

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SAZONALIDADE E TENDÊNCIAS TEMPORAIS EM EVENTOS DE CHEIA NA BACIA DO PARANÁ

Carlos Henrique Ribeiro Lima¹

RESUMO --- Eventos climáticos extremos tem causado grandes impactos na sociedade global nos últimos anos, urgindo um melhor entendimento dos padrões espaciais e temporais desses eventos. Nesse sentido, destacam-se o estudo e a modelagem de eventos de cheia ou picos de vazão num contexto de mudanças climáticas globais e variabilidade natural do sistema que tem levado a violações nas hipóteses básicas de métodos clássicos de análise de frequência de cheias. Esse trabalho foca na análise estatística dos padrões sazonais e de variabilidade interanual de vazões de pico na Bacia do Paraná a partir de dados de vazão diária de 33 postos fluviométricos localizados ao longo da bacia. Os resultados obtidos mostram que as vazões de pico tendem a ocorrer no período Setembro-Abril para um grande número de postos, sendo que aqueles situados na parte sudeste da bacia tendem a experimentar os picos de vazão em praticamente qualquer época do ano. As análises estatísticas mostram também que as cheias produzidas nos diversos períodos do ano são correlacionadas mas provenientes de diferentes populações, em particular quanto ao valor médio do pico. Tendências temporais positivas são observadas em todos os picos sazonais de vazão, com uma tendência mais significativa no período janeiro-abril, que é responsável primariamente pela tendência observada nas séries de máximos anuais. O presente estudo define então as principais bases empíricas para o desenvolvimento de modelos de frequência de cheias que considerem conjuntamente misturas de distribuições de cheias e não-estacionariedade dos parâmetros.

ABSTRACT --- Extreme climate events have caused several impacts on the global society in the last years, urging a better understanding of the spatio-temporal patterns of those events. In this sense, one can point to the study and modeling of floods and peak flows under a framework of global climate changes and natural variability, which lead to violations of the basic hypothesis in the classical methods of flood frequency analysis. This work focuses on the statistical analysis of seasonal patterns and interannual variability of peak flows in the Paraná Basin through the use of daily streamflow data from 33 streamflow gauges located along the basin. The results show that the peak flows tend to occur in the September-April period for most of the sites, with those in the southeastern basin also experiencing peak flows all over the year. The analysis suggests that the floods produced in the different seasons along the year are correlated but from different populations, particularly in the mean peak flow. Positive temporal trends are observed in all seasonal peak flows, with a more significant trend in the Jan-Apr period, which is responsible for the temporal trend observed in the annual maximum series. The present study establishes then the empirical basis for the development of flood frequency models that account for mixture of flood distributions and non-stationarity in the related parameters.

Palavras-chave: cheias, sazonalidade, tendência temporais.

1) Prof. Adjunto, Depto. de Eng. Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. e-mail: chrlima@unb.br.

1 - INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos são apontados como uma das principais causas de perdas de vidas humanas e danos materiais ao redor do globo, perdendo apenas para terremotos. Tais eventos atuam em diversas escalas temporais (dia-ano) e espaciais (bairro-regiões/países), sendo que a maior parte dos danos são causados por secas prolongadas e eventos extremos de precipitação que levam a cheias e inundações. Os eventos recentes de cheia e intensa precipitação na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, nos estados do Sul ao final de 2008 e nos estados do Nordeste em 2009, por exemplo, causaram inúmeras vítimas, além do desalojamento de muitas famílias, prejuízos econômicos e materiais e aumento dos casos de doenças de veiculação hídrica (por exemplo, febre tifóide, cólera, leptospirose, hepatite A, malária, dengue e febre amarela). A adaptação e consequente minimização dos impactos sobre a sociedade de eventos extremos passa primariamente pelo estudo e conhecimento científico da magnitude e frequência de ocorrência desses eventos ao longo do tempo, em particular visando a modelagem da ocorrência de eventos de cheias.

A maior parte dos estudos de frequência de cheias tem como base métodos estatísticos, onde dados históricos observados de vazão são utilizados para se obter detalhes da magnitude e frequência de ocorrência de vazões extremas (os chamados quantis de cheias), sendo que na maior parte dos casos são estimados parâmetros de uma distribuição estatística para extrapolar valores de vazões extremas que ocorrem com uma baixa frequência, ou seja, vazões poucos usuais onde o período de recorrência ($1/\text{frequência}$) é substancialmente maior que o número de anos com dados históricos de vazão disponíveis. Em geral, são utilizados nessas análises dados de vazão máxima anual (vazão diária máxima que ocorreu num dado ano) ou dados de pico de vazão acima de um nível pré-determinado, as chamadas séries parciais de vazões máximas. Essa metodologia clássica de análise de frequência de cheias tem sido aplicada em diversas áreas, principalmente no dimensionamento de estruturas (reservatórios, diques, etc) e delimitação de áreas de risco. Descrições detalhadas da metodologia aparecem em diversos livros textos de hidrologia (por exemplo, veja Maidment, 1992). Quando dispõe-se apenas de um conjunto limitado de dados de vazão no ponto de interesse, é comum a utilização de informações locais e regionais de precipitação e vazão, características físicas da bacia hidrográfica além de paleodados para uma melhor estimativa dos parâmetros da distribuição estatística da vazão máxima do posto em estudo, na chamada análise regional de frequência de cheias (veja por exemplo os trabalhos de Stedinger e Cohn, 1986; Martins e Stedinger, 2001).

