

Análise de Incertezas de Observações Hidrológicas e sua Influência na Modelagem de Pequenas Bacias Urbanas

Guilherme de Lima, Rodrigo Suzes Boldrin, Eduardo Mario Mendiondo, Frederico Fábio Mauad

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP

guilima@sc.usp.br, rboldrin@hotmail.com, emm@sc.usp.br, mauadffm@sc.usp.br

Alfredo Akira Ohnuma Junior

Ciências da Engenharia Ambiental PPG-SEA, SHS/EESC/USP

aaoj@sc.usp.br

Recebido: 06/10/05 – revisado: 31/01/06 – aceito: 18/01/07

RESUMO

As simulações computacionais são atualmente indispensáveis para auxiliar a tomada de decisões em relação aos recursos hídricos, no entanto ainda são grandes as incertezas relacionadas às previsões hidrológicas, principalmente em bacias hidrográficas com poucos dados. O presente trabalho apresenta uma análise das incertezas do processo hidrométrico de medições de vazão e sua influência na modelagem de pequenas bacias urbanas. Para a avaliação das incertezas utiliza-se uma análise de primeira ordem para a equação de Manning. A metodologia apresentada é aplicada a um estudo de caso na parte alta da bacia do Córrego do Gregório, localizado no município de São Carlos, Estado de São Paulo. Os resultados mostram que um erro de $\pm 5\%$ (em 1 minuto) na leitura do nível d'água causa um desvio de aproximadamente $\pm 15\%$ na estimativa da vazão. Através deste estudo é possível verificar a importância da inclusão definitiva da análise de incertezas à modelagem hidrológica e a necessidade de desenvolvimento de novas metodologias e abordagens que possam reduzir as incertezas das previsões.

Palavras-chave: análise de incertezas, medição de vazões, PUB.

INTRODUÇÃO

O adequado planejamento e gerenciamento dos sistemas hídricos se tornaram extremamente importantes para a sociedade atual. Para a realização dessas atividades são necessárias metodologias que possam realizar a previsão espacial e temporal dos sistemas hidrológicos. Nos últimos 30 anos os hidrólogos têm procurado desenvolver ferramentas (e.g. equações, modelos matemáticos e códigos computacionais) mais realistas e confiáveis na representação dos processos hidrológicos, que permitam a tomada de decisão em relação aos sistemas hídricos. Geralmente as ferramentas tradicionais de previsão (i.e. hidrograma unitário, curvas de freqüência e duração de vazão, e outras) empregadas hoje em dia têm como base as informações hidrológicas e são estimadas a partir dessas informações na escala da bacia hidrográfica. Segundo Sivapalan et. al. (2003) a aplicação dessas ferramentas de previsão em outras bacias é baseada nas seguintes premissas: 1) o passado é um guia aceitável para o futuro e 2) dados de qualquer bacia e modelos derivados disso são guias

úteis para se estimar as respostas hidrológicas em outra bacia. Porém, os resultados dos modelos mais sofisticados ainda são prejudicados por essas afirmações, especialmente quando estes são desenvolvidos e/ou parametrizados através de calibração com dados históricos de bacias bem documentadas. Devido a fatores como a não linearidade na resposta das bacias, alterações no clima e no solo, e a grande heterogeneidade espacial e temporal do clima e das propriedades do solo, a extração de informação ou conhecimento de bacias com dados, para bacias sem dados, permanece repleta de dificuldades e incertezas, especialmente devido ao conhecimento limitado do ciclo hidrológico. Maiores dificuldades são, ainda, verificadas em regiões onde pouco ou nenhum dado está disponível. Conseqüentemente são grandes as incertezas das atuais previsões hidrológicas.

Na tentativa de se avançar no conhecimento do ciclo hidrológico e restringir ao máximo as incertezas na previsão, foi criado o programa PUB – Predictions in Ungauged Basins (2003-2012). O PUB foi desenvolvido pela comunidade científica interna-

cional através da IAHS – International Association of Hydrological Sciences, para se tornar a base do gerenciamento eco-sustentável dos recursos hídricos no mundo todo. O PUB tem como tema central a estimativa e consequente redução da incerteza da previsão hidrológica. Os principais objetivos científicos do PUB são: 1) Desenvolver a habilidade dos hidrólogos para prever, com confiança, os fluxos de água e seus elementos em bacias sem dados, sempre com a quantificação das incertezas dessas previsões; 2) Incentivar o conhecimento e o entendimento climático e controle da cobertura vegetal nos processos hidrológicos que ocorrem em todas as escalas para restringir as incertezas nas previsões hidrológicas; 3) Demonstrar o valor do dado para as previsões hidrológicas e fornecer uma base racional para aquisições futuras de dados, incluindo origens alternativas de informações, quantificando as ligações entre o dado e a incerteza da previsão; 4) Avançar nos fundamentos científicos sobre hidrologia e fornecer bases científicas para o gerenciamento eco-sustentável da bacia hidrográfica; 5) Incentivar a formação de recursos humanos no desenvolvimento de tecnologias e conhecimento científico apropriado para áreas e comunidades onde isso é necessário.

