $Z = A \cdot R^{\frac{2}{3}}$, onde A é a área molhada da seção transversal (m²); e R é o raio hidráulico (m); e Q é a vazão (m^3/s).

Para a determinação de n pelo método de Barnes o presente trabalho realizou as seguintes etapas: (1) medição de vazão líquida para um determinado nível d'água; (2) medição da declividade superficial da água; (3) estimativa dos dados de área molhada e raio hidráulico com dados de levantamento topobatimétrico das seções (para essa etapa foi utilizado o software AutoCAD Map3D 2011); e (4) estimativa de n pela Equação (3).

Com os dados das estimativas de n, foi estabelecida uma relação potencial entre n e a cota d'água, referente à estação fluviométrica da exutória da BHRB. Com essa relação, os valores de n foram calculados para uma série anual de cotas, obtida do monitoramento na exutória da BHRB, do período entre 16/12/2011 à 16/12/2012. Após, os dados de n, juntamente com área e raio hidráulico, correspondentes às cotas monitoradas, foram utilizados nas estimativas de vazão para a série anual de cotas. Para essas estimativas utilizou-se a fórmula de Manning.

A fim de melhor verificar a influência de n, obtido pelo método de Barnes, nas vazões do rio dos Bugres também foram adotados valores fixos de n, para os intervalos entre as cotas em que foram medidas as vazões em campo. Esses intervalos foram denominados de faixas de cotas.

2.3 Aplicação do Método de Cowan

Conforme Cowan (1956), o valor de n é estimado por meio de incrementação:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (4)$$

onde, n_0 é valor básico para um canal retilíneo, uniforme e com superfícies planas, de acordo com o material associado à superfície de contato; n_1 corresponde às irregularidades, tais como erosões, assoreamentos, saliências e depressões na superfície, etc.; n_2 correspondente à frequência de ocorrência de variações de forma, conforme as possibilidades de causar perturbações no fluxo; n_3 correspondente à presença de obstruções, como matacões, troncos, etc.; n_4 é baseado na influência da vegetação no escoamento, segundo o tipo, a densidade e a altura da vegetação; e m_5 corresponde ao grau de meandrização do curso d'água.

Os valores para n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 e m_5 foram obtidos de uma tabela padrão que se encontra em Dingman (2009). Por esse método foi calculado um único valor de n conforme as características da seção transversal da exutória da BHRB (Figura 2) e seu respectivo trecho do canal do rio.

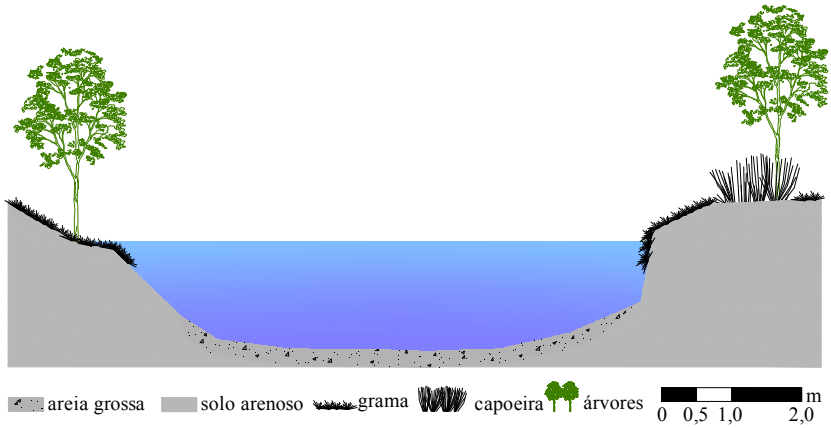

Figura 2 – Características da seção transversal da exutória da BHRB, obtida de observações e medidas de campo

