

ANÁLISE E MODELAGEM ESTATÍSTICA NÃO-ESTACIONÁRIA DE CHEIAS SAZONAIS

Camila Santos Bueno da Silva¹; Sarah Lopes dos Anjos²; Carlos H. R. Lima³

RESUMO --- Cheias tem causado elevadas perdas humanas e materiais em todo o mundo, em particular no Brasil nos últimos anos. O entendimento e modelagem dos padrões espaço-temporais desses eventos extremos são partes de uma metodologia tradicional de estudos em Hidrologia que tem sido questionada num contexto de mudanças climáticas e de uso do solo. Tradicionalmente, a análise de frequência de cheias (FFA) tem como base a suposição de estacionariedade da série temporal de picos de vazão. Com a urbanização, o crescimento populacional e mudanças climáticas globais essa premissa pode deixar de ser válida em algumas regiões. Nesse sentido, este trabalho tem como foco o estudo da estacionariedade de uma série de máximos sazonais de vazão de um posto localizado na bacia do Paranapanema com o ajuste de uma distribuição Gumbel não-estacionária, onde os parâmetros de posição e escala variam com o tempo. Os resultados obtidos mostram uma tendência positiva em ambos os parâmetros e significativas variações nos quantis de cheia ao longo do tempo, sugerindo uma nova direção de estudos para o gerenciamento do risco de cheias.

ABSTRACT --- Flood events have caused several human losses and material damages all over the world, particularly in Brazil in the last years. The understanding and modeling of the spatio-temporal patterns of those events are part of a traditional methodology in Hydrology that has been questioned in a framework of climate and soil use changes. Historically, flood frequency analysis (FFA) has been based on the assumption of stationarity of the flood flow series. However, urban and human development as well as global climate changes may lead to conditions where this assumption may not hold for some regions. This paper focuses on the study and modeling of a seasonal flow maximum series in a gauge located in the Paranapanema basin. A Gumbel distribution with non-stationary location and scale parameters is fit to the data. The results show a monotonic trend in both parameters and significant changes in the time varying flood quantiles, suggesting a new direction for the flood risk management.

Palavras-chave: não-estacionariedade, análise de frequência de cheias, hidrologia.

1) Eng^a Civil da Prime Projetos e Consultoria Ltda., CEP: 70.070-120 – Brasília – Brasil. E-mail: camila@primeprojetos.com

2) Eng^a Civil da Prime Projetos e Consultoria Ltda., CEP: 70.070-120 – Brasília – Brasil. E-mail: sarah@primeprojetos.com

3) Prof. Adjunto. Depto. de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. E-mail: chrlima@unb.br

1 - INTRODUÇÃO

Eventos hidrológicos extremos figuram como o principal desastre natural no Brasil, causando elevadas perdas materiais, econômicas e de vida. Em junho de 2010, por exemplo, os estados de Alagoas e Pernambuco sofreram grandes danos advindos de eventos extremos de precipitação e enchentes em diversas cidades. Em janeiro de 2008, o rompimento da barragem da usina Espora, em Goiás, inundou plantações e danificou casas. O rompimento da barragem Algodões I, em maio de 2009, na região de Cocal, Piauí, destruiu casas e deixou dois adolescentes desaparecidos. Em janeiro de 2011 fortes chuvas causaram inundações e deslizamentos de terra na região serrana do estado do Rio de Janeiro, onde cerca de 14 mil pessoas ficaram desabrigadas e diversas perderam a vida. Nesse sentido, o estudo de eventos extremos, em particular a análise de eventos de cheias, visa, dentre outros objetivos, mitigar seus efeitos deletérios sobre a sociedade, contribuindo para um melhor planejamento das políticas públicas e dos planos das cidades. Este trabalho tem como foco principal o estudo e modelagem de séries de máximos sazonais de vazão sobre condições não-estacionárias, onde o emprego de métodos clássicos pode ser comprometido.

