

# INCERTEZAS DA ESTIMATIVA DA MÁXIMA VAZÃO DIÁRIA EM FUNÇÃO DA EXTENSÃO DA SÉRIE HIDROLÓGICA: RESULTADOS PRELIMINARES

*Guilherme Garcia de Oliveira<sup>1</sup>*

**Resumo** - O objetivo deste estudo é avaliar as incertezas da estimativa da vazão diária máxima em diferentes tempos de retorno (TRs), em função da extensão das séries hidrológicas. A metodologia foi aplicada em 20 postos fluviométricos, em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Foram geradas séries sintéticas anuais (de 50.000 anos) de vazões máximas a partir do ajuste da distribuição de Gumbel. Em seguida, foram selecionadas todas as combinações possíveis de séries parciais (amostras de 5 a 100 anos), para a estimativa da vazão máxima com TR entre 2 e 10.000 anos, para comparação com os valores obtidos pela série sintética completa. Alguns dos resultados observados foram: i) ao dispor de 10 anos de registros, a incerteza na estimativa da vazão máxima variou entre 61% e 97% (TRs: 2 e 10.000 anos, respectivamente); ii) para séries hidrológicas mais extensas (100 anos), a incerteza é bem inferior (entre 19% e 34%). Com base nos resultados obtidos, chegou-se à conclusão de que qualquer estimativa de vazão máxima, principalmente quando se dispõe de poucos registros, ou quando se deseja calcular a vazão em TRs superiores a 500 anos, deve ser considerada imprecisa, com incertezas que, muitas vezes, superam em 30% a vazão máxima.

**Palavras-chave** - Distribuição de Probabilidades de Gumbel; Processos Estocásticos; Hidrologia Estatística.

## UNCERTAINTY OF ESTIMATED OF MAXIMUM DAILY FLOW IN FUNCTION OF HYDROLOGICAL SERIES EXTENSION: PRELIMINARY RESULTS

**Abstract** - The aim of this study is to assess the uncertainties of the estimated maximum daily flow at different return periods (RP's), depending on the extent of hydrological series. The methodology was applied to 20 gauge sites in basins of Rio Grande do Sul State. Synthetic series of maximum flow were generated annually (50,000 years) from the adjustment of the Gumbel distribution. Then, all combinations of partial series (samples from 5 to 100 years) were selected to estimate the maximum flow with RP between 2 and 10,000 years for comparison with the values obtained by synthetic complete series. Some of the results were: i) to have 10 years of records, the uncertainty in estimating the flow rate varied between 61% and 97% (RP's: 2 and 10,000 years, respectively), ii) to more extensive hydrological series (100 years), the uncertainty is much lower (between 19% and 34%). Based on the results obtained, we reached the conclusion that any estimate of maximum flow should be considered imprecise, often, with uncertainties greater than 30% of maximum flow, especially when there are few records, or when you want to calculate the flow in RP's over 500 years.

**Keywords** - Gumbel Distribution Probability; Stochastic Processes; Statistical Hydrology.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), e-mail: g.g.oliveira10@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

A vazão máxima de um corpo hídrico pode ser definida como um valor extremo, associado a um intervalo de tempo e a um risco de ser igualado ou superado (Tucci e Silveira, 2007). No Brasil, a maioria das séries hidrológicas apresenta um intervalo de tempo diário, isto é, com apenas uma ou duas medidas por dia. Quanto ao risco, para cada obra hidráulica é admitido um valor diferente, normalmente expresso em tempos de retorno (TRs) - o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou superado. Para bueiros, por exemplo, pode-se admitir um risco maior, adotando-se um TR entre 2 e 10 anos. Já para o dimensionamento de vertedores de grandes barragens, tendo em vista as graves consequências de um rompimento, o risco admitido deve ser mínimo, havendo a necessidade de se estimar a vazão máxima com TR de até 10.000 anos (Villela e Mattos, 1975).

Assim, fica evidente que a estimativa das vazões máximas é de extrema importância para o dimensionamento de obras hidráulicas, principalmente no que diz respeito à determinação dos custos e da segurança dos projetos de engenharia (Tucci e Silveira, 2007). Além disso, esta estimativa pode servir de base para a aplicação de outras medidas, como o mapeamento de áreas atingidas por inundações, visando o alerta ou o planejamento de uma região, bacia ou município.