Nessa metodologia clássica de análise local/regional de frequência de cheias assume-se que os dados de vazão máxima analisados são independentes e identicamente distribuídos, a chamada

suposição iid. Violações dessas suposições aparecem com frequência em diversos conjuntos de dados e podem comprometer a análise realizada, subestimando ou superestimando os quantis de cheias. A suposição de independência é violada quando ocorre uma correlação serial entre os dados, o que é pouco provável em séries de máximos anuais de vazão, mas pode ser comum em séries parciais de máximos de vazão. Alguns estudos (por exemplo, Khalic *et al.*, 2006) apresentam algumas metodologias para contornar a violação da suposição de independência dos dados. A suposição de dados identicamente distribuídos, ou seja, dados que pertencem a uma mesma distribuição de probabilidades com um mesmo conjunto de parâmetros estacionários no tempo (dados homogêneos), tende a ser violada mais facilmente. Por exemplo, pode ocorrer que em um determinado local as cheias são provocadas por diferentes mecanismos atmosféricos (convecção local, ocorrência de frentes, etc) e a série de dados anuais de vazão máxima reflete valores oriundos de diferentes distribuições de probabilidade, possivelmente com diferentes conjuntos de parâmetros estatísticos. A aplicação de uma mistura de distribuições de probabilidades tem sido um artifício comum na literatura (veja por exemplo Waylen e Woo, 1982; Smith *et al.*, 2010) para melhor representar a frequência de ocorrência de cheias. Algumas vezes, entretanto, o processo de geração das cheias é o mesmo para os dados de vazão máxima mas o conjunto de parâmetros da distribuição estatística varia ao longo do tempo, ou seja, são considerados não-estacionários. É comum observar essa ausência de estacionariedade em dados de vazão máxima quando da ocorrência de tendências temporais cíclicas ou monotônicas nos dados observados. Uma variedade de estudos tem sido voltados para a análise e modelagem não-estacionária de frequência de cheias (veja, por exemplo, Olsen *et al.*, 1999; Clarke, 2002A; Clarke, 2002B; Milly *et al.*, 2002; Katz *et al.*, 2002; Kwon *et al.*, 2008; Lima e Lall, 2008; Jain e Lall, 2001).

Nesse trabalho é realizado um estudo das séries de vazão máxima de diversos postos localizados na Bacia do Rio Paraná, em parte devido a grande quantidade de reservatórios localizados na região e a preocupação com um potencial aumento da ocorrência de eventos extremos de vazão em diversos locais da Bacia. Apesar de alguns estudos apontarem para tendências temporais de aumento na precipitação média e extrema de diversos postos da região (Mueller *et al.*, 1994; Liebmann *et al.*, 2004; Teixeira e Satyamurty, 2010) assim como a ocorrência de máximos anuais devido a diferentes processos de cheias (Fill *et al.*, 2008), não são conhecidos na literatura estudos que analisaram e modelaram a frequência de ocorrência de eventos extremos de vazão em postos da região ou mesmo outros locais considerando em conjunto a não-estacionariedade das séries e misturas de distribuições de probabilidades. Dessa forma, busca-se neste trabalho identificar espacialmente os reservatórios que apresentam mais de um mecanismo climático responsável pelos picos de vazão assim como analisar tendências temporais nas vazões máximas sazonais dos principais postos fluviométricos da Bacia do Paraná. Espera-se com isso

fornecer a base empírica de conhecimentos para o desenvolvimento de modelos de análise de frequência de cheias para a região que considerem conjuntamente misturas de distribuições de probabilidade e não-estacionariedade dos parâmetros das distribuições.

2 – DADOS DE VAZÃO DIÁRIA PARA A BACIA DO PARANÁ

Dados de vazão diária de 33 postos localizados nos principais reservatórios hidroelétricos da Bacia do Paraná são disponibilizados pelo operador nacional do sistema (ONS) e foram utilizados neste estudo. A localização dos postos na Bacia do Rio Paraná é apresentada na Figura 1. Os dados disponíveis compreendem o período 1931-2009, sendo que alguns reservatórios apresentam falhas no início do período. As áreas de drenagem associadas variam de 2588 a 823555 km².

Todas as séries disponibilizadas pela ONS são *naturalizadas*, assim são removidos quaisquer efeitos artificiais (evaporação e operação de reservatórios, usos da água, etc) na vazão do rio ocorridos à montante dos posto em uso. Apesar de séries naturais de afluência diária serem passíveis de erros de medição e durante o processo de *naturalização*, acredita-se que a influência dos mesmos nos resultados obtidos neste trabalho não sejam significantes.

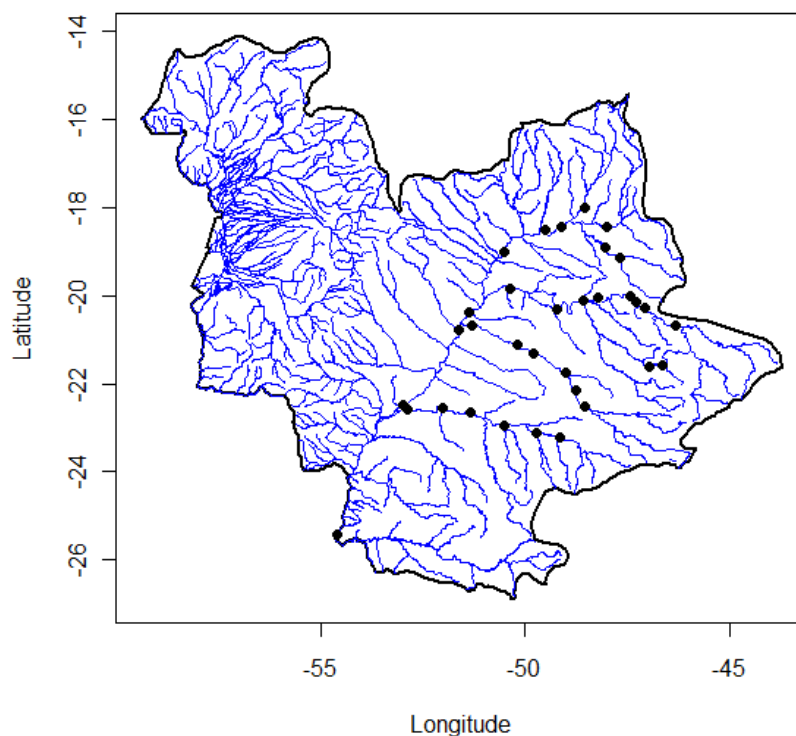


Figura 1 – Localização na bacia do Paraná dos postos fluviométricos utilizados neste trabalho.

