

Metodologia Integrada para Análise de Freqüência de Pico e Volumes de Cheia com a Incorporação da Informação Hidrometeorológica Regionalizada

Wilson dos Santos Fernandes, Mauro Naghettini

Universidade Federal de Minas Gerais

wilson@ehr.ufmg.br, naghet@netuno.lcc.ufmg.br

Recebido: 11/10/06 - revisado: 23/04/07 - aceito: 15/06/07

RESUMO

Em 1988 o U. S. National Research Council (NRC, 1988) identificou três princípios a serem seguidos para a melhoria das estimativas de quantis extremos de vazão, a saber: “substituição do tempo pelo espaço”, “inclusão de maior estrutura aos modelos utilizados” e “ênfase na cauda superior das distribuições de probabilidade”. A metodologia proposta neste artigo faz uso dos três princípios mencionados de uma forma integrada. No contexto dessa metodologia, as vazões de pico excedentes sobre um valor limiar arbitrário e os volumes de cheia, associados a essas excedências, são individualizados e modelados como um processo estocástico pontual marcado usando-se a representação de um processo composto de Poisson. A essência do método proposto consiste em se estimar separadamente a função densidade marginal de probabilidade dos volumes de cheia, para uma duração equivalente ao tempo de base da bacia, e a função densidade das vazões de pico condicionadas aos volumes. Na seqüência, a função de distribuição de probabilidades anuais das vazões de pico pode ser estimada através da integração do produto entre a densidade marginal de probabilidade dos volumes de cheia e a densidade das vazões de pico condicionadas aos volumes. A agregação da informação hidrometeorológica regionalizada tem o propósito de guiar a estimativa da densidade dos volumes de cheia. Essa agregação faz uso de algumas premissas sobre a transformação chuva-vazão, sob condições extremas. Por outro lado, a regionalização das precipitações faz uso da distribuição TCEV (Two Component Extreme Value).

Palavras Chave: Cheias extremas, análise de freqüência de vazões, eventos hidrológicos raros.

INTRODUÇÃO

As estimativas dos quantis de vazões de enchente e de seus respectivos tempos de retorno constituem elementos indispensáveis para o dimensionamento e para a avaliação do risco de falha de estruturas hidráulicas. Em geral, para enchentes de tempo de retorno inferior a 100 anos, a análise de freqüência convencional constitui um conjunto satisfatório e rotineiro de métodos de estimação dos quantis de cheia. Por outro lado, as enchentes extremas, de probabilidades de excedência superiores a 10^{-3} , encontram-se na fronteira do desconhecimento. Em decorrência das amostras de pequeno tamanho, as incertezas inerentes às estimativas de enchentes extremas são sabidamente muito grandes e, em geral, não são quantificáveis pelos procedimentos convencionais de inferência estatística. Entretanto, as estimativas de enchentes extremas são absolutamente necessárias nos projetos de grandes estruturas hidráulicas.

Visando diminuir ou melhor descrever as incertezas envolvidas na determinação de cheias raras, o Comitê de Estudos dos Métodos de Estimação de Probabilidade de Cheias Extremas, formado pelo Conselho Nacional de Pesquisas norte-americano (NRC, 1988), identificou três princípios gerais a serem seguidos na proposição de novas metodologias para a melhoria das estimativas de probabilidades de enchentes muito raras. São eles:

- a. “substituição do tempo pelo espaço”, uma clara indicação de uso preferencial das técnicas de estimação espacialmente regionalizada, em contraposição à estimação pontual;
- b. “introdução de maior estrutura aos modelos”, uma alusão, por exemplo, à possibilidade de se equacionar a transformação chuva-vazão em condições extremas de transporte e armazenamento de umidade na bacia; e
- c. “ênfase para os extremos em detrimento, ou até mesmo exclusão, das características

centrais e de eventuais pontos atípicos (outliers) da cauda inferior”, de forma a evitar que as observações amostrais mais frequentes possam vir a distorcer a estimação das características essenciais da cauda superior das distribuições de probabilidade.

Após a publicação do NRC, ocorreram importantes avanços na análise de freqüência de cheias, notadamente aqueles relacionados à inclusão de dados paleohidrológicos e históricos (Benito e Thorndycraft, 2004) e aqueles relacionados à análise de freqüência regional por momentos-L (Hosking e Wallis, 1997). Esses são considerados avanços inegáveis para a estimação de enchentes raras. Cabe ressaltar, entretanto, que os métodos citados requerem um maior esforço de coleta e levantamento de informações e, de fato, não se opõem às direções apontadas pelos princípios enunciados pelo NRC, os quais continuam determinando temas válidos de investigação.

Uma primeira tentativa de atender integralmente às três recomendações do NRC (1988) refere-se à metodologia proposta por Naghettini et al. (1996), a qual permite a estimação da cauda superior de freqüência de vazões de pico, incorporando a informação hidrometeorológica regionalizada por meio de relações simples entre os volumes de cheia e de precipitação, sob condições de saturação de umidade de solo. Em síntese, Naghettini et al. (1996) propõem (i) o uso de um modelo regional para estimar as características da cauda superior das precipitações de duração igual ao tempo de base dos hidrogramas observados, para em seguida, (ii) incorporá-las na extrapolação da curva de freqüência de volumes de cheia de duração igual à das precipitações causais, por meio das hipóteses de base do método GRADEX (Guillot e Duband, 1967), (iii) culminando na construção da curva de freqüência de vazões de pico, pela integração da relação pico-volume de cheia. Sob condições adequadas ao seu uso, a metodologia proposta por Naghettini et al. (1996) tem o potencial de agregar um importante conjunto de informações à análise de freqüência de vazões de enchente, integrando os princípios enunciados pelo NRC (1988). Com efeito, Swain et al. (2004) incluem a metodologia de Naghettini et al. (1996) entre aquelas empregadas pelo United States Bureau of Reclamation para a estimação de quantis de enchentes raras.