Na literatura científica em hidrologia, são verificados diversos métodos para a estimativa de vazões máximas, os quais podem ser divididos em abordagens determinísticas, a partir de modelos hidrológicos, ou abordagens probabilísticas (estatísticas), baseadas em séries históricas. Os modelos hidrológicos são utilizados, geralmente, quando não se dispõe de registros históricos de vazão, ou quando estes são insuficientes, isto é, com pouca representatividade temporal. Por outro lado, os métodos estatísticos são comumente utilizados quando se dispõe de um posto fluviométrico na área de estudo, com uma extensa série de dados de vazão.

A abordagem probabilística compreende, de modo geral: i) a organização de uma série de máximas vazões anuais, baseada nos valores observados durante um intervalo de tempo representativo; ii) o ajuste de uma distribuição de probabilidades e; iii) a estimativa da vazão máxima por TR. As distribuições de Gumbel, Log-Normal, Pearson Tipo III e a Gama Tipo III são algumas das mais utilizadas em hidrologia para a estimativa de vazões máximas (Naghettini e Pinto, 2007). São exemplos de estudos que estimam a vazão máxima através de modelos probabilísticos: Langbein (1949), Chow (1951), Gumbel (1958), Haan (1977), Bobée e Robitaille (1977), Kite (1988) e Rai *et al.* (2009).

Embora existam diversos estudos centrados na estimativa das vazões máximas através de métodos probabilísticos, a avaliação dos resultados e das incertezas não é comumente realizada, principalmente quando a estimativa é realizada para TRs muito elevados. Tal avaliação se torna possível ao considerar que a sequência de vazões máximas anuais é um processo estocástico, de ocorrência aleatória, regido por leis da probabilidade, conforme a definição proposta por Salas *et al.* (1980). Sob esta abordagem, não só é possível avaliar a estimativa da vazão máxima, como também é possível estudar as incertezas desta estimativa em função da extensão da série hidrológica, bastando apenas gerar uma série sintética extensa de vazões máximas anuais.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar as incertezas da estimativa da máxima vazão diária em diferentes TRs, em função da extensão das séries hidrológicas. Esta avaliação baseou-se em uma abordagem estocástica, que possibilita, a partir de séries sintéticas de longa duração, calcular a precisão e o intervalo de confiança da estimativa de vazão máxima em função do número de anos de registros hidrológicos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi aplicada em 20 postos fluviométricos localizados nas bacias hidrográficas dos rios Uruguai, Ijuí, Ibicuí, Jacuí, Taquari, e das lagoas dos Patos e Mirim (Figura 1). A área de drenagem das sub-bacias que contribuem para cada posto varia de 57 a 95.200 km<sup>2</sup>, compreendendo características morfométricas distintas. A média das vazões diárias máximas anuais varia de 50 a 17.193 m<sup>3</sup>/s, do posto Ipiranga (57 km<sup>2</sup>) ao posto Porto Lucena (95.200 km<sup>2</sup>). Todos os postos fluviométricos utilizados apresentam séries hidrológicas de vazão diária, com dados disponíveis para *download* no portal Hidroweb, organizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). A Tabela 1 apresenta uma breve descrição dos postos fluviométricos.