3 – SAZONALIDADE DOS PICOS DE VAZÃO

Estudos anteriores (veja por exemplo Reboita *et al.*, 2010 e referência citadas) identificam na parte alta da Bacia do Paraná um pico sazonal de chuva durante o verão austral, que se reflete na vazão média mensal e está associada ao período chuvoso de monção da América do Sul. Na parte média e baixa da Bacia do Paraná é identificada um estação chuvosa bimodal (Fill *et al.*, 2008), com picos no verão (associados com o clima de monção) e outono, esse último associado com climas de latitude média, em particular devido a ciclones extratropicais e penetração de frentes frias.

Numa primeira análise, observou-se que a vazão máxima que ocorre num dado ano segue os padrões sazonais de precipitação para diversos reservatórios, podendo ocorrer em diversas estações dos anos. Como exemplo, é mostrado na Figura 2 o mês de ocorrência do pico anual de vazão para o posto fluviométrico situado no reservatório Rosana na sub-bacia do rio Paranapanema. Cerca de 35 dos 78 eventos anuais (45%) ocorre no verão (Janeiro-Março). Uma queda significativa nos picos ocorre nos meses de abril e agosto, sugerindo que os picos de vazão que ocorrem no período Janeiro-Março são pertencem a populações distintas, isto é, são gerados por mecanismos de precipitação diferentes, daqueles eventos que ocorrem entre maio-julho, que também se diferenciam das cheias no período setembro-dezembro. Aparentemente, devido a queda relativa na frequência de cheias em dezembro, estipula-se que os eventos de cheia que ocorrem entre setembro-dezembro são produzidos por mecanismos diferentes daqueles que ocorrem entre janeiro-março.

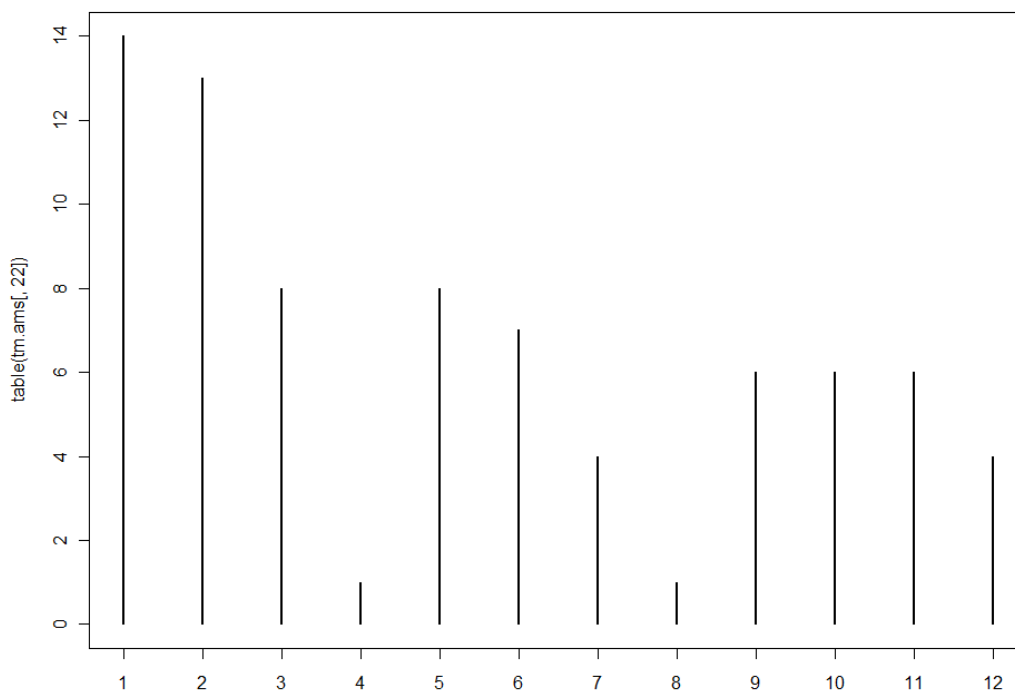


Figura 2 – Frequência e mês de ocorrência do pico anual de vazão para o posto do reservatório Rosana

A sazonalidade na ocorrência dos picos de vazão apresentada na Fig. 2 levou a definição do ano hidrológico entre agosto-setembro e a divisão desse ano em três períodos distintos: período 1, de agosto a setembro, período 2 de janeiro a abril e período 3 de maio a julho. Assim, para cada posto em estudo foram registrados o período de ocorrência do pico de vazão para o ano hidrológico. As Figuras 3 a 5 apresentam a distribuição espacial da frequência de ocorrência desses eventos para cada um dos três períodos. Note que em todos os reservatórios que compõem a bacia do Rio Paraná o pico de vazão ocorre tanto no período 1 como no período 2, sendo que na maior parte deles o pico de vazão ocorre no período 2. Alguns reservatórios situados na parte central leste da bacia apresentam também um ocorrência de pico de vazão no período 3 (Figura 5).