A despeito de seus atributos potenciais, a metodologia de Naghettini et al. (1996) apresenta algumas dificuldades para sua implementação em aplicações genéricas. A primeira refere-se à reco-

mendação de extrapolar a relação pico-volume, para além dos dados observados, por meio de simulação chuva-vazão de um conjunto de tormentas transpostas para a bacia de interesse. Nesse particular, além da complexidade inerente à transposição de tormentas de uma região para outra, constata-se que, em diversos países e regiões, é incomum a existência de um extenso catálogo de eventos extremos de precipitação, tal como aquele empregado por Naghettini et al. (1996), na aplicação efetuada para a bacia do Rio Blue. A segunda dificuldade diz respeito ao modelo regional de estatísticas superiores usado para inferir o parâmetro de escala de cauda superior exponencial das precipitações de dada duração. De fato, a prescrição de usar somente os 10 ou 20% maiores valores amostrais, além de restringir consideravelmente os dados disponíveis para a inferência, introduz subjetividade na estimação do parâmetro de escala da cauda superior exponencial.

O método aqui proposto, doravante denominado método PVP (Precipitação-Volume-Pico), preserva a estrutura geral da seqüência metodológica proposta por Naghettini et al. (1996), principalmente no que diz respeito à transferência de informação hidrometeorológica por meio das hipóteses do método GRADEX. No entanto, são introduzidas duas modificações importantes: a primeira refere-se ao emprego do modelo regional TCEV (Two-Component Extreme Value), desenvolvido por Fiorentino et al. (1987) e Gabriele & Arnell (1991), para a estimação do parâmetro de escala das precipitações de duração igual ao tempo de base e a segunda refere-se à modelação, em escala regional, da relação entre vazões máximas e volumes de cheia, de duração igual ao tempo de base, ou seja, da relação pico-volume.

Este artigo tem por objetivo descrever a essência do método PVP e exemplificar o seu uso mediante uma aplicação à bacia do Rio Pará em Ponte do Vilela, localizada na região centro-sul do estado de Minas Gerais. O artigo está organizado em três itens principais, a saber, metodologia, aplicação e discussão, os quais contêm subitens para permitir maior clareza das etapas da seqüência metodológica.

METODOLOGIA

O método PVP fundamenta-se na formulação dos processos estocásticos pontuais marcados, particularizados para eventos de cheia, tal como ilustrado na figura 1. Nessa figura, caracteriza-se o processo estocástico pelo conjunto $\{T_i, Y_i, X_i\}$, onde

T_i denota o tempo, ou a marca, de ocorrência da *i*-ésima vazão de pico Y_i , que excede o valor limiar u e X_i representa o volume escoado, de duração d , associado à Y_i .

Os processos pontuais marcados, tal como o processo $\{T_i, Y_i, X_i; i = 1, 2, \dots\}$, foram modelados, primeiramente, por Todorovic & Zelenhasic (1970) usando uma representação de um processo de Poisson composto. De acordo com essa modelagem, a probabilidade anual de ocorrência de picos é dada pela seguinte equação:

$$F_M(y_p) = \exp\left\{-\int_0^1 [1 - H_u(y_p | t)] \cdot \lambda(t) dt\right\} \quad (1)$$

onde H_u é a função acumulada de probabilidade dos picos de vazão que excedem o limiar u , y_p representa o quantil de interesse e $\lambda(t)$ a taxa de ocorrência do processo de Poisson, dependente do tempo, a qual deve ser integrada entre o início do ano, dado pelo limite 0, e o fim do ano, correspondente ao limite superior 1.

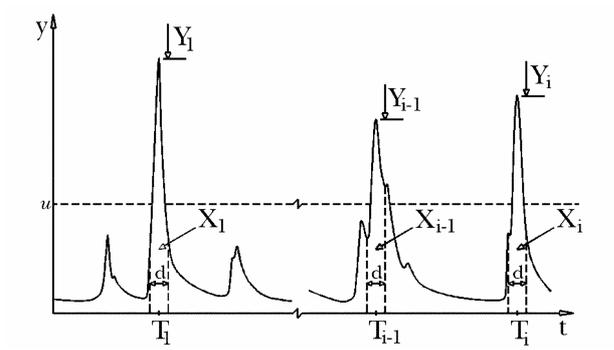


Figura 1 - Processo pontual marcado

A associação de vazões de pico e volumes de cheia

Segundo Bradley & Potter (1992), a distribuição dos picos condicionada a u , denotada por H_u , pode ser deduzida da distribuição dos volumes escoados e da distribuição dos picos condicionada aos volumes. A distribuição dos volumes de cheia X_i , condicionada ao nível u e ao tempo de ocorrência t , é dada por:

$$G_u(x | t) = P(X_i \leq x | Y_i > u, T_i = t) \quad (2)$$

As variáveis Y e X são relacionadas pela distribuição dos picos condicionada aos volumes e ao tempo de ocorrência. Formalmente:

$$F_{Y|X}(y | x, t) = P(Y_i \leq y | X_i = x, T_i = t) \quad (3)$$

Se $g_u(x|t)$ e $f_{Y|X}(y|x,t)$ representam as correspondentes funções densidade de probabilidade, a função distribuição de probabilidade conjunta de X e Y é dada pelo produto $f_{Y|X}(y|x,t) \cdot g_u(x|t)$. Assim, por definição, a distribuição marginal $H_u(y|t)$ é dada por:

$$H_u(y_p | t) = \int_0^{y_p} \int_0^\infty f_{Y|X}(y | x, t) \cdot g_u(x | t) dx dy \quad (4)$$

Se $g_u(x|t)$ e $f_{Y|X}(y|x,t)$ não dependem do tempo, as equações 1 e 4 se reduzem, respectivamente, a:

$$F_M(y_p) = \exp\left\{-\int_0^1 [1 - H_u(y_p)] \lambda(t) dt\right\} \quad (5)$$

$$H_u(y_p) = \int_0^{y_p} \int_0^\infty f_{Y|X}(y | x) \cdot g_u(x) dx dy \quad (6)$$

No método PVP, a cauda superior da distribuição dos volumes de cheia $g_u(x)$ é obtida por meio das hipóteses de base do método GRADEX (Guillot e Duband, 1967). Inicialmente, estima-se a distribuição da chuva pela regionalização dos dados pluviométricos, utilizando-se o modelo distributivo TCEV. Na seqüência, estima-se a distribuição dos volumes de cheia fazendo-se uma translação, a partir da distribuição da chuva, de uma distância proporcional ao parâmetro de escala (gradex) da cauda superior da TCEV. A distribuição dos picos condicionada aos volumes é estimada por meio de um modelo regional paramétrico não-linear que correlaciona as vazões de pico com os volumes escoados. Uma vez determinadas as funções densidade (f e g) e a intensidade média anual $\Lambda = \int_0^1 \lambda(t) dt$, a solução do

sistema formado pelas equações 5 e 6, para valores extremos de y_p , fornece a distribuição anual de probabilidades para os picos de vazão.