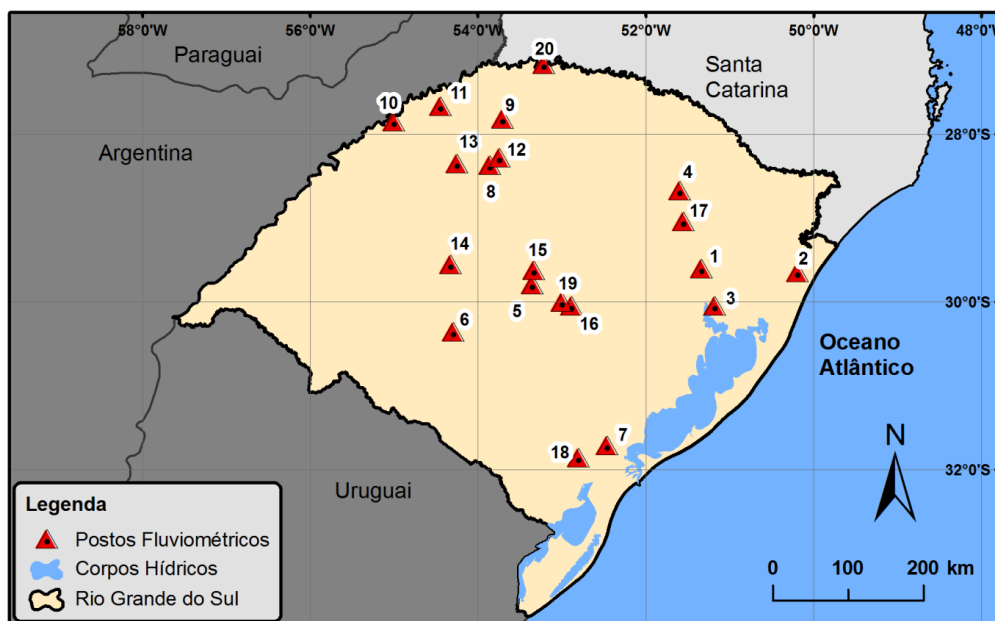


Figura 1 - Localização dos postos fluviométricos utilizados.

Tabela 1 - Descrição dos postos fluviométricos utilizados no estudo.

Id	Nome do Posto (Hidroweb)	Bacia Hidrográfica	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Latitude	Longitude
1	Costa do Rio Cadeia	Rio Cadeia	870	-29,6072	-51,3511
2	Maquiné	Rio Maquiné	442	-29,6519	-50,2092
3	Ipiranga	Arroio Dilúvio	57	-30,0489	-51,1967
4	Ponte do Prata	Rio Prata	317	-28,6775	-51,6081
5	Restinga Seca	Rio Vacacaí-Mirim	932	-29,8008	-53,3686
6	Ponte São Gabriel	Rio Vacacaí	965	-30,3597	-54,3133
7	Passo dos Carros	Arroio Fragata	131	-31,7139	-52,4767
8	Ponte Nova do Potiribu	Rio Potiribu	609	-28,3772	-53,8756
9	Ponte do Rio Turvo	Rio Turvo	502	-27,8219	-53,7275
10	Porto Lucena	Rio Uruguai	95.200	-27,8544	-55,0225
11	Tucunduva	Rio Santa Rosa	1.140	-27,6742	-54,4625
12	Passo Faxinal	Rio Ijuí	1.940	-28,2869	-53,7642
13	Santo Ângelo	Rio Ijuí	5.440	-28,3553	-54,2683
14	Vila Clara	Rio Toropi	2.790	-29,5561	-54,3422
15	Dona Francisca	Rio Jacuí	14.000	-29,6275	-53,3533
16	Cachoeira	Rio Jacuí	30.700	-30,0500	-52,9000
17	Ponte do Rio das Antas	Rio das Antas	12.500	-29,0450	-51,5669
18	Pedro Osório	Rio Piratini	4.700	-31,8611	-52,8169
19	Passo São Lourenço	Rio Jacuí	27.300	-30,0089	-53,0150
20	Iraí	Rio Uruguai	61.900	-27,1736	-53,2292

O procedimento metodológico pode ser resumido nas seguintes etapas (Figura 2):