Esse valor foi então utilizado nas estimativas de vazões, por meio da fórmula de Manning, para a série anual de cotas. Observa-se na Figura 2 que o leito é composto basicamente por areia grossa e as margens por solo arenoso com cobertura de grama, capoeira e árvores de pequeno porte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a relação entre *n* estimado pelo método de Barnes e a cota d'água (*Ct*) construída com as medições de campo. O ajuste entre *n* e *Ct* teve R^2 igual a 0,88, o que indica a baixa dispersão dos pontos. Pelo intervalo de confiança observa-se que a maioria dos pontos se situa dentro dos limites desse intervalo. Apenas alguns pontos se afastam desses limites, mas insignificantemente. Portanto, dentro do intervalo de cotas da Figura 3 a equação do ajuste pode ser utilizada com confiabilidade.

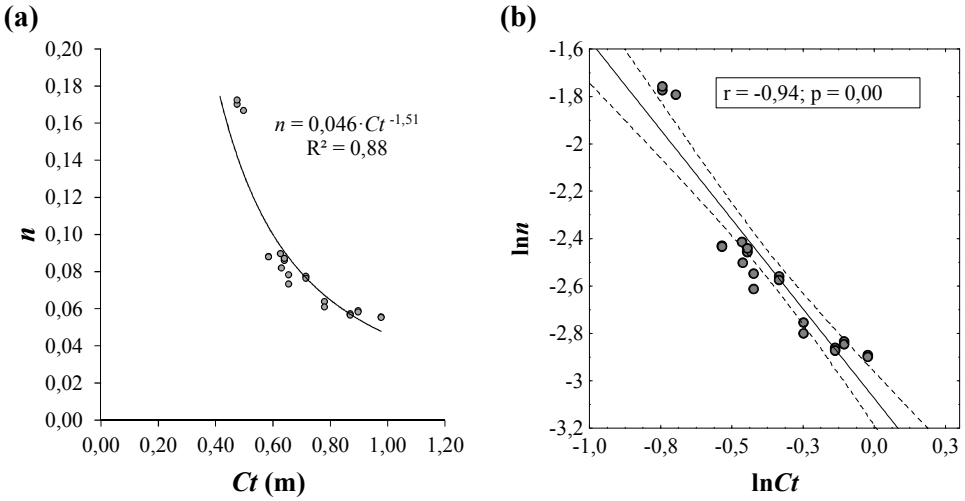

Figura 3 – Relação entre *n* e *Ct* para a exutória da BHRB. (a) Ajuste entre *n* e *Ct*; e (b) Intervalo de confiança de 95% para o ajuste entre *n* e *Ct*

Além da equação de ajuste, também foi analisada a situação em que se adotam valores de *n* para cada intervalo de *Ct* de acordo com as medições em campo. A Tabela 1 mostra esses valores de *n* estimados pelo método de Barnes e seus respectivos intervalos de cotas adotados para as estimativas de vazão por faixas de cotas pela fórmula de Manning.

Tabela 1 – Valores de *n* e cada intervalo de cotas correspondente

n	*Ct* (m)	*n*	*Ct* (m)	*n*	*Ct* (m)
0,1712	0,000 – 0,475	0,0865	0,630 – 0,640	0,0569	0,780 – 0,870
0,1668	0,475 – 0,500	0,0758	0,640 – 0,655	0,0585	0,870 – 0,900
0,0880	0,500 – 0,585	0,0769	0,655 – 0,715	0,0554	0,900 – 1,200
0,0898	0,585 – 0,630	0,0623	0,715 – 0,780		

Com base em observações de campo, como mostra a Figura 2, o valor de *n* pelo método de Cowan foi estimado em 0,045. Aqui, foram adotados os parâmetros: n_0 = 0,02; n_1 = 0,005; n_2 = 0,005; n_3 = 0,01; n_4 = 0,005; e m_5 = 1. Ressalta-se que por mais diferenciados que sejam esses parâmetros, na escolha de outro conjunto de valores, o valor médio não vai ser muito diferente de 0,045.