Os métodos estatísticos levam em conta a frequência de vazões de enchentes já observadas e a partir desses dados são ajustadas distribuições estatísticas de probabilidade para cálculo da vazão de cheia associada a um risco (ou probabilidade) admissível. Na concepção tradicional do método estatístico admite-se que as vazões são independentes, que a amostra é representativa da população e que o processo é estacionário (Tucci, 2007). Nas séries de vazões extremas geralmente ocorre independência dos dados devido ao tempo que separa cada enchente (Tucci, 2007). A representatividade da amostra depende do número de valores da série e é importante para a confiabilidade dos parâmetros que a partir dela são calculados.

O estudo de frequência de cheias requer uma base de dados suficientes, tais como séries de vazão e precipitação. Entretanto, alterações no uso do solo e na cobertura vegetal de bacias hidrográficas, assim como mudanças nos padrões climáticos regionais podem levar a mudanças temporais nas séries analisadas e, mesmo com uma quantidade relativamente grande de dados disponíveis, comprometer os estudos. Alterações como essas podem influenciar no escoamento das bacias, levando a aumentos ou diminuições graduais ou abruptos nas séries de vazões, o que pode violar a suposição básica dos métodos estatísticos tradicionais de estudo de frequência de cheias: a estacionariedade da série temporal de vazões, que é expressa basicamente pela constância dos parâmetros estatísticos da série ao longo do tempo (Tucci, 2007), que geralmente ocorre quando as características da bacia e dos padrões climáticos regionais permanecem inalterados ao longo do tempo. Assim, conclusões obtidas de dados passados podem ser *extrapoladas* para dados futuros.

Quando os dados passados podem não representar bem o comportamento futuro das séries temporais de vazão, a análise não estacionária de frequência de cheias aparece como alternativa, requerendo assim um método diferente da análise estacionária, visto os parâmetros da distribuição (e talvez a própria distribuição) variarem com o tempo e conseqüentemente as estimativas da probabilidade de excedência e de sua incerteza (Khaliq et al., 2006). Uma abordagem comum da análise não estacionária de frequência de cheias é o uso de uma extensão direta de uma função probabilística em que a distribuição em si é considerada estacionária (não variante com o tempo), mas seus parâmetros são considerados não estacionários (veja Leclerc e Ouarda, 2007; Villarini et al., 2009; Lima e Lall, 2010; Cunderlik e Burn, 2003; etc.).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral a identificação de tendências temporais e não-estacionariedade em séries de máximos sazonais de vazão e a partir daí a aplicação de um modelo estatístico de frequência de cheias que considere explicitamente a não-estacionariedade dos parâmetros da distribuição proposta. No restante do trabalho são apresentadas as características da região de estudo, as metodologias utilizadas e os resultados por elas gerados, juntamente com a discussão e análise dos mesmos.

2 – REGIÃO DE ESTUDO E DADOS HIDROLÓGICOS

Nesse estudo foi escolhido o posto fluviométrico da usina hidroelétrica (UHE) Jurumirim localizado na subbacia do rio Paranapanema, afluente da bacia do Paraná, conforme Figura 1. A bacia do rio Paranapanema drena uma área de cerca de 100.800 km².