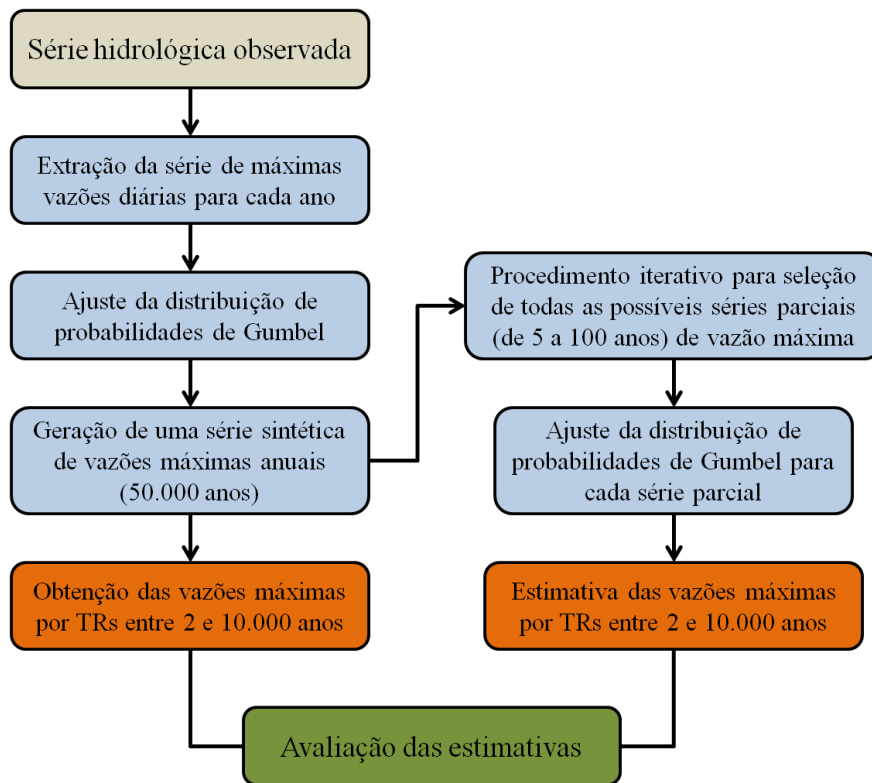


Figura 2 - Resumo do procedimento metodológico adotado para a avaliação da estimativa de vazões máximas, utilizando como referência cada uma das 20 séries hidrológicas observadas.

i) obtenção da série de máximas vazões diárias: para cada uma das 20 séries históricas, foram extraídas as máximas vazões diárias em cada ano, resultando em uma série de máximos anuais com dimensão igual à extensão de cada série observada nos postos fluviométricos.

ii) ajuste da distribuição de probabilidades de Gumbel: esta etapa compreendeu o ajuste da distribuição de Gumbel (Gumbel, 1958), às séries de vazão máxima anual. Para o ajuste desta distribuição de probabilidades, é necessário extrair a média ( $\mu$ ) e a variância ( $s^2$ ) do conjunto amostral de vazões para calcular os parâmetros de escala ( $\vartheta$ ), Equação 1, e de forma ( $\beta$ ), Equação 2. Em seguida, para qualquer probabilidade ( $P$ ) de ocorrência é possível calcular a vazão máxima ( $Q_{max}$ ) utilizando a Equação 3.

$$\vartheta = \frac{\sqrt{6 s^2}}{\pi} \quad (1)$$

$$\beta = \mu - 0,5772 \vartheta \quad (2)$$

$$Q_{max} = \beta - \vartheta \cdot \ln[-\ln(1 - P)] \quad (3)$$

iii) geração da série sintética de vazões máximas anuais: nesta etapa, foi desenvolvido um programa, no MatLab R2010a, que gera uma sequência de 50.000 números pseudoaleatórios, com distribuição uniforme, entre 0 e 1, representando a probabilidade de ocorrência ( $P$ ) das vazões máximas. Deste modo, utilizando a Equação 3, é possível obter uma série sintética de vazões máximas anuais, substituindo  $P$  pelo número pseudoaleatório. Este procedimento foi repetido para cada posto fluviométrico, com características diversas de média e de variância.

iv) obtenção das vazões máximas por TRs: a partir de cada série sintética de 50.000 anos de vazões máximas anuais, foram obtidas as vazões máximas por TRs de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 500, 1.000, 5.000 e 10.000 anos, utilizando a fórmula de Gumbel (Eq. 1, 2 e 3).

v) procedimento iterativo para seleção de séries parciais de vazão máxima: esta etapa também foi desenvolvida em MatLab. O procedimento consiste em selecionar todas as séries parciais possíveis (com registros consecutivos) de  $n$  extensão em anos, com  $n$  variando entre 5 e 100 anos, a partir da série sintética de 50.000 anos. Este procedimento simula o que ocorre na prática com as séries observadas, na qual dispomos de apenas um conjunto limitado de amostras em relação à totalidade de registros. Deste modo, foram geradas milhares de séries parciais de 5 a 100 anos de valores máximos anuais.