Para fazer previsões sobre qualquer resposta de uma bacia hidrográfica um sistema geral de previsão hidrológica precisa conter três componentes: o modelo, as informações climáticas (se necessário para o modelo) e os parâmetros, os quais não são conhecidos por completo devido suas heterogeneidades espaciais e temporais. Dentro desse contexto são citados no PUB três tipos de incertezas: (a) incertezas na descrição dos processos do modelo adotado, (b) incertezas das informações climáticas e (c) incertezas nos parâmetros do modelo.

Nos últimos vinte anos as pesquisas relacionadas com a análise de incertezas têm recebido crescente atenção. No entanto, esse tipo de análise não é praticada regularmente no processo de modelagem hidráulica ou hidrológica, apesar de sua vital importância. Pappenberg e Beven (2006) afirmam que a análise de incertezas deveria ser parte intrínseca e usual de qualquer exercício de modelagem. Os autores apresentam e contestam os argumentos mais comuns contrários a realização da análise de incertezas e sugerem um conjunto de práticas para transformar a estimativa das incertezas em rotina para as áreas de hidrologia e hidráulica.

A literatura internacional apresenta várias pesquisas relacionadas com a análise dos diversos tipos de incertezas. Lee e Mays (1986), por exemplo, estudaram as incertezas hidráulicas resultantes da falta de capacidade dos modelos matemáticos e/ou

equações empíricas de descrever completamente o processo físico de escoamento durante inundações. A incerteza hidráulica foi avaliada através da análise de primeira ordem da equação de Manning. Nesse sentido, também merece destaque o trabalho de Kuczera e Williams (1992) que avaliaram como as incertezas nas estimativas da distribuição temporal e espacial das precipitações influenciam na calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão adotado e, consequentemente, na previsão das vazões. Ainda dentro desse contexto, Kuczera e Parent (1998) avaliaram dois tipos de metodologias diferentes baseadas no método de Monte Carlo para análise de incertezas de parâmetros nas previsões de modelos conceituais.

Em âmbito nacional poucos estudos estão relacionados com a análise de incertezas. Esse artigo tem como principal objetivo analisar a influência das incertezas nas medições de vazão e suas consequências para as simulações computacionais de bacias urbanas. Com isso pretende-se destacar a importância de se considerar a análise de incertezas como parte imprescindível da modelagem hidrológica e alertar para a necessidade de avanço no conhecimento dos processos hidrológicos e desenvolvimento de uma nova geração de modelos e técnicas que reduzam ao máximo o grau de incerteza e que possam ser usados em locais com poucos dados.

METODOLOGIA

A seguir expõe-se a metodologia utilizada nesse estudo. Inicialmente apresentam-se as hipóteses e equações para a realização da análise de incertezas e em seguida descreve-se o processo utilizado para a aplicação no sistema hídrico estudado.

Análise de Incertezas

De acordo com Chow et. al. (1988) as incertezas hidrológicas podem ser separadas em três categorias: incertezas naturais, as quais resultam da variabilidade aleatória dos fenômenos hidrológicos; incertezas do modelo, que são referentes as aproximações e hipóteses assumidas para representar os fenômenos físicos e incertezas nos parâmetros, as quais originam-se da falta de conhecimento dos coeficientes das equações (Figura 1).

Existem diversas metodologias para a avaliação de incertezas, como o Princípio de Máxima Incerteza (Klir, 1989), os métodos do tipo Monte Carlo e os métodos analíticos e numéricos a partir

da expansão de séries de Taylor. Tais métodos baseiam-se na estimativa dos intervalos de confiança de uma variável dependente a partir de variáveis independentes. Uma vez que se considera o modelo adequado para a representação de um processo físico essa estimativa depende essencialmente dos valores dos parâmetros.

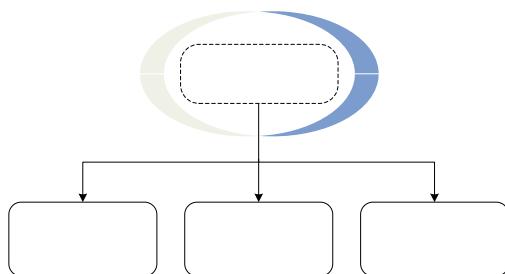


Figura 1 – Classificação de Incertezas Hidrológicas

A análise de primeira ordem das incertezas é um procedimento para determinar a variabilidade esperada de uma variável dependente calculada como função de uma ou mais variáveis independentes. Segundo Lee e Mays (1986), a análise de primeira ordem possibilita uma boa maneira para a estimativa das incertezas no cálculo de vazões.

Supondo que z seja expresso como função de x , temos:

$$z = f(x) \quad (1)$$

Onde existem duas possíveis fontes de erro: a função f pode estar incorreta e não representa adequadamente um determinado processo físico ou a fonte de erro está relacionada ao valor de x . Admitindo-se que não há erro no modelo e que um valor \bar{x} é selecionado temos:

$$\bar{z} = f(\bar{x}) \quad (2)$$

Se o verdadeiro valor de x é diferente de \bar{x} o efeito dessa diferença em z pode ser estimado utilizando-se a expansão da função $f(x)$ como uma série de Taylor para $x = \bar{x}$

$$z = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x}) + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2}(\bar{x}) + \dots \quad (3)$$

Considerando apenas os termos de primeira ordem a expressão para o erro em z resulta em:

$$z - \bar{z} = \frac{df}{dx}(\bar{x})(x - \bar{x}) \quad (4)$$

A variância de z como função da variância de x é dada por:

$$s_z^2 = \left(\frac{df}{dx} \right)^2 s_x^2 \quad (5)$$

O valor de s_z representa o erro padrão na estimativa de z .