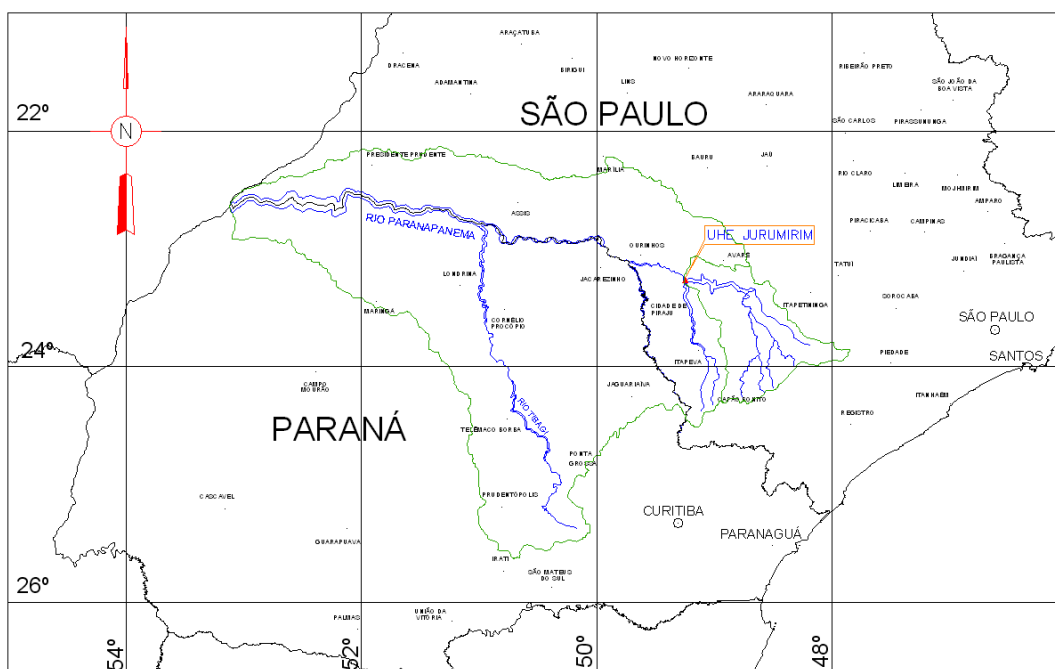


Figura 1: Bacia hidrográfica do rio Paranapanema.

Os dados de vazão diária para o posto localizado na usina hidroelétrica Jurumirim foram obtidos junto ao Operador Nacional do Sistema (ONS), sendo dados *naturalizados*, ou seja, são descontados quaisquer efeitos não-naturais à montante do local de monitoramento. Além disso, como o pico de vazão nessa região pode ocorrer em qualquer época do ano, com uma predominância nos meses de janeiro a março, utilizou-se os dados de pico de vazão sazonal (JAN-ABR) para eliminar a possibilidade de que o uso de máximos anuais leve a valores de pico de vazão pertencentes a diferentes populações e portanto a necessidade de um outro tipo de modelagem.

O posto fluviométrico estudado encontra-se instalado na Usina Hidrelétrica Jurumirim, a qual apresenta as características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características da UHE Jurumirim.

Código (ONS)	Nome	Potência (MW)	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)	Área do reservatório (km ²)
47	Jurumirim	98	23°13'00" S	49°14'00" W	17.891	458

O rio Paranapanema é um contribuinte da bacia da Usina Hidrelétrica de Itaipu, que está localizada no rio Paraná. Müller et al. (1998) analisa a estacionariedade da vazão na bacia dessa usina, concluindo que existe uma tendência positiva nessa região, a qual pode ser explicada pela precipitação na região a montante, como também pelo uso do solo. Itaipú Binacional (1995) apud Müller et al. (1998) concluíram, em síntese, que o aumento de vazões afluentes a Itaipu é permanente e que esse aumento ocorre devido ao processo de desmatamento ocorrido neste século em grande parte da bacia. Essa é a principal motivação que levou a escolha desse posto para os estudos realizados nesse trabalho.

2.1 - Análise de Tendências Temporais

Para avaliar a tendência temporal nos dados de vazão da região abordada, foram aplicados os testes de estacionariedade da regressão linear vazão vs. tempo, de Mann-Kendall e de Spearman. Para consideração do valor-*p* onde assumiu-se a hipótese nula de nenhuma tendência temporal monotônica. A análise do coeficiente angular da regressão das máximas sazonais (JAN-ABR) com o tempo também fornece parâmetros para a avaliação da estacionariedade das séries em questão, sendo essa apresentada visualmente na Figura 2. Assumindo um nível de significância $\alpha = 5\%$, observa-se que todos os testes realizados no posto de Jurumirim resultam em valores-*p* menores do que o nível de significância, o que leva a não aceitação da hipótese nula e conseqüentemente sugere fortes tendências monotônicas (não estacionariedade) na série de vazões máximas sazonais do posto em questão, confirmada também visualmente pela Figura 2.