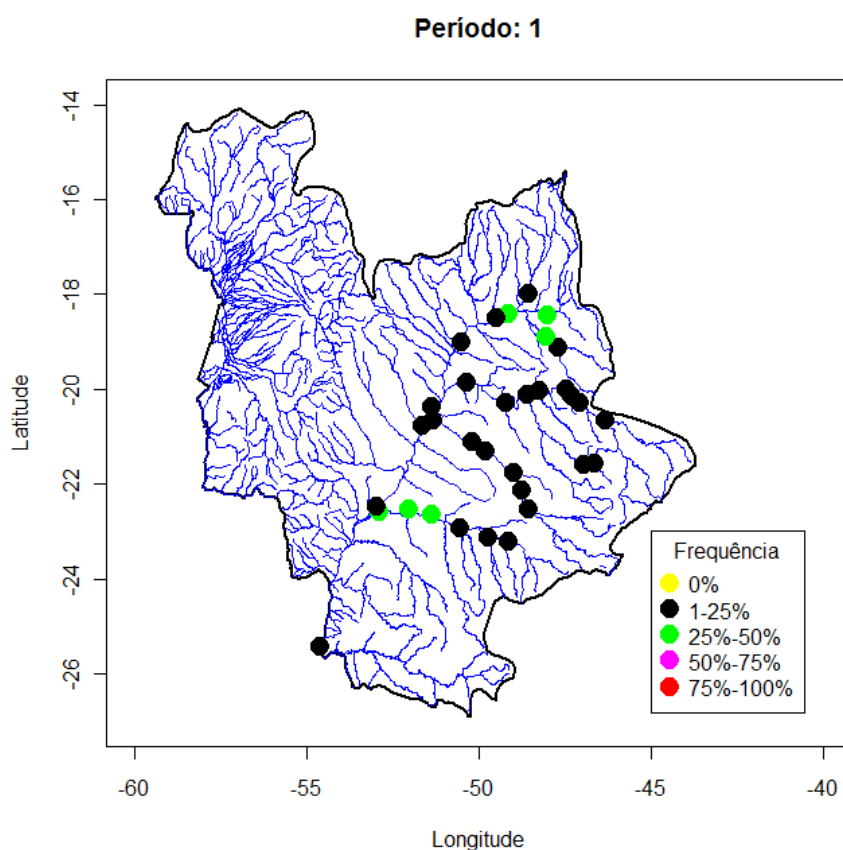


Figura 3 - Frequência de ocorrência do pico de vazão para o período 1 (Set-Dez)

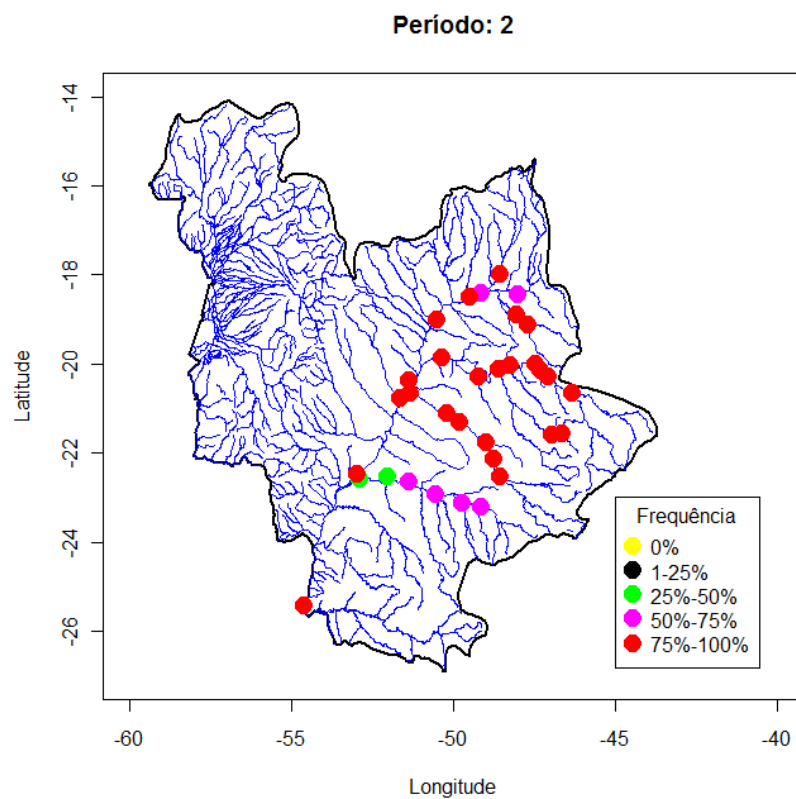


Figura 4 - Frequência de ocorrência do pico de vazão para o período 2 (Jan-Abr)