Da mesma forma se z é dependente de várias variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, pode ser demonstrado que:

$$s_z^2 = \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{df}{dx_2} \right)^2 s_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_n} \right)^2 s_{x_n}^2 \quad (6)$$

O modelo hidráulico simplificado que representa o escoamento em canais em função da rugosidade, da geometria e da declividade da linha de energia pode ser expresso pela equação de Manning.

$$Q = C \cdot K \cdot Sf^{1/2} \quad (7)$$

Ou:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot A \cdot Sf^{1/2} \quad (7b)$$

Cabe destacar que Chow (1959) considera que na aplicação da fórmula de Manning, a maior dificuldade está na determinação do coeficiente de rugosidade que é altamente variável e depende de um grande número de fatores como: rugosidade da superfície do perímetro molhado, irregularidade do canal, erosão e decomposição, obstruções do fluxo, tamanho e forma do canal, valores de Q e x , vazão e mudanças sazonais. Para Lee e Mays (1986), o coeficiente de rugosidade e a declividade são responsáveis por 95% das incertezas hidráulicas.

Aplicando-se uma aproximação da série de Taylor de primeira ordem na equação (7), obtém-se a variância numa determinada medição de vazão. Assumindo o valor observado como valor médio da distribuição de erros da medição, obtém-se uma estimativa do coeficiente de variação de uma determinada medida de vazão.

INCERTEZA
HIDROLÓGICA

$$CV_M(Qi) = VAR_M(Qi)^{1/2} \div (\bar{Qi} = Q) \quad (8)$$

Para cada observação o coeficiente de variação depende dos coeficientes de variação da rugosidade $CV(C)$, da declividade da linha de energia $CV(Sf)$, do fator geométrico $CV(K)$ e de suas covariâncias $COV(C,Sf)$, $COV(C,K)$ e $COV(Sf,K)$.

Knight (1989), Lee e Mays (1986) e Herschy (1985) apresentam expressões para a variância sem considerar a correlação entre as variáveis do modelo da equação 7. Segundo Mendiondo (2001) a expressão geral do coeficiente de variação da vazão, considerando os termos de variância e covariância pode ser expressa como:

$$[CV_M(Qi)]^2 = VAR_M(Qi) + COV_M(Qi) \quad (9)$$

Sendo:

$$VAR_M(Qi) = [CV(C)i]^2 + \frac{1}{4}[CV(Sf)i]^2 + [CV(K)i]^2 \quad (10)$$

$$COV_M(Qi) = 2 \cdot \left[\begin{array}{l} CV(C)i \cdot CV(K)i + \\ + \frac{1}{2}CV(C)i \cdot CV(Sf)i + \\ + \frac{1}{2}CV(Sf)i \cdot CV(K)i \end{array} \right] \quad (11)$$

$$CV(C)i = \left[(\Delta hi \cdot hi^{-1} + 1)^{\frac{1}{b}} - 1 \right] \quad (12)$$

$$CV(Sf)i = Vci^{-1}(\Delta hi) \cdot (\Delta hi)^{-1} \cdot (1 - \frac{4}{9}Fri^2) \quad (13)$$

$$CV(K)i = (\Delta Ki) \cdot Ki^{-1} \quad (14)$$

em que Δhi é a cota média da água durante a i -ésima medição de vazão, Fri é o número de Froude, b o expoente da equação que representa a curva-chave $hi = (Qi/a)^{(1/b)}$ e Vci a celeridade da onda.

A equação (9) incorpora a decomposição da variância do modelo de vazão incluindo as correlações das variáveis do modelo da equação (7).

Estudo de caso para a Bacia do Córrego do Gregório em São Carlos - SP

Área de Estudo

Assim como em muitas cidades brasileiras, nos últimos anos tem-se observado em São Carlos, S.P. uma maior ocorrência de eventos de enchentes,

devido principalmente à falta de planejamento e gerenciamento dos sistemas hídricos e do uso do solo.

Frequentemente, a região estudada sofre os impactos decorrentes de inundações urbanas. Por exemplo, são informadas a ocorrência de 4 a 5 eventos por ano com inundações que afetam o trânsito e/ou estabelecimentos comerciais. Righeto (2005) menciona que anualmente mais de 40 estabelecimentos comerciais são afetados por inundações, com perdas estimadas em até R\$ 500.000 por inundaçāo, com uma área potencial inundável de 5 hectares aproximadamente. Esses valores são atribuídos somente para uma bacia da ordem de 13 km², situada imediatamente a jusante do local deste estudo. Segundo Mendes (2005), o tempo de retorno médio destas inundações é estimado em 0,65 eventos por ano para um desvio padrão de 0,84, tendo como base dados históricos de ocorrência entre 1940 e 2004.