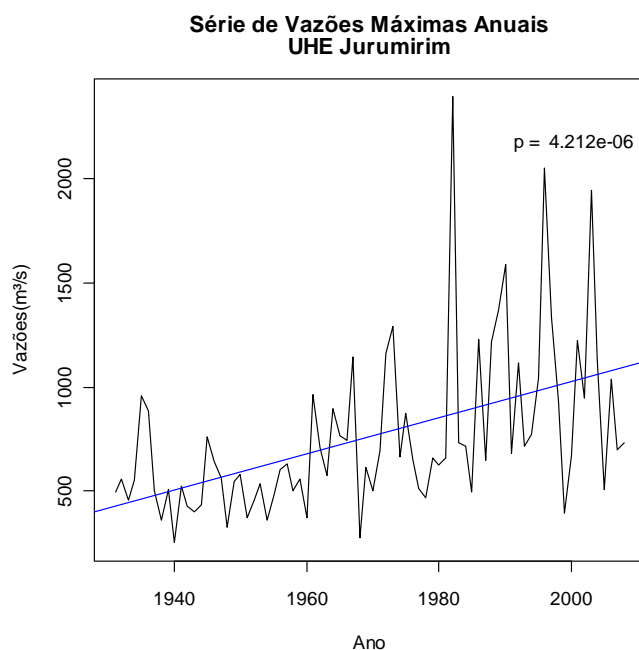


Figura 2: Série de máximos sazonais e valor- p

3 - MODELAGEM ESTACIONÁRIA DE FREQUÊNCIA DE CHEIAS

Numa primeira abordagem, considerou-se na análise de frequência dos dados de máximos sazonais de vazão a distribuição estacionária de Valores Extremos Generalizados (GEV), comumente utilizada na literatura para dados extremos. Inicialmente foram obtidos os parâmetros de posição, escala e forma para a série de máximos sazonais de vazão pelo Método da Máxima Verossimilhança. O intervalo de confiança de cada parâmetro foi obtido para o nível de confiança de 95% por meio da estimação dos erros padrões e uso da distribuição t-Student para os estimadores. Os valores obtidos são apresentados na

Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da distribuição GEV (nível de confiança = 95%)

Posto	Parâmetro					
	α (posição)		β (escala)		γ (forma)	
	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança
Jurumirim	571.5	(513.5 ; 629.4)	227.3	(180.9 ; 273.7)	0.21	(-0.03 ; 0.46)

Analisando o intervalo de confiança para o parâmetro de forma, observa-se que o mesmo inclui como limites extremos valores positivos e negativos, sugerindo que esse parâmetro não é estatisticamente diferente de zero. Assim, como sugerido em Coles (2007), foram estimados novamente apenas os parâmetros de posição e escala, com o fator de forma igual a zero, assumindo

então uma distribuição Gumbel para os dados de máximos sazonais. As estimativas dos parâmetros de posição e escala são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros da distribuição Gumbel (nível de confiança = 95%)

Posto	Parâmetro			
	α		β	
	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança
Jurumirim	599.22	(658.83 ; 539.61)	253.26	(300.54 ; 205.98)

4 - MODELAGEM NÃO-ESTACIONÁRIA DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO GUMBEL

Os dados de máximos sazonais de vazão (Fig. 2) sugerem uma tendência temporal monotônica e linear em ambos os parâmetros de posição e escala. Assim, assumiu-se uma variação temporal linear nesses parâmetros, onde a covariável é o próprio tempo, conforme apresentada nas

$$\text{Equações } \alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t \quad (1) \text{ e}$$

$$\beta(t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (2):$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t \quad (1)$$

$$\beta(t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (2)$$

onde $\alpha(t)$ é o parâmetro de posição e $\beta(t)$ é o parâmetro de escala, ambos em função da covariável tempo.

Os valores dos coeficientes angulares e lineares da equação dos parâmetros de posição e escala (Eqs. 1 e 2) obtidos pelo método da máxima verossimilhança são apresentados na Tabela 4. Observe que o intervalo de confiança de 95% para ambos os coeficientes angulares sugerem que os mesmos são estatisticamente diferentes de zero.

Tabela 4: Parâmetros estimados para a distribuição Gumbel não-estacionária.

Posição				Escala			
α_t		α_0		β_t		β_0	
Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança
5,7	(8,0 ; 3,4)	393,3	(468,7 ; 317,9)	3,0	(4,5 ; 1,4)	107,4	(58,1 ; 156,8)

5 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS (ESTACIONÁRIO VS. NÃO ESTACIONÁRIO)

De acordo com o Coles (2007) a possibilidade de fazer inúmeras modelagens com os parâmetros dos valores extremos em função do tempo, ou qualquer outra covariável, resulta em uma multiplicidade de modelos a serem escolhidos, e selecionar o modelo apropriado se torna um grande problema.