vi) ajuste da distribuição probabilística e estimativa das vazões máximas por TRs: em seguida, para cada uma das milhares de séries parciais, com diferentes extensões, foi ajustada a mesma distribuição estatística de Gumbel, através do cálculo da média e da variância e da aplicação das Equações 1, 2 e 3. Deste modo, é possível estimar as vazões máximas para os mesmos TRs utilizados na etapa iv, constituindo-se em um conjunto de valores de vazão para cada série parcial.

vii) avaliação das estimativas e análise das incertezas: por fim, na última etapa, foi realizada uma análise preliminar das incertezas relacionadas à estimativa de vazões máximas, considerando as séries parciais de 5 a 100 anos de extensão. Estas estimativas foram comparadas com as vazões obtidas na série sintética de 50.000 anos. Como se dispõe de milhares de valores de  $Q_{max}$  (uma para cada série parcial e TR), a análise foi realizada com a extração de intervalos de confiança, com nível de 95% de significância. Para tornar a medida de precisão adimensional, para comparação entre os postos, a amplitude do intervalo de confiança (limite superior–inferior) foi dividida pela  $Q_{max}$  obtida pela série sintética, resultando em um valor percentual que pode ser considerado como a incerteza da estimativa de  $Q_{max}$ .

Deve-se esclarecer que os valores obtidos quanto aos limites de confiança e à precisão da estimativa da  $Q_{max}$  podem ser considerados otimistas, tendo em vista que foi adotada a mesma distribuição de probabilidades para a estimativa da série de referência (sintética) e das séries amostrais. Na prática, isto significa que os resultados, que serão apresentados a seguir, se referem à estimativa de vazões onde se conhece o modelo probabilístico que representa com total fidelidade a frequência das vazões máximas observadas, o que não é possível conhecer na realidade.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A partir dos procedimentos metodológicos descritos no item anterior, foi obtido um conjunto de resultados preliminares, os quais serão brevemente apresentados e discutidos neste item.

O primeiro deles diz respeito à variação da incerteza média (dos 20 postos) na estimativa de  $Q_{max}$  para diferentes TRs, em função da extensão da série parcial (Figura 3). Verificou-se uma tendência de redução das incertezas à medida que aumenta a extensão das séries parciais (amostras) e reduz o TR (Figuras 3 e 4). Utilizando apenas 10 anos de registros, a incerteza na estimativa de  $Q_{max}$  varia entre 61% (TR = 2 anos) e 97% (TR = 10.000 anos). Para os mesmos TRs, ao utilizar 20 anos de registros, a incerteza reduz significativamente, variando entre 43% e 72%. Considerando 100 anos de registros, a incerteza oscila entre 19% (TR = 2 anos) e 34% (TR = 10.000 anos).

Deste modo, é possível afirmar que na estimativa da  $Q_{max}$  com TR de 10.000, valor utilizado para o dimensionamento de vertedores de grandes barragens, por exemplo, as incertezas podem oscilar entre 34%, na hipótese de se ter aproximadamente 100 anos de registros, e 133%, com

disponibilidade de apenas 5 anos de extensão da série. Além disso, deve-se lembrar que estes percentuais são otimistas, tendo em vista que, no presente método de análise, considera-se conhecida a distribuição de probabilidades da  $Q_{max}$ , o que em situações reais não ocorre, implicando em ainda mais incertezas à estimativa de  $Q_{max}$ .