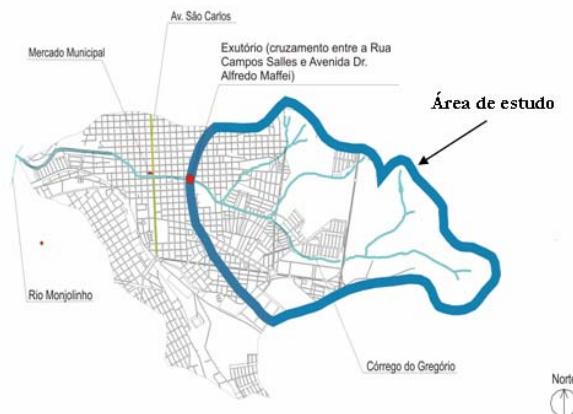


Figura 2 – Bacia hidrográfica do Córrego do Gregório (CDCC – USP/SC, 2002).

A micro-bacia hidrográfica do Córrego do Gregório com 15,6 km² (Figura 2) é uma das mais importantes da cidade, uma vez que ocupa uma parcela considerável no centro urbano do município e também por ser uma das mais afetadas pelos problemas das enchentes.

A região estudada (parte delimitada e em destaque na figura 02) compreende a parte alta do Córrego do Gregório e tem uma área de aproximadamente 10 km². Um dos principais motivos para se estudar a porção alta dessa bacia hidrográfica é que a maior parte dessa região ainda não se encontra urbanizada, porém existe uma forte tendência da

urbanização crescer nessa direção. Se isso acontecer, consequentemente os problemas das enchentes irão aumentar na região central da cidade.

Atualmente estão sendo realizados diversos estudos para se atenuar os efeitos da enchente no centro de São Carlos. Tais pesquisas têm como principal ferramenta a simulação computacional. Dessa forma verificou-se a necessidade da inclusão da análise das incertezas relacionadas a modelagem hidrológica. Na aplicação da metodologia, nesse estudo de caso, enfatiza-se a análise de incerteza nas observações hidrológicas verificando suas influências para a simulação da bacia hidrográfica.

Os trabalhos de drenagem nas bacias urbanas da cidade de São Carlos encontram-se baseados quase que exclusivamente em estimativas de modelos hidrológicos e de modelação matemática a partir de dados extraídos de campo (NIBH, 2004). Porém, verifica-se que são grandes as diferenças nos resultados dos trabalhos realizados até agora. Essas diferenças podem ter como causa diversos motivos, entre eles o uso de softwares diferentes, portanto hipóteses diferentes, e o fato de a validação ser muito difícil de ser obtida como demonstrado em Lei e Schilling (1998). Pretende-se aqui verificar e analisar apenas uma das possíveis causas: as incertezas nas observações de campo e suas consequências para as simulações hidrológicas. Para isso o trabalho foi dividido em três etapas: determinação da curva-chave, análise de primeira ordem da equação de Manning para as curvas-chave escolhidas e estudo das influências das incertezas no cálculo das vazões e na simulação de bacias urbanas.

1^a. Etapa: Determinação da Curva Nível – Descarga

No procedimento de modelagem da bacia, uma das primeiras fontes de incertezas é a elaboração e utilização da curva-chave ou curva de descarga da seção a ser simulada.

O regime hidrológico de uma dada bacia hidrográfica é definido pela evolução temporal das descargas em uma determinada seção, a qual resulta da ação integrada e interdependente de todos os processos hidrológicos a montante desse local.

Para se estimar as disponibilidades e as demandas ao longo do tempo, além de determinar intervenções, principalmente para controle de enchentes, é necessário o prévio conhecimento do fluxo ou vazão do rio. De acordo com Brusa e Clarke (1999) a utilização de métodos diretos para de-

terminar a vazão numa seção fluvial é uma tarefa demorada e que envolve custos elevados.

Portanto, a alternativa é realizar a estimativa da descarga de maneira indireta. Nesse caso realiza-se a medição de vazão através de medidas dos níveis d'água e posteriormente converte-se esses níveis em séries de vazões usando uma relação cota-descarga ou curva-chave. Essa relação, na maioria das vezes, é representada por uma equação do tipo $Q = C(h+a)^b$, onde o termo Q é a vazão, h é o nível de água, o termo a é a diferença entre o zero da régua e o nível que representa a descarga nula e os termos C e b são parâmetros referentes ao escoamento (Jaccon e Cudo, 1989 e Mosley e McKerchar 1993).

Nas medições de vazão, para posterior levantamento da curva-chave da seção, verifica-se que as enchentes são muito rápidas e com grandes variações de velocidade em curto espaço de tempo, acarretando erros significativos nos resultados. A esse respeito, Tucci (2002) destaca que na realização de medições de vazões em campo existem dois termos que podem gerar incertezas: a descarga e a cota. A descarga apresenta uma precisão variável segundo o método de medição utilizado, as condições de escoamento e a precisão dos operadores. O termo cota refere-se à cota inicial, final e intermediária, e se o nível variou significativamente durante a medição.

É notável normalmente, a grande variação dos níveis d'água durante as cheias, dificultando a definição da cota média de referência das medições realizadas. A minimização da incerteza das vazões medidas em áreas urbanas deve ser obtida em situações de escoamentos hidráulicamente definidos, ou seja, deve-se buscar canais prismáticos e sem singularidades para as medições de vazão.