Em busca do aprimoramento da modelagem estacionária já existente, o modelo aqui apresentado, é então comparado e avaliado no sentido de escolher aquele que apresenta a melhor precisão com os dados observados. Coles (2007) discute que, como o modelo precisa da descrição do processo de geração dos dados, e não dos dados em si, então é necessário avaliar a intensidade das evidências por uma estrutura mais complexa. Se a evidência não é particularmente forte, então, de preferência, deve ser escolhido o modelo mais simples.

Uma primeira análise visual da eficiência da modelagem proposta é através do método gráfico Q-Q plot (ou quantil-quantil plot), que consiste em plotar, em um mesmo gráfico, os quantis teóricos e empíricos da distribuição. Se as duas distribuições forem similares, os pontos empíricos alinham-se à reta de quantis teóricos. Por meio de uma comparação visual, pode-se então determinar se a distribuição testada se assemelha com a distribuição teórica dos dados.

O modelo estacionário apresenta ajustes aceitáveis quando comparados com as vazões observadas. A Figura 3 representa bem essa situação pelo método gráfico Q-Q plot.

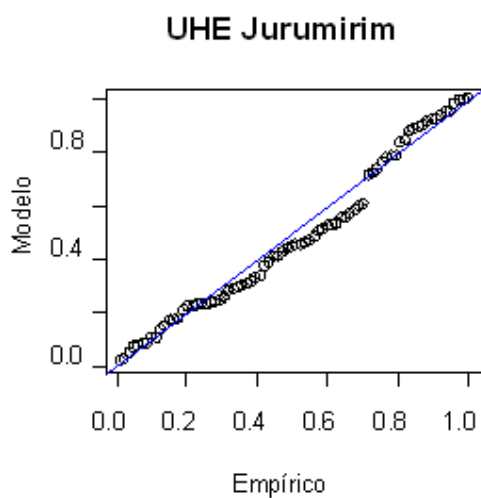


Figura 3: Q-Q plot para a modelagem estacionária.

Para o modelo não estacionário com covariável tempo, o gráfico Q-Q Plot Residual (Coles, 2007) mostrado na Figura 44 indica que o modelo não-estacionário também se ajusta aos valores observados.

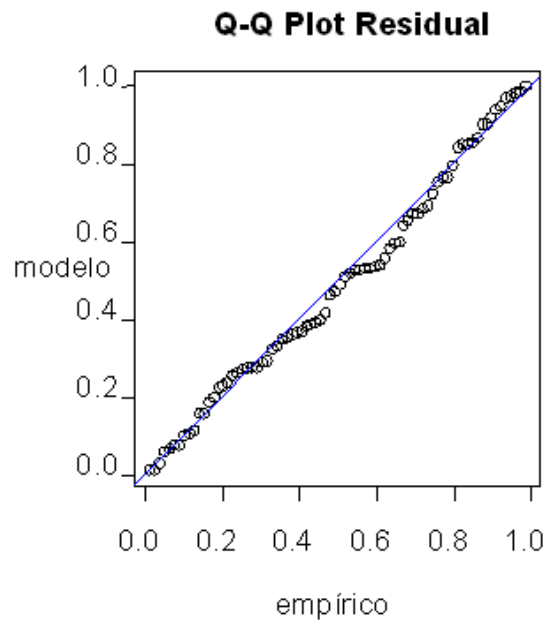


Figura 4: Q-Q plot residual para o modelo não-estacionário.

5.1 – Validação cruzada

Outro método utilizado para testar a aderência dos modelos estacionário e não-estacionário às vazões observadas foi a validação cruzada, onde o intervalo de tempo é dividido num período onde os parâmetros das distribuições são ajustados (período de treinamento) e outro período independente (período de teste) onde os modelos são utilizados para prever os valores de máximos anuais e esses resultados são comparados com os observados.