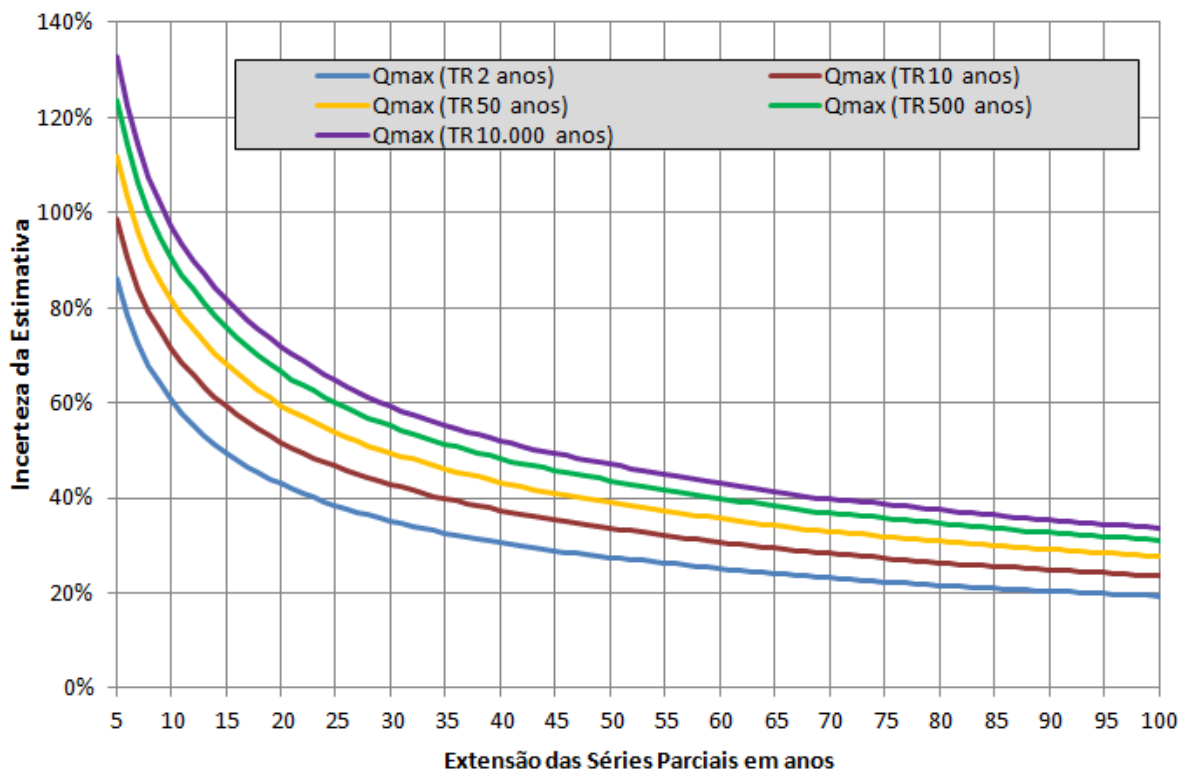


Figura 3 – Incerteza na estimativa da  $Q_{max}$  em função da extensão da série parcial - TR de 2, 10, 50, 500 e 10000 anos.

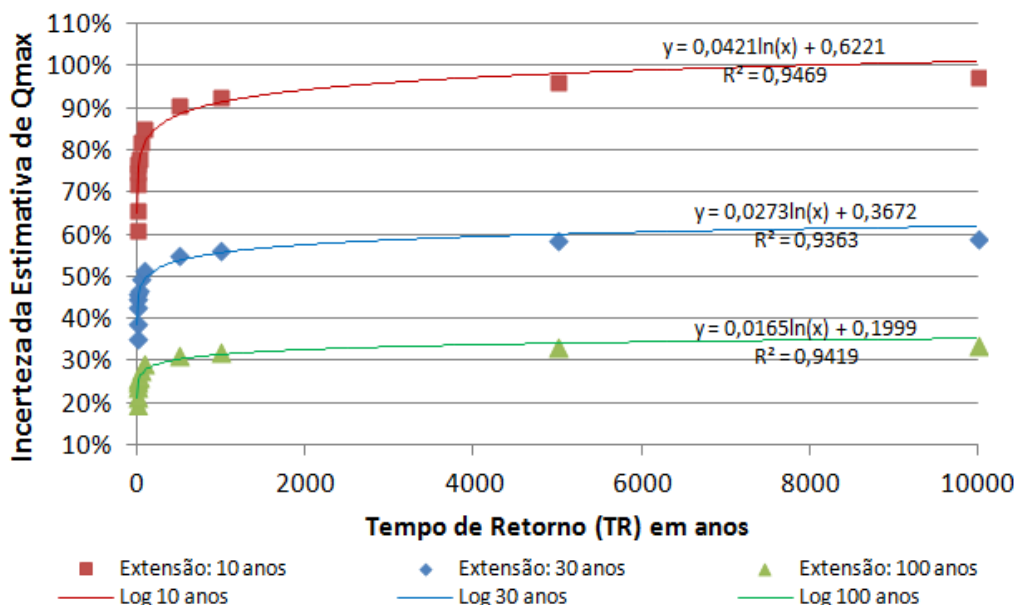


Figura 4 – Incerteza na estimativa da  $Q_{max}$  em função do TR, para extensão de série de 10, 30 e 100 anos.