A Figura 4 mostra os hidrogramas gerados com a série de cotas monitoradas com intervalo amostral de 10 minutos. Nessa figura também foi plotada a variação de vazão (ΔQ(*cowan-barnes*)), calculada pela diferença entre a vazão estimada com *n* igual a 0,045 (Q(*n-cowan*)) e a vazão estimada com *n* variando conforme a equação de ajuste da Figura 3 (Q(*n-barnes*)). As estimativas de vazão com *n* fixo para faixas de cotas, conforme os intervalos da Tabela 1, são identificadas na Figura 4 por Q(*n-faixas*). Algumas falhas observadas nas séries dessa figura foram deixadas intencionalmente, pois são eventos em que a cota ultrapassou 1,2 m. Como não foram feitas medições acima desse valor de cota, optou-se por não estimar vazões nesses casos, o que aumentaria significativamente a incerteza dos resultados.

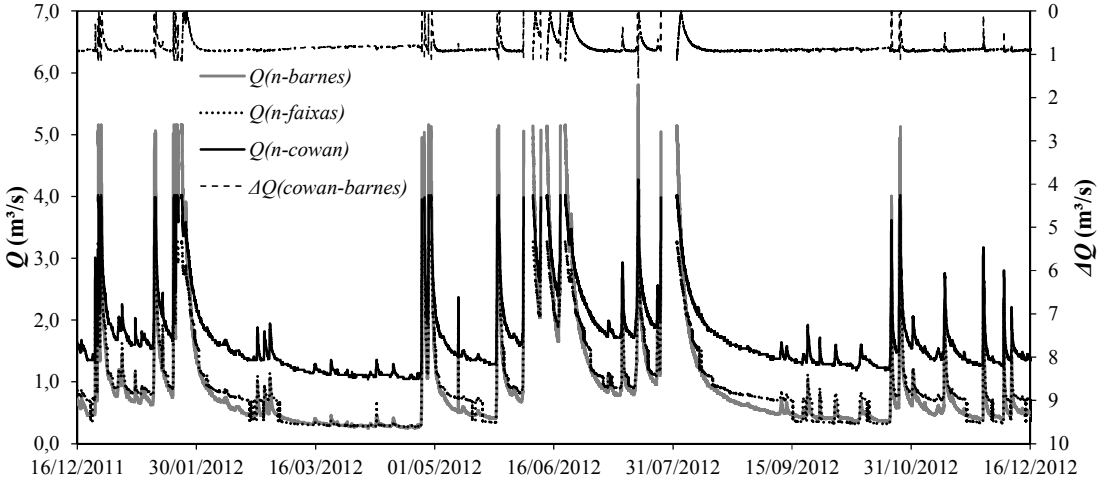

Figura 4 – Hidrogramas para a série anual de cotas da exutória da BHRB

Os valores mínimo, médio e máximo de ΔQ (cowan-barnes) foram 0,186 m³/s, 0,892 m³/s, e 1,033 m³/s, respectivamente. Portanto, pode-se dizer que para a série de vazões calculadas pela fórmula de Manning com *n* fixo, obtido pelo método de Cowan, ocorre uma superestimativa de valores. Da mesma forma, no hidrograma das vazões estimadas com *n* fixo para faixas de cotas há uma tendência de superestimativa de valores, principalmente nas menores vazões. Entretanto, em menor intensidade do que com um único valor para *n*. Isso mostra que quanto menos variável for o valor de *n* na fórmula de Manning mais superestimadas ficam as vazões.

Se for considerado o fato de que a fórmula de Manning com valor fixo para *n* é muito utilizada em simulações hidráulicas de canais, para prever, por exemplo, a capacidade de água de um possível reservatório de abastecimento, pode-se dizer que é preciso ter muito cuidado na escolha de *n*. Por mais representativo que seja um valor de *n* para uma determinada seção transversal de rio, ele nunca pode ser considerado como único. Sua variação com a cota d'água e a influência na vazão são significantes. Além disso, muitos fatores, como a modificação da forma da seção transversal, do material do leito e das margens, entre outros, influenciam diretamente no valor de *n*.