A seguir, os componentes da seqüência metodológica proposta são apresentados individualmente. Posteriormente, será apresentado o contexto lógico, dentro do qual são incorporadas as características essenciais de cada componente, de modo a estabelecer uma metodologia unificada para a determinação de quantis extremos que leve em consideração os princípios estabelecidos pelo U.S. National Research Council (NRC, 1988).

A associação de volumes de cheia e alturas de precipitação

A associação de volumes de cheia e alturas de precipitação ou, em outras palavras, a obtenção da distribuição dos volumes de cheia é feita a partir de duas premissas do método GRADEX. A primeira refere-se à relação entre a chuva e o volume de cheia, quando a umidade do solo aproxima-se da condição de saturação. Supõe-se que, em condições de saturação, qualquer incremento de volume da chuva, para uma duração suficientemente longa, tende a produzir um incremento equivalente no volume de cheia de igual duração. A segunda premissa refere-se à cauda superior da distribuição dos volumes de chuva, a qual é suposta ser uma função de decaimento exponencial.

Combinando as duas premissas do método GRADEX verifica-se que a função densidade de probabilidade dos volumes escoados pode ser deduzida de densidade de probabilidade da chuva por uma simples translação de uma quantidade r_0 , o que é válido, também, para as funções de distribuição acumuladas. Ou seja, após a saturação da umidade do solo, a função acumulada de probabilidade dos volumes escoados cresce à mesma taxa da distribuição acumulada da chuva. A figura 2 ilustra essa primeira hipótese de trabalho.

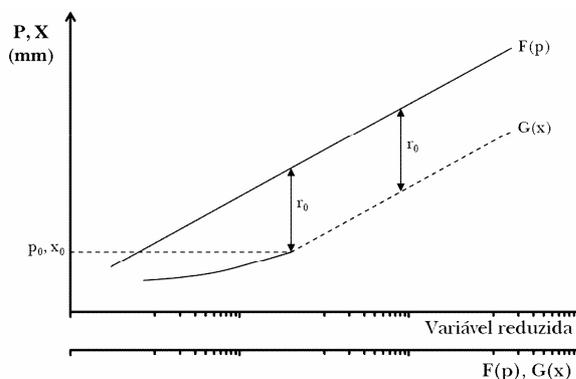


Figura 2 – Plotagem de G (distribuição dos volumes escoados) e F (distribuição da chuva) em papel de probabilidade exponencial ou de Gumbel. As durações da chuva e do volume são as mesmas.

A distância de translação r_0 é referenciada como um “limite prático” para o “déficit de escoamento” (Duband et al., 1988). Na prática, Guillot & Duband (1967) recomendam o uso de uma distribuição empírica para os dados observados dos volumes máximos anuais (ou sazonais) até um período de

retorno de 10 a 20 anos, para bacias relativamente impermeáveis, e de até 50 anos para bacias com alta capacidade de infiltração. A partir desse ponto, as funções de distribuição acumuladas dos volumes de chuva e de cheia são separadas por uma distância r_0 . Equivalentemente, as duas distribuições podem ser plotadas em papel exponencial como uma linha reta, ambas com uma inclinação igual ao parâmetro gradex, ou parâmetro de escala, da chuva. Portanto, para a aplicação do método em uma bacia é necessário somente a estimativa do parâmetro gradex da chuva.

Modelo regional TCEV para alturas de chuva

A função distribuição acumulada de probabilidade (FAP) do modelo TCEV (Two-Component Extreme Value) é obtida pelo produto de duas distribuições Gumbel através da seguinte expressão:

$$F_z(z) = \exp \left[-\Lambda_1 \exp \left(-\frac{z}{\theta_1} \right) - \Lambda_2 \exp \left(-\frac{z}{\theta_2} \right) \right] \quad (7)$$

com $z > 0$ e parâmetros $\theta_2 > \theta_1 > 0$ e $\Lambda_1 > \Lambda_2 \geq 0$.

A regionalização de dados hidrometeorológicos, com base no modelo TCEV, tem sido utilizada largamente na Itália, a partir de aplicações diversas da metodologia desenvolvida por Fiorentino et al. (1987) e Gabriele & Arnell (1991).

Para a determinação regional dos parâmetros da TCEV é conveniente fazer a seguinte transformação de variáveis:

$$W_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{\theta_{1,i}} - \ln(\Lambda_{1,i}), \quad i = 1, \dots, k \text{ e } j = 1, \dots, n_i \quad (8)$$

sendo k o número de estações dentro da região homogênea, n_i o tamanho da amostra da i -ésima estação, e $\theta_{1,i}$ e $\Lambda_{1,i}$ os parâmetros da componente básica da i -ésima estação.

W é uma variável aleatória independente e identicamente distribuída e se distribui segundo a TCEV da seguinte forma:

$$F_W(w) = \exp \left[-\exp(-w) - \Lambda_* \exp \left(-\frac{w}{\theta_*} \right) \right] \quad (9)$$

sendo $\theta_* = \theta_{2,i}/\theta_{1,i}$ e $\Lambda_* = \Lambda_{2,i}/\theta_{1,i} \sqrt{\Lambda_{1,i}}$.