Foi definido o período 1931-1990 para estimação dos parâmetros, sendo então realizadas previsões de cheias para o período 1991-2008. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 5. Note que todos os valores observados, com exceção de um ponto, estão dentro do intervalo de confiança de 95% previsto para os dados de pico sazonais de vazão. O valor mediano de pico sazonal previsto pelo modelo segue uma leve tendência temporal. O coeficiente de Nash-Sutcliffe foi utilizado para comparar as previsões do modelo não-estacionário com as previsões advindas do modelo estacionário, que se resume a média temporal dos dados de pico sazonal de vazão para o período 1931-1990. A formulação matemática do coeficiente de Nash-Sutcliffe é dada por:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_{om})^2} \quad (3)$$

onde Q_o é vazão observada, Q_m é a vazão prevista pelo modelo não-estacionário e Q_{om} é a vazão média observada no período 1931-1990. O coeficiente NS pode variar de $-\infty$ a 1. O valor 1 significa eficiência perfeita do modelo com os dados observados, o valor zero indica que o modelo é tão

preciso quanto a estimação pela média, e valores menores que zero significam que a média observada é um melhor preditor do que a modelagem sugerida.

Para os valores previstos pelo modelo foi obtido um $NS = 0,15$, indicando que os valores de mediana previstos pelo modelo não-estacionário superam a utilização da média estacionária como modelo padrão para previsão dos máximos sazonais de vazão.

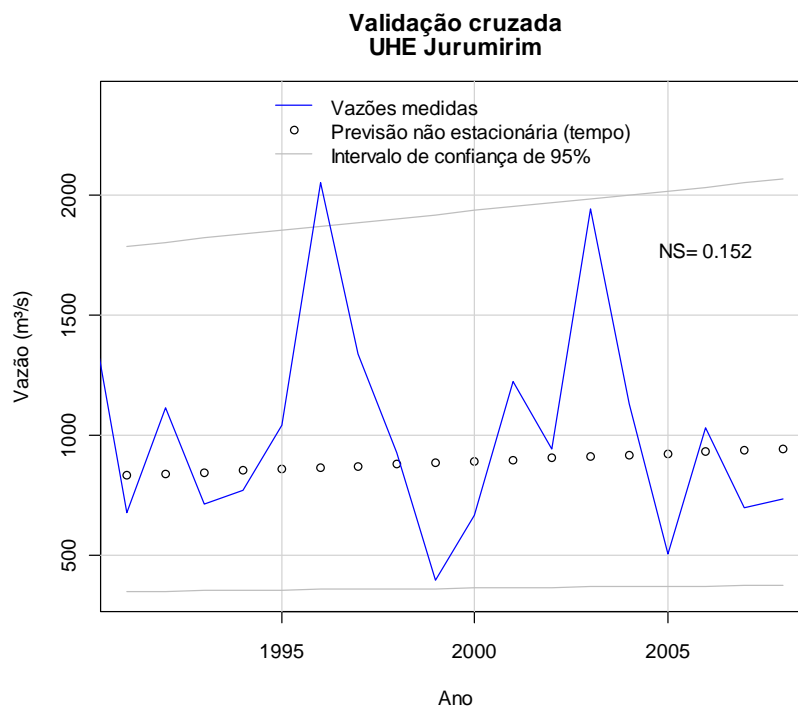


Figura 5: Validação cruzada para a modelagem temporal no posto da UHE Jurumirim.

6 – ESTIMAÇÃO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS QUANTIS DE CHEIA PARA OS DADOS HISTÓRICOS

Para dimensionamento estruturas hidráulicas e estudos de frequência de cheias, é geralmente calculado um quantil relacionado à uma probabilidade de ocorrência (ou tempo de retorno) definida anteriormente. Essa probabilidade de ocorrência é definida pela importância da estrutura ou do risco de falha que pode ser assumido durante a vida útil da estrutura. O dimensionamento de estruturas vertentes de Pequenas Centrais Hidrelétricas, por exemplo, utiliza uma probabilidade de ocorrência de 1%, que é equivalente a um tempo de retorno de 100 anos.

Para comparação entre os quantis estimados pelos métodos estacionários e não estacionários, foram calculadas as vazões com tempos de recorrência de 100 anos. Como a distribuição utilizada nas análises foi a distribuição Gumbel, os quantis procurados foram calculados segundo a

distribuição de probabilidades derivada da função densidade de Gumbel, que pode ser escrita da forma:

$$Q_T(t) = \alpha(t) + \beta(t) \left\{ -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Fazendo-se a análise temporal variando ambos os parâmetros de posição e de escala, pode-se observar na Figura 66 que os quantis não-estacionários estimados para um tempo de recorrência de 100 anos têm aumentado com o tempo (linha vermelha), ultrapassando, nas últimas décadas, o quantil estimado por uma análise estacionária (linha azul).