A Figura 5 apresenta o hidrograma das vazões estimadas com *n* variável pela equação de ajuste da Figura 3, juntamente com a variação dos valores de *n*. Observa-se na Figura 5 a alta sensibilidade de *n*. Uma mínima variação de *n* ocasiona efeito expressivo na vazão. Além disso, nota-se a coerência do hidrograma que com o aumento de *n* a vazão diminui e ao contrário a vazão aumenta.

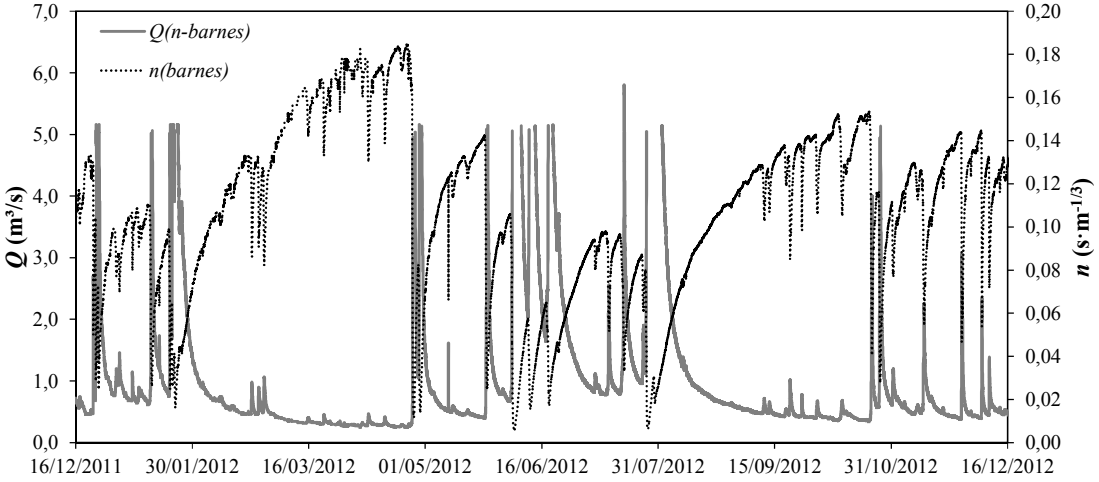

Figura 5 – Hidrograma das vazões com n variável com a cota e a variação de *n*

Na Figura 6 se encontra o hidrograma das vazões calculadas com *n* fixo para faixas de cotas, juntamente com a variação dos valores de *n* conforme a Tabela 1.