Admitindo-se que se trata de uma região homogênea, θ_* e Λ_* são constantes, o que equivale a admitir que o coeficiente de assimetria é o mesmo para a região estudada.

Para o cálculo dos parâmetros regionais da TCEV é necessário estabelecer os quatro primeiros momentos-L. Beran et al. (1986) deduziram os momentos ponderados por probabilidade, denotados por β_r ou MPP_r , para a TCEV, os quais são expressos por:

$$\beta_r = E[w \cdot F_W^r(z)] = MPP_r^{(1)} + \frac{\theta_1}{r+1} \cdot \psi_r \quad (10)$$

onde

$$MPP_r^{(1)} = \frac{\theta_1}{r+1} [\gamma_c + \ln(\Lambda_1) + \ln(r+1)] \quad (11)$$

$$\psi_r = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1} \cdot \Lambda_*^j \cdot (r+1)^{j(1-1/\theta_*)} \cdot \Gamma(1/\theta_*)}{j!} \quad (12)$$

γ_c é a constante de Euler ($\gamma_c = 0,5772\dots$) e $\Gamma(\cdot)$ representa a função Gama.

Os parâmetros regionais θ_* e Λ_* podem ser obtidos igualando-se a assimetria-L regional e a curtose-L regional aos seus respectivos valores médios amostrais. Hosking & Wallis (1997) estimaram os valores regionais para a assimetria-L e a curtose-L a partir da média ponderada de seus valores locais. Desta forma, tem-se:

$$\frac{\ln 9/8 + 2D_2 - D_1}{\ln 2 + D_1} - t_3^R = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\ln 2^{16}/3^{10} + 5D_3 - 5D_2 + D_1}{\ln 2 + D_1} - t_4^R = 0 \quad (14)$$

onde, $D_r = \psi_r - \psi_{r-1}$, t_3^R é a assimetria-L regional e t_4^R é a curtose-L regional.

As soluções do sistema formado pelas equações 13 e 14 fornecem as estimativas regionais de θ_* e Λ_* .

Síntese do método PVP

O método PVP tem a vantagem, em relação à análise estatística convencional, de incorporar, de forma lógica, os três principais fatores que afetam as distribuições de probabilidade dos picos de vazão, a saber: a hidrometeorologia local, a transformação chuva-vazão e a hidráulica fluvial. Entretanto, cabe ressaltar que com a inclusão de novas informações, novas fontes de incertezas também são introduzidas.

O uso de séries de chuva para extrapolar a distribuição de probabilidades dos volumes escoados incorpora um número maior de dados à análise. Uma vez que os dados de chuva são mais abundantes, a estimativa da distribuição dos volumes pode ser feita de modo mais confiável. Em conseqüência, o método PVP faz uso dessa maior disponibilidade espaço-temporal de dados pluviométricos, incorporando-os por meio de análise regional de freqüência.

A transformação chuva-vazão em eventos raros é mais simples de se modelar do que em eventos mais freqüentes. Para valores altos de períodos de retorno, o clima exerce uma influência dominante, fazendo com que os demais fatores intervenientes tenham um papel relativamente secundário. Como conseqüência, a hipótese de proporcionalidade direta entre os incrementos de chuva e volumes escoados é plausível.

Finalmente, a hidráulica fluvial, que reflete o modo como os excessos de chuva são propagados pela rede de canais da bacia, pode ser indiretamente representada pela relação pico-volume. De fato, a correta modelagem da relação entre os picos de vazão e os volumes escoados pode incorporar, ainda que indiretamente, os principais fatores geomorfológicos que influem na hidráulica fluvial.

Na formulação original do método pico-volume, por Bradley & Potter (1992), a distribuição dos volumes é estimada a partir da análise de freqüência convencional. Naghettini et al. (1996) utilizaram os totais precipitados, de uma dada duração d , para extrapolar a distribuição dos volumes acima dos valores observados. Nessa adaptação da metodologia do pico-volume, as duas condições do método GRADEX devem ser utilizadas em conjunto com as equações 5 e 6.

A distribuição dos volumes de cheia $g_x(x)$ de duração d , a qual é tomada como igual ao tempo de base da bacia, pode ser obtida a partir da distribuição da chuva, de mesma duração d , com a metodologia convencional do GRADEX. O modelo TCEV, descrito anteriormente, pode ser usado para tal fim. A TCEV tem a vantagem de ser flexível o suficiente para abranger as condições impostas pelo método GRADEX, particularmente a hipótese de exponencialidade da cauda superior.

A TCEV é dada pelo produto de duas distribuições Gumbel, uma modelando os eventos mais freqüentes e a outra modelando os mais raros. Uma vez que a distribuição Gumbel tem cauda superior exponencial e a TCEV tende para aquela distribuição de valores extremos, respeita-se a condição de exponencialidade do método GRADEX.

Por outro lado, pode-se ajustar a TCEV de modo que sua cauda superior esteja situada no domínio onde os incrementos de volumes da chuva produzem incrementos equivalentes de volume de cheia, ou seja, no domínio onde a bacia se encontra saturada, validando a segunda hipótese do método GRADEX.

A cauda inferior da distribuição dos volumes pode ser ajustada, por análise de freqüência convencional, até o período de retorno T_c . A partir desse ponto a distribuição pode ser extrapolada pelas hipóteses do método GRADEX, tendo como auxílio a distribuição da chuva.

O período de retorno T_c é de difícil prescrição. Vários autores (Duband et al., 1988; Guillot & Duband, 1967) propuseram valores arbitrários variando entre 10 e 50 anos, dependendo das condições geomorfológicas da bacia. Recomenda-se aqui, que a menos que se tenham boas razões físicas, T_c seja definido com base nos dados observados de volumes de cheia utilizando alguma medida de tendência central das estatísticas de ordem superior da série. Uma justificativa para essa recomendação é que, para séries observadas longas, pode-se admitir que os dados com baixas probabilidades empíricas de excedência (grande períodos de retorno) contemplam a condição de saturação da bacia.