Adotando-se como limiar tolerável de incerteza o valor de 30% (margem de erro de 15% para mais ou para menos), pode-se estimar, com base nos resultados obtidos neste experimento, que são

necessários, em média, 94 anos de registros para uma razoável estimativa da  $Q_{max}$  com TR de 100 anos. Para TRs superiores a 500 anos, seria necessário mais de 100 anos de registros para se obter uma estimativa de  $Q_{max}$  respeitando o limiar de 30% de incerteza. Logo, as estimativas de vazões máximas apresentam um significativo grau de imprecisão, que deveria ser considerado no dimensionamento de obras hidráulicas para aumentar a segurança e reduzir ainda mais o risco à população.

Outro resultado que deve ser ressaltado é que o aumento no número de amostras influencia na redução da incerteza de modo mais acentuado quando se pretende estimar a  $Q_{max}$  em TRs extremos, como para 10.000 anos. No intervalo entre 10 e 30 anos de extensão da série, ocorre uma redução nas incertezas de 1,27% (TR = 2 anos) a 1,9% (TR = 10.000 anos) para cada ano a mais de registros de vazão. Já no intervalo entre 30 e 50 anos de extensão da série, ocorre uma redução nas incertezas de 0,38% (TR = 2 anos) a 0,61% (TR = 10.000 anos) para cada ano a mais de registros.

É importante destacar também que não foi verificada nenhuma relação entre as incertezas observadas e a área de drenagem de cada posto. Porém, uma relação foi identificada entre as incertezas e o coeficiente de variação (CV) – razão entre o desvio padrão e a média da  $Q_{max}$  –, calculado para cada posto. À medida que aumenta o valor de CV, isto é, a dispersão da  $Q_{max}$  anual, aumenta também a incerteza na estimativa da  $Q_{max}$ . De modo geral, esta tendência (algumas vezes – linear) foi observada para todos os TRs calculados, em diferentes cenários de extensão de registros nas séries parciais. A Figura 5 ilustra esse comportamento considerando séries com 30 anos de registros de  $Q_{max}$ , para TRs de 2, 50 e 10.000 anos.

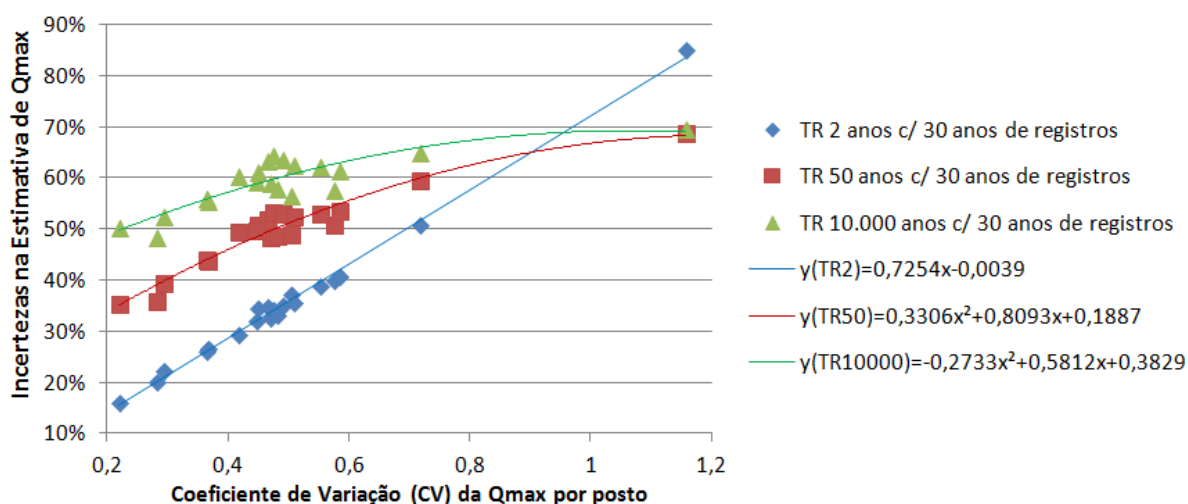


Figura 5 – Relação entre a incerteza na estimativa de  $Q_{max}$  e o coeficiente de variação da  $Q_{max}$  cada posto: considerando as séries parciais com extensão de 30 anos e TRs de 2, 50 e 10.000 anos.