Nesse trabalho as curvas nível-descarga escolhidas para a análise das incertezas, foram determinadas de diversas maneiras. Para isso foi escolhida uma seção de controle conhecida como PCD2 onde existe um linígrafo (Figura 3). As equações resultantes foram comparadas ou ajustadas utilizando valores de vazão medidos em campo e apresentados no trabalho de Silva (2003). O coeficiente de determinação R^2 indica a porcentagem da variância do ajuste.

Como estimativa inicial, a curva chave foi determinada utilizando o modelo de onda cinemática através da fórmula de Manning. Conhecendo-se a geometria do canal, a rugosidade foi estimada através da análise de fotos, visitas ao local e da experiência dos profissionais envolvidos. Desse processo resultou a seguinte relação:

$$Q = 6.998 \cdot h^{2.7053} \quad (R^2=0,96) \quad (15)$$

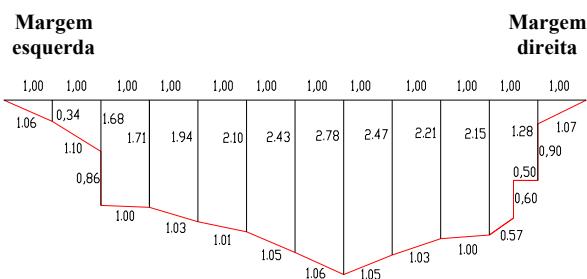


Figura 3 – Foto e batimetria da Seção de controle PCD2 (Dia 14/07/2005, Sentido da foto: de montante para jusante, medidas em metros) Boldrin, 2005.

Silva (2003) determinou a relação cota x vazão através de 6 medições de vazão, utilizando o método velocidade-área (Herschy, 1985). A equação (16) foi encontrada utilizando o método de regressão linear disponível no software Microsoft Excel para uma equação do tipo $y = C(x)^b$, onde y representa a vazão Q e x o nível corrigido ($h=h'-0.39$, com h em metros). Desse estudo obteve-se a seguinte equação:

$$Q = 8.753 \cdot h^{2.7204} \quad (R^2=0,97) \quad (16)$$

Adotando-se os mesmos dados de Silva (2003) e utilizando-se o método de regressão não linear disponível no software Mathematica4, obteve-se um ajuste melhor da curva aos dados obtidos em campo, o que resultou na seguinte equação:

$$Q = 8.278 \cdot h^{2.2517} \quad (R^2=0,99) \quad (17)$$

O gráfico da Figura 3 mostra a comparação entre as diferentes fórmulas encontradas. Merece destaque o fato de que a equação (15), determinada de maneira independente e por um processo perceptivo, apresenta-se útil para estimativas iniciais de vazão até o último valor cota-vazão medido em campo. Muitas vezes quando não existem dados suficientes de medição de vazão é necessário extrapolar as curvas-chave para se estimar as vazões de pico e esse procedimento pode ser a causa de diferenças significativas nos resultados finais (Brusa e Clarke, 1999).

2ª. Etapa: Análise de primeira ordem da equação de Manning: Vazão como variável dependente.

Adotando-se as equações (16) e (17), as quais apresentam os melhores valores de R^2 , para representar a relação nível-descarga da seção estudada, pode-se então realizar uma análise de incertezas nas observações de campo a partir da equação (9).

A hipótese principal assumida para essa análise é que existe uma imprecisão no registro dos níveis devido as variações do escoamento.

Portanto, pretende-se demonstrar quais são as incertezas relacionadas a esse erro. Os parâmetros utilizados foram: variação de $\pm 5\%$ no nível, rugosidade $n = 0.030$, declividade 1.12%, diferença de 1 minuto entre as leituras de nível do linígrafo e intervalos de 10 em 10 centímetros na lâmina d'água.

De acordo com os resultados um erro de $\pm 5\%$ (em 1 minuto) na leitura do nível causa um desvio médio de aproximadamente $\pm 15\%$ na estimativa da vazão. O gráfico da figura 04 apresenta os intervalos de variação da vazão para a curva-chave da equação (17).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores do coeficiente de variação da rugosidade $CV(C)$, da geometria $CV(K)$ e da declividade $CV(S_f)$ bem como a variância, a covariância, o coeficiente de variação para a relação cota x descarga da equação (17).

Pode-se verificar que com o aumento do nível de água o $CV(C)$ não se altera, o que era esperado, já que foi estabelecida uma variação de 5% em todos os pontos. Analisando os resultados verifica-se que, nesse caso específico, o fator geométrico é o maior responsável pela variação da vazão, seguido pela rugosidade. O fator relativo à declividade não teve muita influência na variação da vazão. Com o aumento do nível de água há uma diminuição do coeficiente geométrico, um aumento do coeficiente

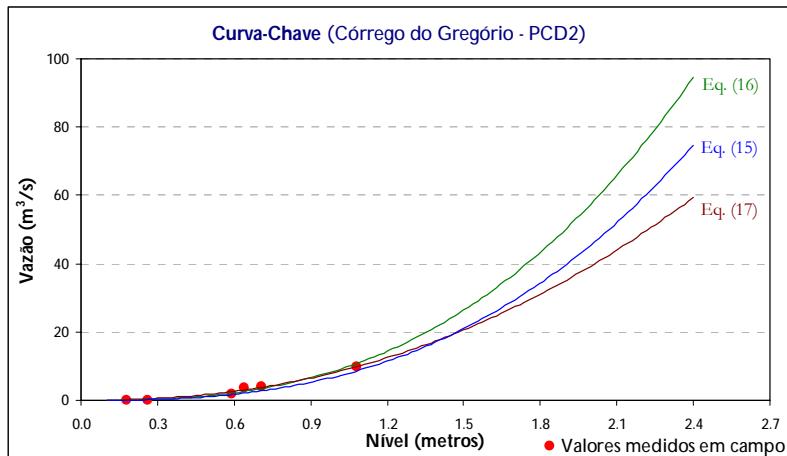


Figura 4 – Diferentes curvas-chave obtidas para a seção de controle PCD2.

de variação da declividade, e uma diminuição no coeficiente de variação da vazão.