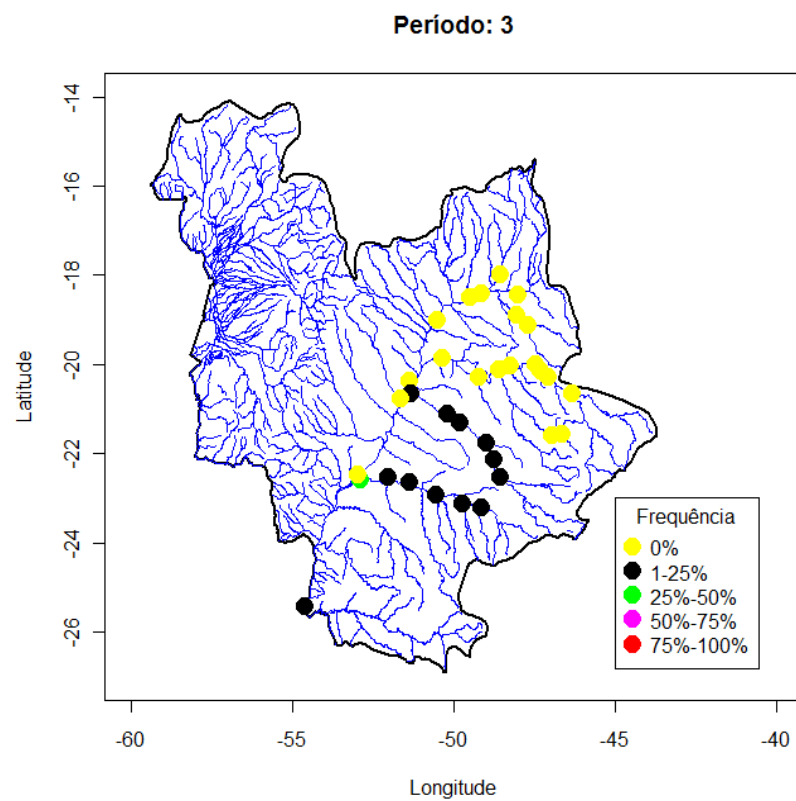


Figura 5 - Frequência de ocorrência do pico de vazão para o período 3 (Mai-Ago)

4 - MISTURA DE DISTRIBUIÇÕES

A ocorrência de picos de vazão em diferentes épocas do ano sugere que as cheias são provenientes de diferentes mecanismos atmosféricos de precipitação. Assim, os dados de vazão máxima para cada período mostrado nas Figuras 3-5 são provavelmente provenientes de diferentes populações e os dados de vazões máximas anuais portanto não obedecem a suposição de homogeneidade. No caso do posto fluviométrico situado no reservatório de Furnas, onde o pico de vazão ocorre ou no período 1 ou no período 2, a curva empírica de frequências de cheias da vazão sazonal máxima para cada um dos períodos (Fig. 6 a)) mostra claramente duas curvas distintas, sendo que valores maiores de pico de vazão tendem a ocorrer no período 2 (quadrados na Fig. 6 a)). Apesar da diferença significativa nas curvas para os dois períodos, a variabilidade interanual do sistema climático responsável por tais cheias faz com que o pico possa também ocorrer no período 1. A curva empírica de frequência para os dados de vazão máxima anual (Figura 6 b)) mostra que para tempos de retorno de até 20 anos ambos os períodos 1 e 2 são responsáveis pelos picos de vazão, com uma maior ocorrência no período 2, como era esperado em virtude das diferenças encontradas na Fig. 6 a). Para tempos de retorno superiores a 20 anos as cheias ocorrem exclusivamente no período 2.

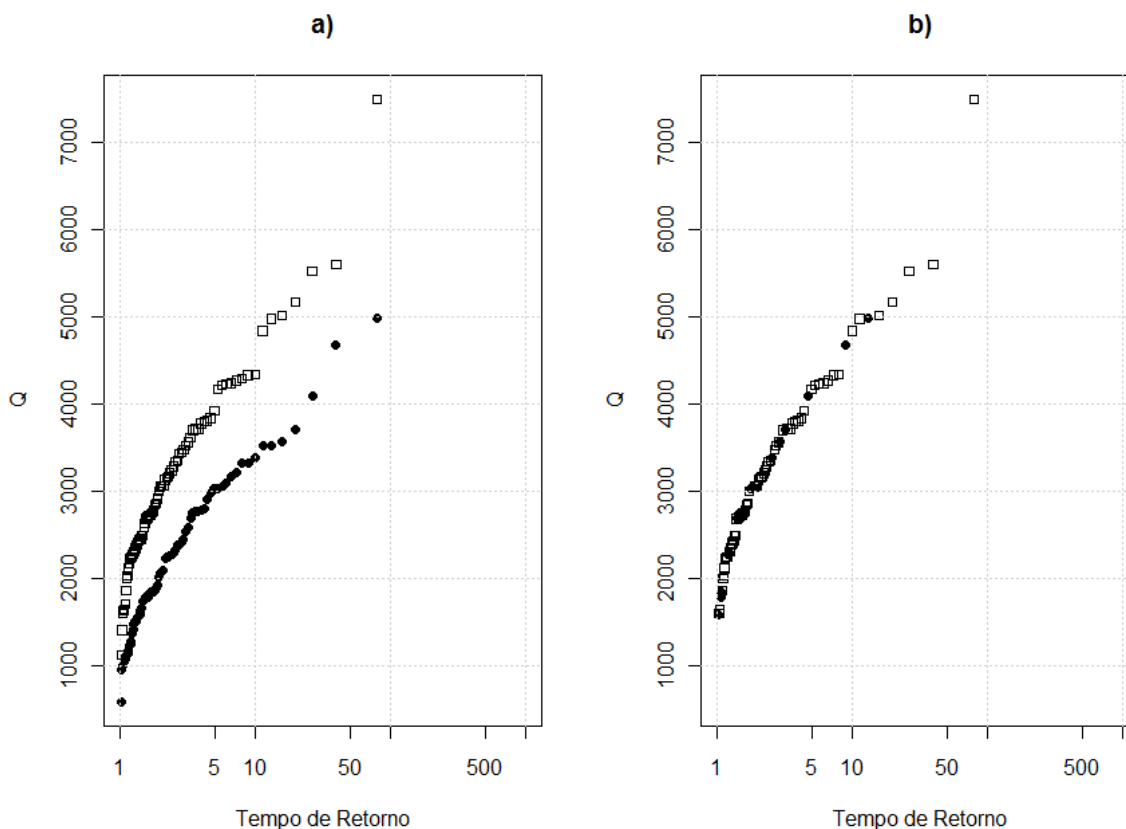


Figura 6 - Curva de frequência para o posto do reservatório Furnas para a) períodos 1 (círculo) e período 2 (quadrado) e b) máximo anual.