A distribuição condicionada $f_{Y|X}(y|x)$ pode ser estimada usando um modelo regional não-linear que relaciona as vazões de pico aos respectivos volumes de cheia de duração igual ao tempo de base. Tal modelo regional tem a seguinte estrutura geral:

$$Y = S(X) + \varepsilon \quad (15)$$

na qual Y representa as vazões máximas diárias (ou de pico de cheia para um certo hidrograma), X denota os volumes e ε os erros da regressão.

Admitindo-se que os erros de regressão são homocedásticos, a quantidade $[Y - S(X)]$ é normalmente distribuída com média zero e desvio padrão σ_ε . Uma vez que Y representa os picos acima de um limiar u , a distribuição dos picos condicionada aos volumes é uma normal truncada abaixo de u . Formalmente, tem-se:

$$F_{Y|X}(y|x) = \frac{\Phi\left[\frac{y-s(x)}{\sigma_\varepsilon}\right] - \Phi\left[\frac{u-s(x)}{\sigma_\varepsilon}\right]}{1 - \Phi\left[\frac{u-s(x)}{\sigma_\varepsilon}\right]} \quad (16)$$

sendo $\Phi[\cdot]$ a distribuição acumulada de probabilidade para a variável normal padrão.

O desvio padrão σ_ε é estimado usando os dados observados de pico e volume. Diferenciando a equação 16, obtém-se a distribuição $f_{Y|X}(y|x)$.

APLICAÇÃO DO MÉTODO PVP

A Bacia do Rio Pará

O método PVP foi objeto de aplicação à bacia do rio Pará, em Ponte do Vilela. Essa bacia foi escolhida por ter sido objeto de recentes estudos de regionalização de vazão e precipitação por diferentes metodologias, tais como, por exemplo, nos trabalhos de CPRM (2001) e Lima (2004). Esse fato permitiu a verificação dos resultados obtidos e a análise comparativa entre os diversos métodos de estimação de quantis máximos de vazão. Além disso, a bacia escolhida possui uma extensa série de dados de vazão e uma boa distribuição de estações pluviométricas, o que permitiu uma análise completa de cada parte da metodologia desenvolvida.

O rio Pará se localiza entre as longitudes 44° e 45° e latitudes 20° e 21° na bacia do alto rio São Francisco, no estado de Minas Gerais. O ponto de referência adotado para a aplicação da metodologia foi a estação fluviométrica Ponte do Vilela (Código 40130001), localizada a 73 km da nascente do rio Pará. Essa estação possui uma área de drenagem de 1620 km². O rio Pará, até esse ponto, tem um comprimento de 73 km e uma declividade média de 0,30%.

A estação Ponte do Vilela possui dados diários de vazão de 1938 a 2001. O tempo de base médio, obtido a partir de 26 hidrogramas selecionados, foi de 8 dias. Na presente aplicação, toma-se a vazão média diária máxima, ao longo de um hidrograma de vazões diárias, como a vazão de pico. Essa aproximação decorre da indisponibilidade de vazões "instantâneas" ou de registros de vazões médias horárias no local. Ressalta-se aqui que essa aproximação não é válida para bacias de tempo de concentração subdiário. De fato, para bacias com essa característica, os dados fluviométricos subdiários se fazem necessários para a aplicação do método PVP. No caso da bacia do rio Pará, com tempo de base médio de 8 dias, a aproximação da vazão de pico "instantânea" pela vazão média diária máxima não é considerada crítica.

A escolha da taxa média anual de ocorrências, Λ , foi feita de modo a extrair o máximo de informação da série, respeitando-se, entretanto, a independência serial entre as vazões médias diárias máximas e a hipótese distributiva de Poisson quanto ao número médio de excedências anuais. Dessa forma, obteve-se uma série de duração parcial com $\hat{\Lambda} = 1,5$.

Relação pico-volume para a bacia do Rio Pará

A relação entre volume e pico do escoamento direto é de importância em uma larga variedade de análises hidrológicas, especialmente onde os dados são escassos (Singh & Aminian, 1986). Tais relações prestam-se não só às tarefas afeitas à engenharia de recursos hídricos, como, por exemplo, as estimativas de cheias de projeto, como também a argumentações importantes sobre os conceitos de linearidade e não-linearidade de bacias hidrográficas, tais como introduzidos por Rogers (1980). Como será visto a seguir, a relação pico-volume é de fundamental importância na determinação da distribuição dos picos condicionada aos volumes, denotada por $f_{Y|X}(y|x)$.

Recentemente, Fernandes e Naghettini (2005) definiram a relação pico-volume para o estado de Minas Gerais de acordo com a metodologia proposta por Rogers (1980). De acordo com este trabalho, a relação entre os picos de vazão e os volumes escoados é dada pela seguinte equação:

$$Q_{\text{PICO}} = 0,4783 \times A^{0,8877} \times V^{0,9369} \quad (17)$$

sendo A a área de drenagem em km^2 , V o volume escoado (deflúvio) em cm e Q_{PICO} a vazão de pico em m^3/s .

Em bacias para as quais se dispõe de registros pluviométricos suficientemente longos, como é o caso da bacia do rio Pará, pode-se utilizar os pares pico-volume observados para estimar o modelo que explica a variância das vazões máximas diárias a partir dos volumes de cheia.

A relação entre o pico e o volume de cheia é complexa e depende de vários fatores, incluindo a atenuação do pico devido à inundação do leito maior da bacia e características geomorfológicas particulares de cada local. Desta forma, a relação pico-volume para a bacia do rio Pará foi estimada em duas etapas: a primeira, relacionando os dados observados através de um modelo não paramétrico utilizando a técnica LOWESS (Cleveland, 1979), e a seguinte, extrapolando a relação anteriormente obtida, a partir do maior valor observado, por meio

do modelo regional dado pela equação 17. A figura 3 mostra a relação encontrada para a bacia.