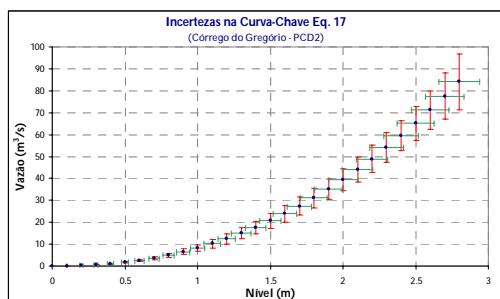


Figura 5 – Curva-chave da equação 17 com variações devidas as incertezas analisadas.

No entanto, em situações como a estudada, o nível d'água pode variar muito mais do que $\pm 5\%$ em 1 minuto causando variações ainda maiores na vazão de pico. Nessa análise considerou-se somente a incerteza relacionada com a observação do nível de água. Os parâmetros adotados não sofreram alteração e isso é considerado uma das maiores causas de incertezas em estudos de vazão.

3^a. Etapa: Influência das incertezas para o cálculo das vazões e para simulação de pequenas bacias urbanas.

Na primeira etapa desse estudo foram determinadas três possíveis equações para representar a curva-chave. Em seguida foi realizada uma análise de incertezas para duas das equações, consideradas as mais representativas. Cabe agora verificar as con-

seqüências dos procedimentos realizados anteriormente para o cálculo das vazões e para a simulação (chuva-vazão) da área estudada.

Utilizando valores observados no linígrafo para diferentes eventos é possível verificar a variação nos valores das vazões para as diferentes curvas-chave identificadas. Os eventos utilizados foram os dos dias 09 e 30 de janeiro e 06 de fevereiro de 2004. Cabe destacar que o evento do dia 30/01/2004 causou enchente no centro da cidade.

O gráfico da figura 06 mostra os valores dos desvios na vazão causados pelas incertezas na observação do nível de água na medição de vazão para as equações (16) e (17).

Os resultados para a equação (15) não são apresentados no gráfico já que estariam compreendidos entre os valores das duas curvas mostradas.

Levando-se em consideração não só as incertezas nas observações dos níveis para cada curva-chave, mas também os erros na estimativa e extração da mesma as incertezas aumentam consideravelmente

Analizando os gráficos das Figuras 6, 7 e 8 verificam-se áreas que representam a variação da vazão com o tempo, devido a incertezas na determinação da curva nível-descarga e a uma imprecisão na leitura do nível d'água. Essas áreas foram definidas para curvas-chaves ajustadas para os mesmos valores de vazão, mas com modelos de regressão diferentes. Como se pode observar, nesse caso, a vazão de pico pode variar significativamente. Na figura 06, por exemplo, a vazão máxima pode variar de aproximadamente $52 \text{ m}^3/\text{s}$ até $104 \text{ m}^3/\text{s}$. Os valores simulados são resultados da pesquisa de Boldrin (2005).

Tabela 1 – Resultados da análise de incertezas nas medições de vazão (Eq. 17)

hi (m)	Q (m ³ /s)	CV (C)	CV (K)	CV (Sf)	VAR (Q)	COV (Q)	CV (Q)	Desvio (m ³ /s)
Cota	Vazão	Eq. (12)	Eq. (14)	Eq. (13)	Eq. (10)	Eq. (11)	Eq. (9)	Q x Eq. (9)
0.1	0.05	2.19E-02	1.95E-01	-2.30E-05	3.85E-02	8.53E-03	0.22	0.01
0.4	1.05	2.19E-02	1.40E-01	-1.64E-05	2.02E-02	6.14E-03	0.16	0.17
0.8	5.01	2.19E-02	1.56E-01	1.31E-04	2.47E-02	6.85E-03	0.18	0.89
1.2	12.48	2.19E-02	1.61E-01	4.52E-04	2.64E-02	7.13E-03	0.18	2.28
1.6	23.85	2.19E-02	1.32E-01	8.65E-04	1.80E-02	5.93E-03	0.15	3.69
2.0	39.42	2.19E-02	1.07E-01	1.33E-03	1.19E-02	4.85E-03	0.13	5.10
2.4	59.44	2.19E-02	9.25E-02	1.76E-03	9.03E-03	4.25E-03	0.12	6.85
2.8	84.10	2.19E-02	1.27E-01	2.13E-03	1.66E-02	5.88E-03	0.15	12.62

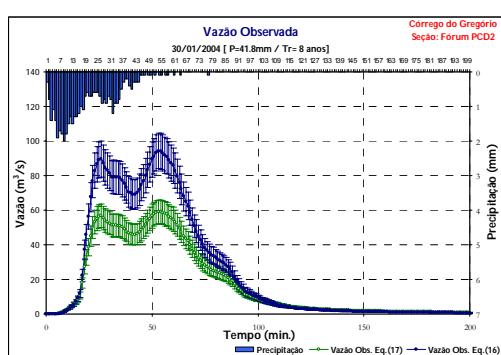


Figura 6 – Hidrogramas do dia 30/01/2004 com análise de incertezas para as equações 17 e 16.