Para os postos em que o pico de vazão pode ocorrer em qualquer um dos períodos do ano mencionado acima, os resultados empíricos de frequência para o posto fluviométrico localizado no reservatório Marimondo (Figura 7a)) atestam que as amostras de vazões máximas para cada um dos períodos provém de diferentes populações. O período 2 tende a ter os maiores valores de cheia, seguidos do período 1 para eventos frequentes (pequenos tempos de retorno) e do período 3 para eventos de cheia raros, ou seja, com uma menor probabilidade de ocorrência (tempo de retorno maior que 20 anos). De maneira geral, para vazões máximas cujo período de retorno tem como limite 10 anos, a cheia pode ocorrer em qualquer um dos três períodos, não sendo possível distinguir visualmente qual período contém o maior número de eventos (Figura 7b)). Para tempos de retorno superiores a 10 anos, a cheia anual ocorrer nos período 2 e 3, com uma maior frequência de ocorrência no período 2, apesar do maior evento ter sido registrado no período 3.

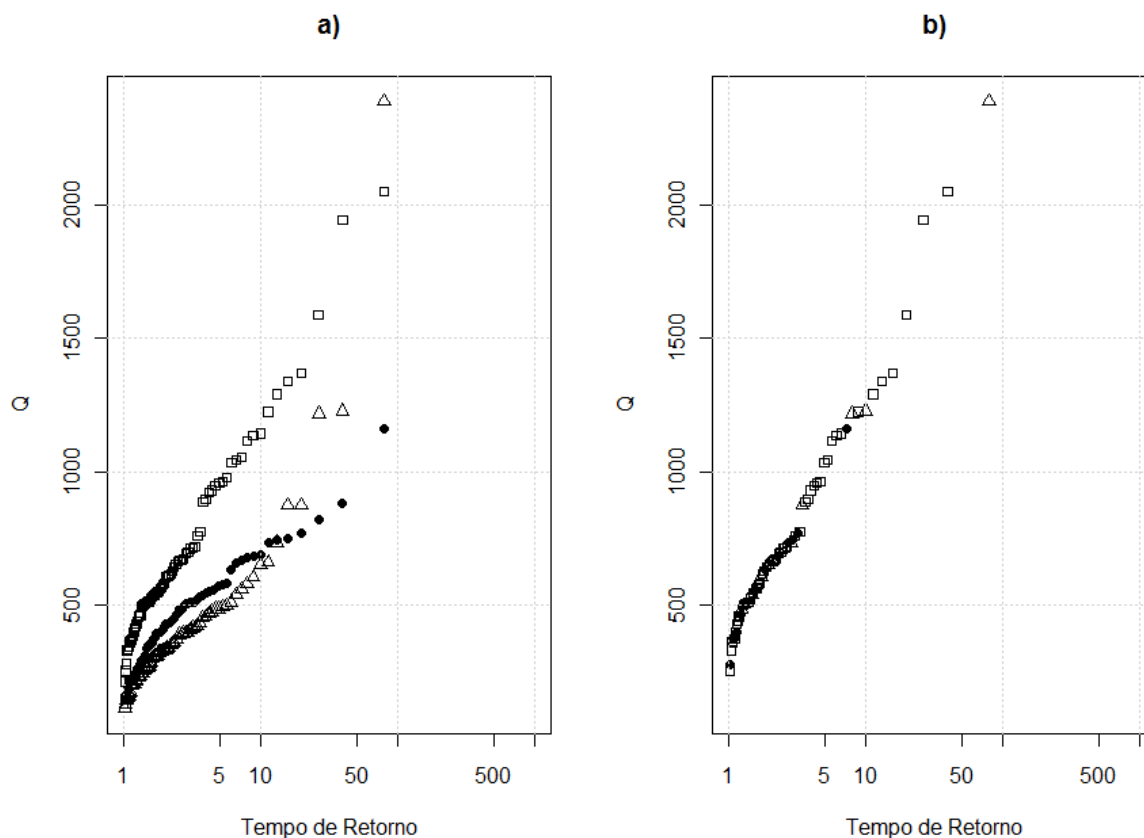


Figura 7 - Curva de frequência para o posto do reservatório Marimondo para a) períodos 1 (círculo), período 2 (quadrado) e período 3 (triângulo) e b) máximo anual.

4.1 – Testes de Homogeneidade entre as Estações

Para avaliar os demais reservatórios quanto à possibilidade das cheias sazonais serem pertencentes estatisticamente a diferentes populações, foram realizados testes estatísticos para

avaliar diferenças nos dois primeiros momentos (média e variância) das distribuições amostrais dos máximos de casa estação (períodos 1, 2 e 3). Numa primeira análise, verificou-se a dependência linear existente entre os períodos 1 e 2 para todos os postos e entre os períodos 2 e 3 para os postos que apresentam pico de vazão também no período 3 (vide Fig. 5). Assumiu-se também para esses reservatórios que s vazões máximas do período 1 não estão correlacionadas com as vazões máximas do período 3. Os resultados apresentados na Figura 8 indicam uma correlação significativa entre os picos de vazão dos períodos 1 e 2 e dos períodos 2 e 3. Apenas com esses resultados não fica claro se essa dependência é devido à uma correlação existente entre os mecanismos geradores dos eventos de cheia (dependência climatológica) ou devido ao fato que grandes vazões num determinado período tendem a aumentar o nível de armazenamento da água subterrânea e portanto incrementar o escoamento em períodos subsequentes, mesmo que os valores de precipitação não sejam tão extremos.