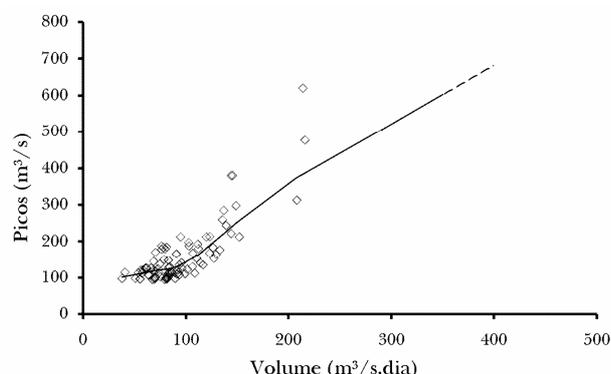


Figura 3 – Relação pico-volume para a bacia do rio Pará.

O erro padrão σ_ϵ da regressão, mostrada na figura 3, foi de $25,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Modelo regional para as alturas de chuva

Conforme visto anteriormente, a aplicação das hipóteses do método GRADEX depende da definição do parâmetro de escala da distribuição de probabilidades da chuva. Com o objetivo de dar uma maior estrutura ao método e agregar mais informação ao resultado final da aplicação da metodologia PVP, o parâmetro de escala da distribuição da chuva foi definido por meio de um estudo regional. Para tal, foram selecionadas 11 estações pluviométricas no entorno da bacia em questão. A tabela 1 mostra a localização e o período de dados das estações utilizadas.

A partir dessas estações, foram obtidas as séries de duração parcial para a mesma duração (8 dias) e para a mesma taxa de ocorrência de Poisson ($\hat{\Lambda} = 1,5$).

Os parâmetros regionais da TCEV foram obtidos pelo método dos momentos-L, resolvendo o sistema formado pelas equações 13 e 14 através de técnica de otimização semelhante à proposta de Duan (1991). Os valores encontrados foram $\hat{\theta}_* = 2,810$ e $\hat{\Lambda}_* = 0,801$.

Os parâmetros locais da TCEV foram obtidos por meio do método dos momentos-L a partir da série de duração parcial da chuva média sobre a bacia e dos parâmetros regionais determinados anteriormente. O gráfico da figura 4 ilustra o ajuste. Os parâmetros estimados, para alturas de chuvas

dadas em mm, foram: $\hat{\theta}_1 = 17,985$, $\hat{\theta}_2 = 50,547$, $\hat{\Lambda}_1 = 4.674,127$ e $\hat{\Lambda}_2 = 16,203$. Se os volumes de chuva são expressos em $(m^3/s).dia$, o parâmetro de escala da cauda superior da distribuição de probabilidade é $\hat{\theta}_2 = 118,470$.

Tabela 1 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Latitude	Longitude	Período
02044000	20° 55' 00''	44° 27' 00''	1941 - 1971
02044002	20° 04' 17''	44° 34' 13''	1941 - 2004
02044003	20° 11' 32''	44° 47' 37''	1941 - 2004
02044005	20° 33' 28''	44° 52' 03''	1942 - 2002
02044006	20° 08' 13''	44° 53' 31''	1941 - 2004
02044009	20° 37' 31''	44° 26' 00''	1942 - 2002
02044011	20° 33' 00''	44° 38' 00''	1942 - 1949
02044016	20° 10' 09''	44° 30' 54''	1970 - 2004
02044027	20° 44' 27''	44° 47' 00''	1966 - 2003
02044036	20° 24' 00''	44° 28' 00''	1942 - 2002
02044042	20° 33' 45''	44° 52' 03''	1977 - 2004

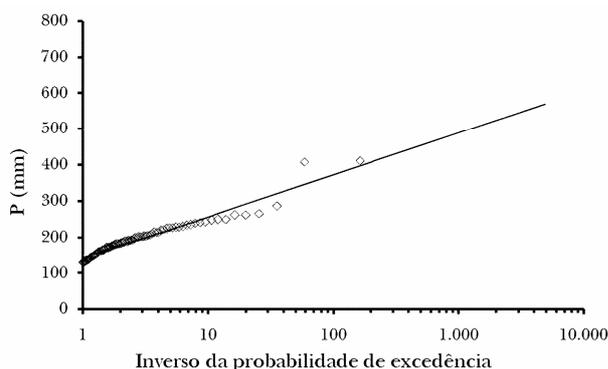


Figura 4 – Ajuste da TCEV à chuva média sobre a bacia do rio Pará em Ponte do Vilela.

Distribuição dos volumes de cheia de 8 dias de duração

A distribuição dos volumes foi obtida pelo ajuste da TCEV aos dados observados, levando-se em consideração o gradex calculado para a chuva. Fez-se o ajuste de cada parte da TCEV em momentos separados. Para a cauda inferior da distribuição foi utilizado o modelo de Gumbel com os parâmetros calculados pelo método dos momentos convencionais. Para o ajuste da cauda superior, é necessário conhecer a probabilidade de excedência $1/T_c$, onde

T_c representa o ponto a partir do qual a bacia encontra-se saturada e as suposições do método GRADDEX são tidas como válidas. Para a bacia do rio Pará, o quantil referente ao ponto de saturação foi estimado como a mediana dos 5 maiores valores da série de volumes, de modo a evitar eventuais influências de pontos atípicos elevados. Desta forma, obteve-se $1/T_c = 1/43$.

Os resultados encontrados para o ajuste da distribuição dos volumes, expressos em $(m^3/s).dia$, foram: $\hat{\theta}_1 = 25,703$, $\hat{\theta}_2 = 118,470$, $\hat{\Lambda}_1 = 23,289$ e $\hat{\Lambda}_2 = 0,105$. Observe que os parâmetros de escala das caudas superiores das distribuições das chuvas e dos volumes são idênticas.

A figura 5 mostra a distribuição dos volumes de cheia de 8 dias de duração. Nessa figura, mostra-se também a cauda superior da distribuição da chuva.