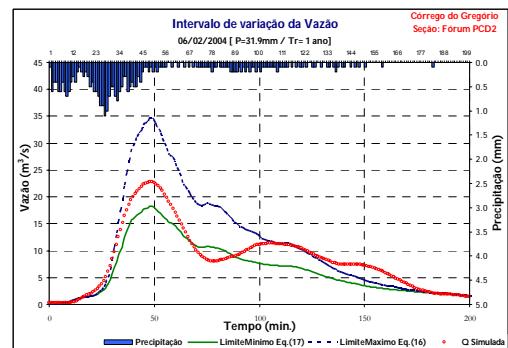


Figura 8 – Hidrogramas do dia 06/02/2004 com análise de incertezas para as equações 17 e 16.

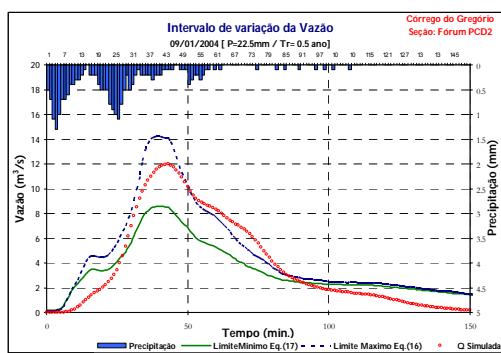


Figura 7 – Hidrogramas do dia 09/01/2004 com análise de incertezas para as equações 17 e 16.

Normalmente, para simulação de bacias hidrográficas, utiliza-se o procedimento de calibração e validação na tentativa de determinar os parâmetros adequados para representar o sistema. Em geral, assume-se que não existem, ou são insignificantes, erros nas observações de campo e que, portanto, as vazões estão dentro de um limite adequado e podem ser utilizadas como referência para a calibração e validação. O problema está no fato de que os resultados das simulações não levam em consideração a análise das incertezas nas observações de campo. Os resultados das Figuras 6, 7 e 8 mostram que os valores da vazão máxima podem variar significativamente e isso traz consequências importantes para o processo de calibração e para as simulações computacionais baseadas nesse procedimento.

Necessidade de desenvolvimento de novas metodologias

Na calibração e validação de um modelo de transformação chuva-vazão cabe notar que muitas vezes os parâmetros calibrados são diferentes para os diversos eventos. Não se tem certeza de quais são os parâmetros adequados e, assim sendo utiliza-se um valor médio que não representa satisfatoriamente todos os eventos. Na realidade, uma grande variação dos parâmetros indica uma deficiência no modelo, ou seja, importantes processos não estão sendo considerados.

Dessa maneira observa-se que o procedimento tradicional de calibração e validação pode não ser adequado para a determinação dos parâmetros do modelo que podem variar significativamente com a variação das vazões devido a diversos tipos de incertezas. Segundo Lei e Schilling (1998), um modelo de transformação chuva-vazão calibrado pode não ser validado ou mesmo quando calibrado e validado o modelo pode não ser válido para determinadas circunstâncias. Em seu trabalho os autores sugerem que o habitual processo de calibração e validação deveria ser substituído por um procedimento de confirmação incluindo a análise de incertezas da modelagem do sistema. A confirmação do modelo é o processo de testar a validade das hipóteses assumidas e a calibração dos parâmetros do modelo para que as respostas das simulações sejam as mais satisfatórias possíveis. Para a confirmação do modelo é necessário que se estime um intervalo aceitável para as incertezas nos dados observados. Em seguida, deve-se verificar se as incertezas na estrutura do modelo são insignificantes. Depois disso, são consideradas as incertezas nos parâmetros. O modelo é confirmado se as respostas das simulações, incluindo a análise dos diversos tipos de incertezas, são consideradas adequadas. Caso contrário, são necessárias modificações com o levantamento de mais informações e novas hipóteses.

CONCLUSÕES

As informações hidrológicas são extremamente importantes e constituem a base dos estudos de engenharia de recursos hídricos. Com o avanço dos sistemas computacionais e a facilidade de usos dos mesmos o número de pesquisas utilizando simulação dos processos hidrológicos cresceu de maneira exponencial. A obtenção e a análise das informações de campo bem como a das influências de suas incer-

tezas para as simulações, muitas vezes, têm sido deixadas em segundo plano.

Na pesquisa apresentada é possível observar as diferentes fontes de incertezas relacionadas à modelagem de processos hidrológicos e analisar a influência da incerteza nas medições de vazão e suas prováveis consequências para as simulações computacionais de bacias urbanas. Com isso é possível não só verificar a importância da inclusão desse tipo de análise na modelagem hidrológica, mas também destacar a necessidade de novos estudos que possam reduzir as incertezas na representação do ciclo hidrológico.