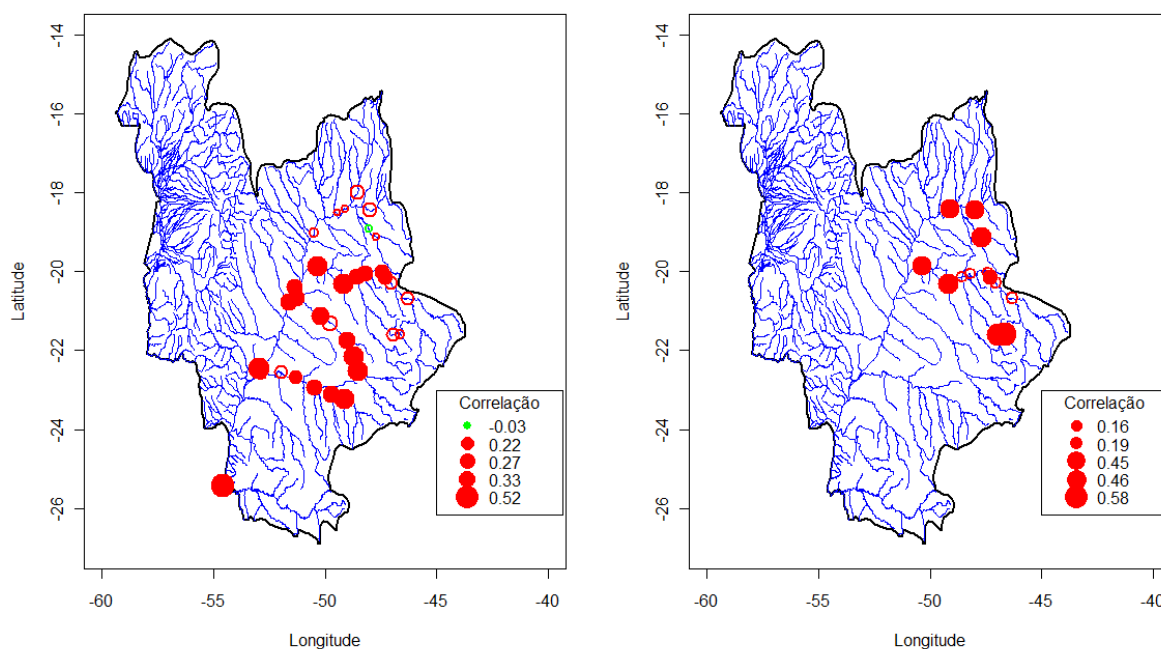


Figura 8 - Correlação entre os picos de vazão dos períodos 1 e 2 (esquerda) e dos períodos 2 e 3 (direita). Os círculos sólidos indicam correlações estatisticamente significantes ao nível de significância de 5%.

Com a existência de uma correlação entre os dados de pico de vazão para cada período e sabendo *a priori* que os dados de máximos sazonais não seguem uma distribuição Normal, utilizou-se o teste não-paramétrico bilateral do sinal dos postos de Wilcoxon (definição pode ser vista em Hollander e Wolfe, 1973), um dos mais apropriados para esse tipo de dado. Assumiu-se como

hipótese nula que o parâmetro média de cada período é proveniente de uma mesma população, ou seja, as médias são iguais. Os valores-p obtidos variaram de $5,6 \times 10^{-14}$ a $2,9 \times 10^{-3}$, sugerindo que os valores médios de pico de vazão para o período 1 são estatisticamente diferentes dos valores médios para o período 2 para um nível de significância de 5%. Da mesma forma, os valores-p obtidos para os valores médios dos picos dos períodos 2 e 3 variam de $5,4 \times 10^{-14}$ a $1,9 \times 10^{-4}$, sugerindo novamente uma diferença estatisticamente significativa para os picos de vazão dos dois períodos. Para o teste unilateral, os valores-p obtidos indicaram que o valor médio do pico de vazão para o período 2 é estatisticamente maior que os valores médios de pico de vazão para o período 1 e período 2 para todos os postos.

Como os dados não seguem uma distribuição Normal, utilizou-se o teste não-paramétrico de Ansari-Bradley (veja Hollander e Wolfe, 1973 para a definição) para testar a hipótese nula de que a variância dos picos de vazão de cada período são iguais. Os valores-p obtidos para a comparação entre os períodos 1 e 2 variaram de 0,09 a 0,99, levando a não-rejeição da hipótese nula ao nível de significância de 5% e portanto sugerindo que não existe diferença entre a variância dos picos de vazão entre os dois períodos. Da mesma forma, com exceção de um valor-p, todos os outros obtidos para a comparação das variâncias entre os períodos 2 e 3 foram maiores do que o nível de significância de 5%, levando a conclusão de que não existem evidências nos dados que justifiquem uma diferença estatisticamente significativa entre a variância dos dois períodos.

De fato, a curva de densidade de probabilidade para os períodos 1 e 2 do posto do reservatório Furnas (Figura 9a)) e para os períodos 2 e 3 do posto do reservatório Marimbondo (Figura 9b)), ambos que podem ser considerados representativos da sazonalidade do pico de vazão da região, mostra uma diferença substancial na posição (média) da curva e pouca diferença entre a escala (variância). Com relação à forma, aparece uma diferença apenas para os dados do posto do reservatório Marimbondo (Figura 9b)).