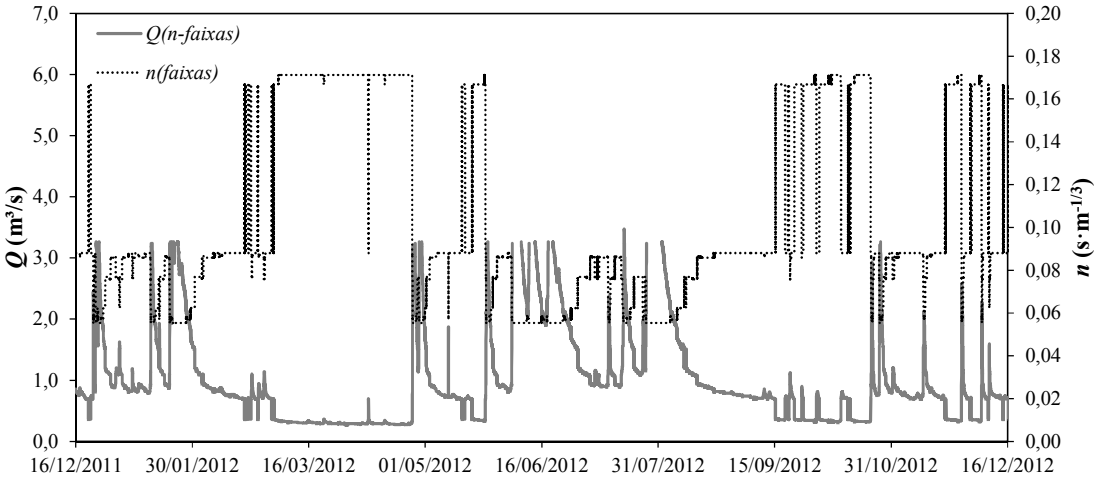

Figura 6 – Hidrograma das vazões com *n* fixo por faixa de cotas

Da mesma forma, na Figura 6 observa-se a sensibilidade de *n*, porém menor em relação ao que mostra a Figura 5. O que já era esperado pelo fato de *n* ser fixo para determinadas faixas de cotas. Nota-se que o comportamento da vazão para alguns intervalos de tempo ao longo da série tende a ser mais constante. Mesmo assim, em termos de quantidade de vazão, os valores encontrados com *n* fixo para faixas de cotas se aproximam mais das vazões com *n* variável, do que os valores de vazão encontrados que com um único valor de *n* para todas as cotas da seção transversal.

4. CONCLUSÕES

As estimativas de vazão por meio da fórmula de Manning para o rio dos Bugres mostraram que os valores de vazão são altamente influenciados por *n*. Por isso é muito importante que esse coeficiente seja o mais representativo possível. Principalmente, se o objetivo das estimativas de vazão estiver relacionado com a quantidade de vazão que o rio pode fornecer.

O método de Barnes (1967) considera uma variação de energia da água para um trecho de rio, obtida por medições de vazão, e atividades topobatimétricas de seção no canal. Justamente por isso, conclui-se que o método de Barnes para o cálculo de *n* é confiável. Por outro lado, a estimativa de vazões com a fórmula de Manning com valor fixo para *n*, por exemplo, método de Cowan (1956) é inadequada e a tendência neste tipo de método é que em média os valores sejam superestimados.

REFERÊNCIAS

BARNES, H. H. Jr. (1967). Roughness characteristics of natural channels. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, (Water Supply Paper, n.1849).

COWAN, W.L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering* 37, pp. 473 – 475.

DALRYMPLE, T.; BENSON, M. A. (1966). Measurement of peak discharge by the slope-area method. *U.S. Geol. Survey Techniques Water-Resources*, Inv.,book 3, chap. A2 (in press).

DINGMAN, S.L. (1971). Hydrology of the Glenn Creek watershed, Tanana River drainage, central Alaska. *U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, Research Report, n. 297, 117p.

DINGMAN, S.L. (1984). *Fluvial Hydrology*. W.H. Freeman, New York, 384p.

EINSTEIN, H. A.; BARBAROSSA, N. L. (1952). River channel roughness. *Am. Soc. Civil Engineers Trans*, v.117, pp. 1121 – 1132.

GRISON, F. (2013). *Estudo da geometria hidráulica do rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho – SC*. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (1986). *Accuracy of computed water surface profiles*. Research Document 26, U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

KNIGHTON, A. D. (1975). Variations in at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science*, n.275, p.186-218.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; CORSEUIL, C. W. (2008). *Recursos hídricos e saneamento*. Ed. Organic Trading, Curitiba, 160p.

LEOPOLD, L. B. (1994). *A View of the River*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 290p.

LEOPOLD, L. B. (1997). *Water, Rivers and Creeks*. University Science Books, Sausalito-CA, 208p.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United States Geological Survey*, Prof. Paper, n.252, 56p., 1953.

LIMERINOS, J. T. (1970). Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *Geological Survey Water-Supply*, Paper 1898-B.

RHODES, D.D. (1977). The b-f-m diagram graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science*, v.277, pp. 73 – 42.

YEN, B.C. (1992). *Channel flow resistance: centennial of Manning's formula*. Water Resources Publications, Littleton, CO., 453p.