Quanto as outros tipos de incertezas que não foram objeto de análise do presente trabalho, como por exemplo, as incertezas no coeficiente de rugosidade e na declividade, recomenda-se que sejam assunto de futuros estudos. Também sugere-se estudos sobre incertezas das observações a partir de métodos intensivos do tipo Monte-Carlo e Bootstrap.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela bolsa de estudo concedida no curso de doutorado do primeiro autor, ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e aos revisores pelas correções e sugestões.

REFERÊNCIAS

- BOLDRIN, R. S. (2005). *Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não-estruturais de controle: Trecho da bacia do Córrego do Gregório, São Carlos – SP*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- 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*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, pp 91-95, vol. 4, n. 03. Porto Alegre.
- CDCC (2002). *Bacias de São Carlos*. Centro de Divulgação Científica e Cultural da Universidade de São Paulo / Setor de Biologia.

- CHOW, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. International student Edition. Ed. McGraw-Hill Kogakusha, LTD.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. Ed. McGraw-Hill. Series in Water Resources Environmental Engineering. ISBN 0-07-010810-2.
- HERSCHY, R.W., 1985. *Streamflow Measurement*, second edition. E & FN SPON, London SE 18HV, UK.
- JACCON, G., CUDO, K.J. (1989). *Hidrologia. Curva Chave: análise e traçado*. DNAEE, Brasília, 1989.
- KLIR, G. (1989) *Inductive Systems Modeling: An overview*. In: Elzas, M.; Ören, T.; Zeigler (ed.) *Modeling and Simulation Methodology*. Elsevier Publ. – North Holland
- KNIGHT, D. (1989). *Hydraulics of flood channels*. In Beven, K., Carling, P. (eds.) *Floods: Hydro-sedimentological and geomorphological implications*, Chischester, Wiley, 83-105.
- KUCZERA, G.; PARENT E. (1998) *Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm*. *Journal of Hydrology*, 211 p 69-85.
- KUCZERA, G.; WILLIAMS, B. J. (1992) *Effect of Rainfall Errors on Accuracy of Design Flood Estimates*. *Water Resources Research*, Vol.28 No. 4 p 1145-1153, Abril 1992
- LEE, H. L.; MAYS, L.W. (1986) *Hydraulic Uncertainties in Flood Levee Capacity*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 10, Outubro, 1986.
- LEI, J.; SCHILLING, W. (1998). *System modeling revisited – Verification, confirmation and the role of uncertainty analysis*. *Hydroinformatics'98*, Babovic & Larsen (eds) 1998 Balkema, Rotterdam, ISBN 9054109831.
- MENDES, H. C. (2005). *Urbanização e Impactos Ambientais: Histórico de Inundações e Alagamentos na Bacia do Gregório*, São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado. Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2005. 324p.
- MENDIONDO, E. M. (2001). *Contribuições da análise de incerteza para a recuperação ambiental de bacias pela abordagem interdisciplinar de geobiohidrologia*. Tese (Doutorado) 287p.– Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre
- MOSLEY, M. P., MCKERCHAR, A. I. (1993). *Handbook of Hydrology, Capítulo 8: Streamflow* (ed. David R. Maidment). McGraw-Hill, N.Y.
- NIBH (2004). Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas. *Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos, SP*. FINEP – CT-Hidro / EESC-USP / DAEE-SP / FIPAI, 01.02.0086.00.
- PAPPENBERG, F.; BEVEN, K. J. (2006). *Ignorance is Bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis*. *Water Resources Research*, Vol. 42, 2006.
- RIGHETTO, J. M. (2005). *Modelo de Seguro para Riscos Hidrológicos no contexto de manejo Integrado de Bacias Hidrográficas*. Dissertação de Mestrado. Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2005. 91p.
- SILVA, K. A. *“Análise da variabilidade espacial da precipitação e parâmetros hidrológicos em bacia experimental: estudo da transformação da chuva em uma pequena bacia hidrográfica urbana”*. São Carlos, 2003. 419 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SIVAPLAN M.; TAKEUCHI,K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E. M.; O'CORNELL, P. E; POMEROY, J.W.; SCHRTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. (2003). *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an Exciting Future for the Hydrological Sciences*. Submitted to Hydrological Sciences Journal, Outubro de 2003.
- TUCCI, C. E. M. (2002). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, Editora da UFRGS/ABRH, 3^a ed., v.4 da coleção ABRH de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2002.

Uncertainty Analysis Of Hydrological Observations And Its Influence On Small Urban Basin Modelling

ABSTRACT

Nowadays, computer simulations are essential to help in the decision-making process for integrated water resources management. However, there are still great uncertainties regarding hydrologic responses, especially in ungauged river basins. This paper presents an uncertainty analysis of flow measurements and its influence on small urban basin modelling. A first order analysis of the Manning Equation is carried out in order to evaluate those uncertainties. The methodology shown is applied to a case study in the upper area of Gregório River Basin in the city of São Carlos São Paulo State, Brazil. The results demonstrate that a $\pm 5\%$ error (in 1 minute) in the water level causes a variation of nearly $\pm 15\%$ in the flow. This study shows the importance of definitively including uncertainty analysis in hydrologic modelling and the need to develop new methodologies and approaches that can reduce predictive uncertainty.

Key-words: uncertainty analysis, flow measurement, PUB.