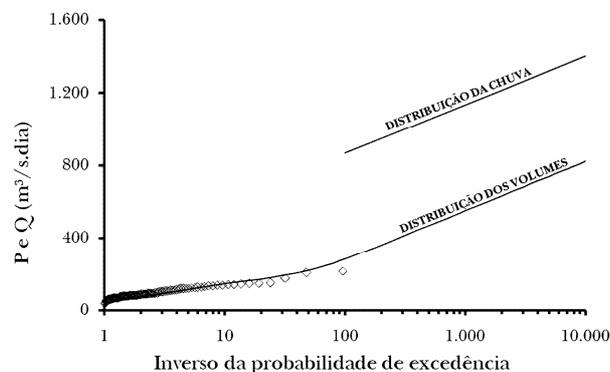


Figura 5 – Distribuição dos volumes de cheia e de precipitação para a bacia do rio Pará.

Distribuição das vazões de pico

A distribuição dos picos condicionados aos volumes e a distribuição dos volumes foram combinadas, por meio das equações 5 e 6, para se obter a distribuição anual das vazões médias diárias máximas. A integral da equação 6 foi resolvida numericamente através do método de integração de Romberg. A figura 6 mostra a distribuição dos picos condicionados aos volumes, para alguns valores de Y_p , calculada por meio da equação 16.

A figura 7 mostra os dados observados de máximas anuais de vazão para Ponte do Vilela, com posição de plotagem de Gringorten, e a distribuição anual das vazões médias diárias máximas dada pelas equações 5 e 6.

Para detalhes adicionais sobre a presente aplicação do método PVP, o leitor deve remeter-se a Fernandes (2005).

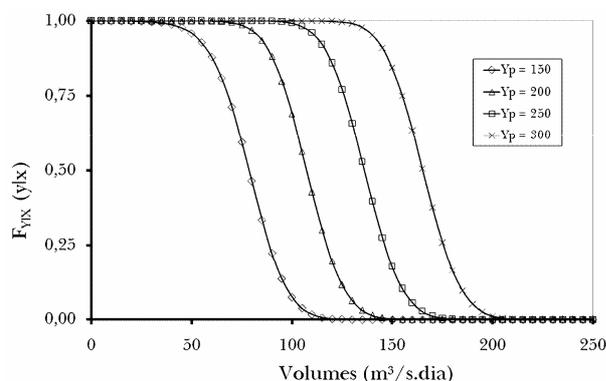


Figura 6 – Distribuição dos picos condicionados aos volumes.

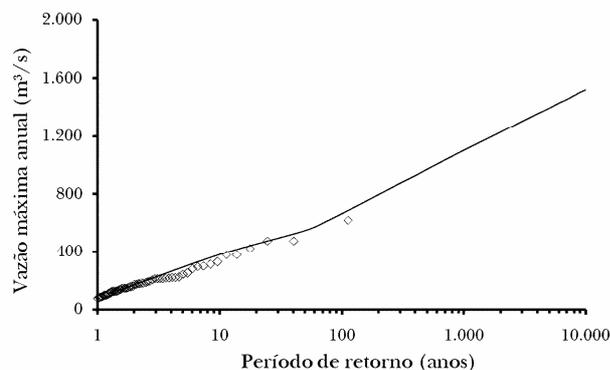


Figura 7 – Vazão máxima anual versus período de retorno em Ponte do Vilela.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A curva de quantis apresentada na figura 7 deve ser analisada sob o ponto de vista de outras metodologias de cálculo de vazão máxima. Desta forma, foram selecionadas 4 metodologias distintas para efeito de comparação. São elas:

1. Simulação (SIM): Lima (2004) desenvolveu uma metodologia que utiliza um modelo de geração de chuva e um modelo de transformação chuva-vazão de forma integrada, que permite obter séries extensas de vazão para uma determinada bacia. Foi utilizado um modelo estocástico para geração de sé-

ries de chuva e posteriormente foram geradas séries de vazão simuladas a partir do modelo RIO GRANDE (Naghetini et al., 2002) para a bacia do rio Pará.

2. Análise de frequência convencional (AFC): Ajuste da distribuição GEV aos máximos anuais de vazão da estação Ponte do Vilela por meio do método dos momentos-L.
3. Regionalização por momentos-L (RML): CPRM (2001) fez um estudo de regionalização de vazões máximas anuais numa área que abrange a bacia do rio Pará. O cálculo dos quantis máximos de vazão foi feito empregando-se a metodologia proposta por Hosking & Wallis (1997).
4. Análise de frequência da série de duração parcial (POT): Ajuste do modelo clássico de Poisson-Pareto à série de duração parcial de vazões.

A tabela a seguir resume os valores encontrados:

Tabela 2 – Quantis para a bacia do rio Pará segundo várias metodologias de cálculo.

T (anos)	Quantis (m³/s)				
	SIM	AFC	RML	POT	PVP
50	431,0	527,6	445,0	386,7	585,7
100	492,0	640,0	521,0	448,0	721,9
1000	764,0	1167,7	868,5	687,6	1157,5
10000	1207,0	2056,4	1434,6	995,6	1580,5

Observa-se uma grande variação entre os valores. Para o quantil de 10.000 anos de período de retorno, a metodologia do PVP se aproxima bastante dos resultados obtidos pela regionalização por momentos-L. Esse fato pode ser visto como uma vantagem a favor da metodologia proposta neste trabalho, uma vez que diversos autores preconizam o uso das estatísticas-L regionais para a determinação de quantis extremos de vazão.

Desta forma, pode-se considerar, mesmo que de maneira subjetiva, que a metodologia do PVP proporciona uma boa estimativa de quantis extremos. Além disso, a metodologia do PVP foi estruturada de forma a utilizar os três princípios indicados pelo NRC (1988) para incrementar a análise de frequência. Assim, espera-se que a utilização de mais informações produza uma melhor precisão dos quantis extremos, muito embora, não tenha sido analisado, neste trabalho, o efeito da inclusão de

novas fontes de incertezas na estimativa dos quantis. Como complementação a esta pesquisa, poderia ser desenvolvido um método de Monte Carlo para avaliar o efeito da inclusão de novas informações na análise.