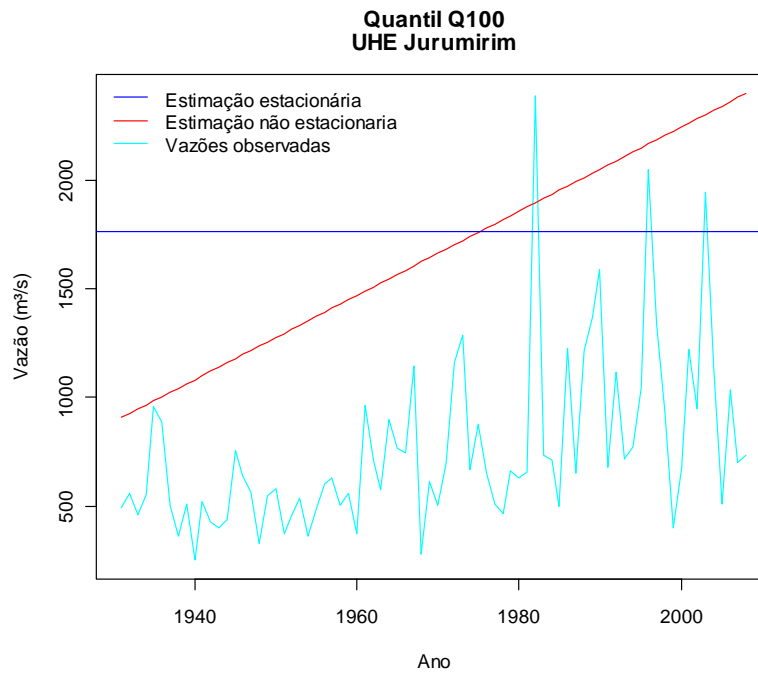


Figura 6: Dados observados (linha verde clara) e quantis para o tempo de retorno de 100 anos estimados pelos métodos estacionário (linha azul) e não-estacionário (linha vermelha).

É importante ressaltar que a variação do quantil de cheia ao longo do período implica na variação do risco de falha da estrutura. Pela observação visual, percebemos que a estimação temporal se mostra melhor do que a estimação estacionária. Uma análise interessante é a variação do risco associado ao quantil estimado pela modelagem estacionária, que é suposto de 1% (na modelagem estacionária), mas, quando considerado a variação do risco com o tempo, este pode aumentar ao longo dos anos, como pode ser observado na Figura 7.