O posto com menor CV é o de nº 19, Passo São Lourenço ( $Q_{max}$ , TR de 2 anos, igual a 2.589  $m^3/s$ ), com CV amostral da  $Q_{max}$  igual a 0,22. Para este posto, a estimativa de  $Q_{max}$  com TR de 2 anos apresentou um índice de incerteza entre 9%, considerando 100 anos de amostra, com intervalo de confiança (IC) da  $Q_{max}$  (95% de significância) entre 2.480 e 2.714  $m^3/s$ , e 38% (amostras de 5 anos), com IC entre 2.151 e 3.142  $m^3/s$ . Considerando um TR de 10.000 anos ( $Q_{max}$  igual a 6.421  $m^3/s$ ), este índice oscilou entre 27% (com IC entre 5.658 e 7.386  $m^3/s$ ) e 105% (com IC entre 3.546 e 10.315  $m^3/s$ ), para os mesmos tamanhos de amostra (100 e 5 anos, respectivamente).

Assim, é possível, em alguns casos, quando o valor de CV for suficientemente pequeno (<0,25), estimar com razoável precisão (<30% de incerteza) a  $Q_{max}$  com TR de 10.000 anos, desde

que se disponha de mais de 80 anos de registros de vazão (amostras). Para todos os outros casos, que se constituem na grande maioria, pode-se afirmar que a incerteza relacionada à estimativa de  $Q_{max}$  com TRs superiores a 500 anos é muito grande, sendo necessário adotar um valor um pouco superior para a segurança de uma determinada obra hidráulica.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que é possível avaliar a incerteza associada à estimativa da vazão máxima em diferentes TRs, considerando diversos tamanhos de amostras. A metodologia se mostrou adequada, de fácil desenvolvimento, e pode ser aplicada sempre que seja necessário e prudente obter uma estimativa de erro do modelo de vazões máximas.

Com base nos resultados obtidos, chegou-se a conclusão de que qualquer estimativa de vazão extrema, principalmente quando se dispõe de poucos dados observados, ou quando se deseja estimar para TRs muito grandes (>500 anos), deve ser considerada imprecisa, com incertezas que, na maioria das vezes, superam em 30% o verdadeiro valor de vazão máxima.

De acordo com o experimento realizado neste estudo, por exemplo, ao dispor de apenas 10 anos de registros, a incerteza na estimativa de  $Q_{max}$  deve variar entre 61% e 97%, sendo crescente à medida que aumenta o TR. Para séries hidrológicas mais extensas, por exemplo, com 100 anos de registros, a incerteza é bem inferior, oscilando entre 19% e 34%, para TRs entre 2 e 10.000 anos.

#### REFERÊNCIAS

- BOBÉE, B.; ROBITAILLE, R. (1977). The Use of The Pearson Type 3 Distribution an Log Pearson Type 3 Distribution Revisited. *Water Resources Research*, Vol. 13, nº. 2, p.427-443.
- CHOW, V. T. (1951). A General Formula for Hydrology Frequency Analysis. *Trans. AGU*, Vol. 32, nº. 2, p.231-237.
- GUMBEL, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. New York: Columbia University Press, 375p.
- HAAN, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 378p.
- KITE, G. W. (1988). *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Water Resources Publications: Littleton. Colorado. USA, 266p.
- LANGBEIN, W. B. (1949). Annual Floods and the Partial Duration Floods Series. *Trans. AGU*, Vol. 30, nº. 6, p.879-881.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 552p.
- RAI, R. K.; SARKAR, S.; SINGH, V. P. (2009). Evaluation of the Adequacy of Statistical Distribution Functions for Deriving Unit Hydrograph. *Water Resources Management*. Vol. 23, nº. 5, p.899-929.
- SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications: Littleton, Colorado, U.S.A., 484p.
- TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (Org.). (2007). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 943p.
- VILLELA S. M.; MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. 1ª ed., São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p.