As diferentes estimativas de enchentes da tabela 2 são o reflexo das incertezas inerentes ao modo como cada método de estimação trata a aleatoriedade presente nas amostras. O fato que os dados de enchentes constituem amostras de tamanho típico entre 40 e 60, além de serem esparsamente distribuídos em uma área geográfica, obviamente traz subjetividade à análise estatística e produz estimativas pouco confiáveis de quantis extremos. Nesse contexto, é difícil quantificar a confiabilidade das estimativas de parâmetros e quantis por qualquer método de estimação, particularmente aqueles resultantes da aplicação do método PVP. A despeito disso, o método PVP é aqui considerado como uma alternativa válida à análise de freqüência convencional local, dentro de um contexto de busca da maior suficiência dos estimadores de quantis extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – ao projeto CRA576/01, do qual a presente pesquisa é parte integrante. Os autores também agradecem às contribuições dos revisores anônimos.

REFERÊNCIAS

- BENITO, G., THORNDYCRAFT, V. R. Systematic, Paleoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation – Methodological Guidelines, CSIC – Centro de Ciências Medioambientales, Madrid, Spain, 2004.
- BERAN, M., HOSKING, J. R. M. & ARNELL, N. Comment on – Two component extreme value distribution for flood frequency analysis – by F. Rossi, M. Fiorentino and P. Versace, *Water Resource Research*, 22(2), p. 263-266, 1986.
- BRADLEY, A. A. & POTTER, K. W. Flood frequency analysis of simulated flows, *Water Resources Research*, 28(9), p. 2375-2385, 1992.
- CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots, *Journal of American Statistical Association*, 74(368), p. 829-836, 1979.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Regionalização de vazões. Sub-Bacias 40 e 41: Relatório Final. Vazões Máximas. Vol. 4, CPRM/ANEEL. Belo Horizonte, 2001.
- DUAN, Q. A Global Optimization Strategy for Efficient and Effective Calibration of Hydrologic Models, PhD thesis, University of Arizona, 1991.
- DUBAND, D., MICHEL, C., GARROS, H. & ASTIER, J. Estimating extreme value floods and the design flood by the gradex method. In: *Proceedings of the 16th International Congress on Large Dams*, p. 1009-1047, San Francisco, California, 1988.
- FERNANDES, W. S. Metodologia Unificada para Análise de Freqüência de Vazões Máximas Anuais a partir da Agregação da Informação Hidrometeorológica Regionalizada, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- FERNANDES, W. S., NAGHETTINI, M. C. Relação adimensional entre vazões médias diárias máximas e volumes de cheia para a bacia do rio Pará, no estado de Minas Gerais. In: *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2005, João Pessoa (PB). *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Integrando a Gestão de Águas às Políticas Sociais e de Desenvolvimento Econômico*, 2005.
- FIORENTINO, M., GABRIELE, S., ROSSI, F. & VERSACE, P. Hierarchical approach for regional flood frequency analysis. In: *Regional Flood Frequency Analysis*, V. P. Singh (ed.), Reidel, Dordrecht, p. 35-49, 1987.
- GABRIELE, S. & ARNELL, N. W. A hierarchical approach to regional flood frequency analysis, *Water Resources Research*, 26(6), p. 1281-1289, 1991.
- GUILLOT, P. & DUBAND, D. La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. In: *Floods and their computation – Proceedings of the Leningrad Symposium*, p. 560-569, IASH Publication no. 84, 1967.
- HOSKING, J. R. M. & WALLIS, J. R. *Regional Frequency Analysis - an approach based on L moments*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- LIMA, A. A. Metodologia integrada para determinação da enchente de projeto de estruturas hidráulicas por meio de séries sintéticas de precipitação e modelos chuva-vazão, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- NAGHETTINI, M. C., POTTER, K. W., ILLANGASEKARE, T. Estimating the upper-tail of flood-peak frequency distributions using hydrometeorological information. *Wa-*

- ter Resources Research, Washington, v. 32, n. 6, p. 1729-1740, 1996.
- NAGHETTINI, M. C., NASCIMENTO, N. O., THIMOTTI, T., LIMA, A. A. & SILVA, F. E. O. Modelo Rio Grande de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo: Formulação Teórica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 2002.
- NRC - National Research Council. Estimating Probabilities of Extreme Floods, National Academy Press, Washington, DC, 1988.
- ROGERS, W. F., A practical model for linear and nonlinear runoff, *Journal of Hydrology*, vol. 46, p. 51-78, 1980.
- SINGH, V. P. & AMINIAN, H. An empirical relation between volume and peak of direct runoff, *Water Resources Bulletin*, 22 (5), p. 725-730, 1986.
- SWAIN, R. E., ENGLAND, J. F., BULLARD, K. L., & RAFF, D. A. Hydrologic hazard curve estimating procedures. Dam Safety Research Program Research Report DSO-04-08, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 79 p., 2004.
- TODOROVIC, P. & ZELENHASIC, E. A stochastic model for flood analysis. *Water Resources Research*, 6(6), p. 411-424, 1970.

flood-volumes. This aggregation uses some premises on rainfall-runoff transformation, under extreme conditions.

Key-words: Extreme floods, flood frequency analysis, rare hydrological events.

An Integrated Methodology for Flood-Peak and Flood-Volume Frequency Analysis by Incorporating the Regional Hydrometeorological Information

ABSTRACT

In 1988 the U.S. National Research Council (NRC, 1988) identified three principles to be followed in order to improve estimation of extreme flood quantiles. These are: “substitution of time for space”, “inclusion of more structure into the employed models”, and “emphasis on the upper tails of probability distributions”. The methodology proposed herein uses the three principles mentioned in a unified context. According to it, the flood peaks that have exceeded an arbitrary threshold and the associated flood volumes are identified and modeled as a marked point stochastic process, using the representation of a compound Poisson process. The essence of the proposed method consists of separately estimating the marginal density function of flood volumes, for a duration equal to the watershed time base, and the density function of flood peaks conditioned to volumes. Next, the annual probability distribution of flood peaks can be estimated by integrating the product of both densities. The aggregation of the regional hydrometeorological information, through a regional TCEV (Two-Component Extreme Value) distribution, is for the purpose of guiding the estimation of the density function of