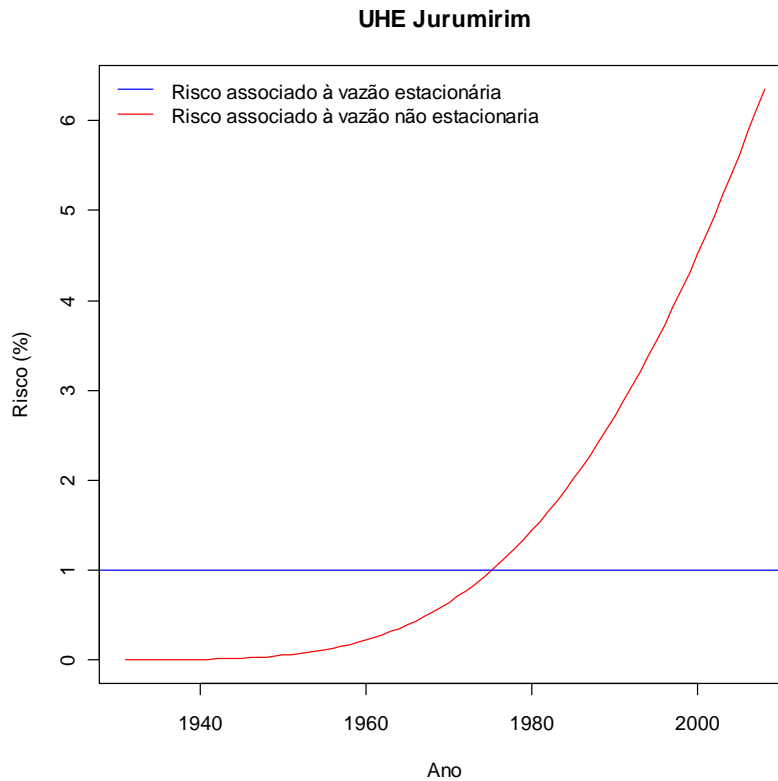


Figura 7: Risco dinâmico (linha vermelha) associado ao quantil Q100 estacionário.

Pode-se observar que, conforme a função de densidade da distribuição de Gumbel, o risco associado a uma vazão única, quando os parâmetros de posição e de escala variam linearmente com o tempo, é exponencial, chegando à ordem de 6% (mais que o esperado, considerando a estimativa estacionária) nos últimos anos da modelagem.

7 – CONCLUSÕES

Neste artigo foi abordado o método não estacionário de análise de frequência de cheias, enfatizando a comparação entre os modelos estacionário e não estacionário na estimativa dos parâmetros de distribuições de probabilidade. A estacionariedade das séries de vazão é uma premissa básica para o método tradicional de análise de frequência de cheias, e, caso essa premissa não possa ser aplicada, novos métodos e teorias devem ser utilizados. A violação dessa hipótese pode levar a sub ou superestimação dos quantis de cheias e conseqüentemente diversos danos, como falha de estruturas hidráulicas e rompimento de barragens no caso de subestimação desses quantis, e gastos desnecessários na implantação dessas estruturas no caso de superestimação.

Ao comparar as metodologias estacionária e não estacionária no posto fluviométrico da UHE Jurumirim, pode-se observar o melhor ajuste na metodologia temporal. A adequação do método temporal pode ser visualmente analisada pela observação do método gráfico Q-Q plot, o qual, na

metodologia não estacionária, se aproxima melhor à reta teórica. Para a modelagem dos quantis, a adequação do método pode ser observada por meio de coeficientes estatísticos, como o de Nash–Sutcliffe, que para o posto estudado é maior que zero, mostrando que o modelo usado fornece uma melhor previsão dos picos de vazões quando comparada à previsão mais simples pela média da amostra.

O estudo não estacionário de frequência de cheias, num cenário mundial de mudanças climáticas, é imprescindível para a segurança geral da população e para a renovação da infraestrutura das obras hidráulicas. Ignorar tendências na série de vazões pode gerar sérios riscos de falha nas estruturas, já que os quantis de cheia podem facilmente ser subestimados, como mostrado na Figura 6. A incorporação dessas previsões no gerenciamento do risco de cheias é um assunto aberto, mas que pode ser discutido para melhor mitigar o efeito deletério de eventos extremos de vazão.

Em trabalhos futuros, sugere-se analisar a modelagem não estacionária com outras covariáveis, como coeficientes pluviométricos ou indicadores climáticos de larga escala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ONS pelo fornecimento dos dados de vazão diária para a bacia em estudo e aos criadores do pacote ISMEV (plataforma R) utilizado para os cálculos desse trabalho.

BIBLIOGRAFIA

COLES, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Bristol: Springer, 2007. 208 p.

CUNDERLIK, J. M.; BURN, D. H. (2003). Non-stationary pooled flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, v. 276, p. 210-223, 2003.

KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. B. M. J.; ONDO, J. C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, v. 329, p. 534-552, 2006.

LECLERC, M.; OUARDA, T. B. M. J. (2007). Non-stationarity regional flood frequency analysis at ungauged sites. *Journal of Hydrology*, v. 343, p. 254-265, 2007.

LIMA, C. H. R.; LALL, U. Bayesian non-stationary flood frequency estimation at ungauged basins using climate information and a scaling model. In: 2010 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, Dez. 2010, São Francisco – Estados Unidos da América.

MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKY, E. (1998) Análise de estacionariedade de series hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 51-71, 1998.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2007. 943p.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; SERINALDI F.; BALES, J.; BATES, P. D.; KRAJEWSKI W. F. (2009). Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, v. 32, p. 1255-1266, 2009.