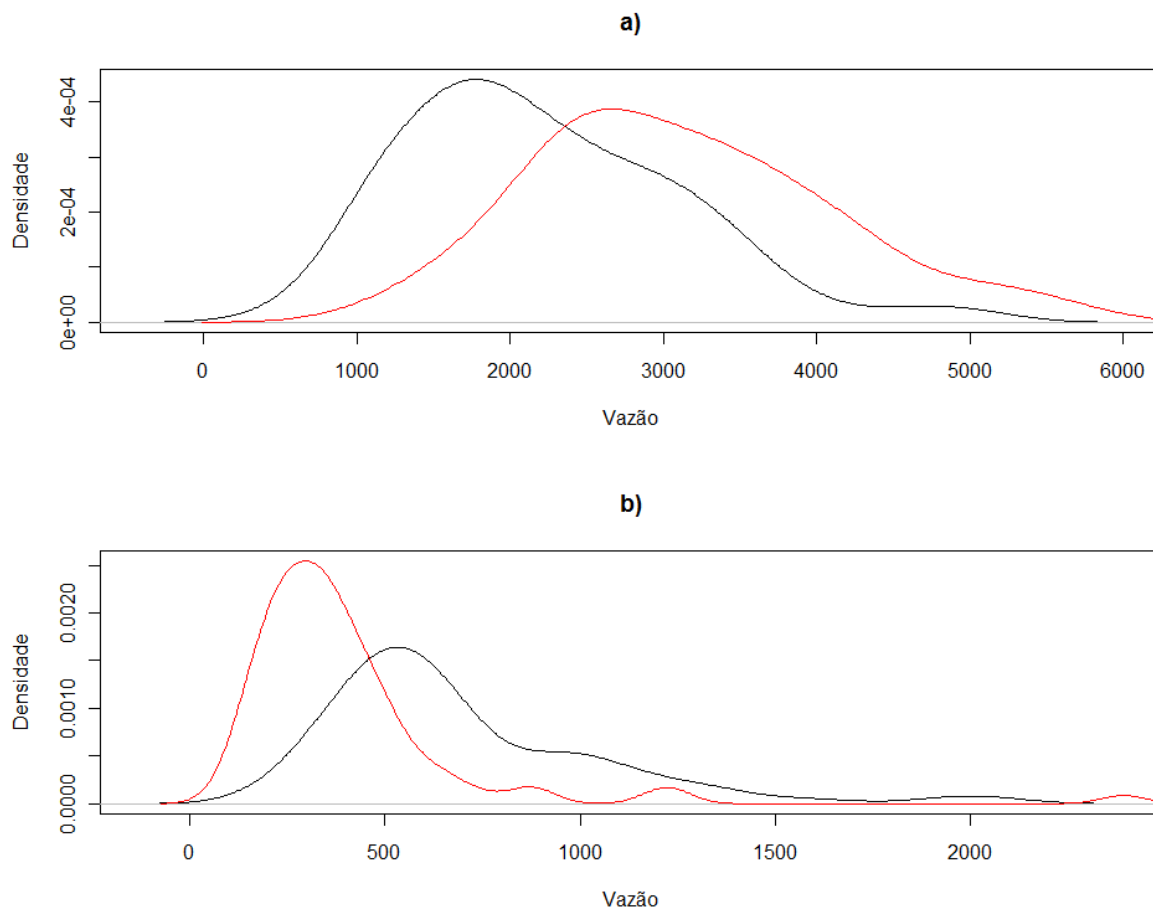


Figura 9 - Diferença entre as densidades de probabilidades para os picos de vazão do a) períodos 1 (preto) e 2 (vermelho) do posto do reservatório Furnas e b) períodos 2 (preto) e 3 (vermelho) do posto do reservatório Marimbondo

4 – TENDÊNCIAS TEMPORAIS

Os resultados da seção 3 anterior mostram claras evidências de uma variabilidade interanual nos picos de vazão, sendo que em alguns reservatórios o pico ocorre nos períodos 1 (setembro-dezembro) e 2 (janeiro-abril) enquanto em outros reservatórios o pico pode ocorrer em qualquer mês do ano. As perguntas a responder seriam então: i) existe alguma tendência temporal da concentração dos picos em algum período específico? ii) existem épocas (baixa frequência ou variação decenal) em que os picos se concentram em algum período? e iii) existem tendências temporais monotônicas de aumento ou diminuição dos picos de vazão em algum período? se sim, como elas impactam a vazão máxima anual? A seguir são apresentados resultados com intuito de responder essas questões.

4.1 - Tendências Temporais no Período do Pico de Vazão

A Figura 10 apresenta a curva de ocorrência dos picos para o posto do reservatório Furnas. Visualmente não são identificadas tendências temporais no período do pico de vazão, mas somente uma maior ocorrência no período 2 como comentado anteriormente. A aplicação do teste de Mann-Kendall (definição pode ser vista em Naghettini e Pinto, 2007), comumente utilizado na literatura para testes de tendências temporais, aponta um valor- $p = 0,94$ para a hipótese nula de ausência de tendência temporal monotônica. Ademais, não são observadas correlações serias nos valores a partir da função de autocorrelação (não mostrada aqui). Uma leve tendência de picos consecutivos no período 1 entre os anos 1970-1990 pode também ser observada. Para os demais postos que apresentam picos somente nos períodos 1 e 2, os valores- p para o teste de Mann-Kendall variam de 0,08 a 0,99, sugerindo que não existem nenhuma tendências temporais estatisticamente significante para o período de ocorrência nesses postos.

Para o posto do reservatório Marimbondo, representativo dos postos onde o pico de vazão ocorre em qualquer um dos três períodos, os resultados (Figura 11) também não mostram nenhuma tendência temporal significativa, apesar do teste de Mann-Kendall sugerir uma leve tendência (valor- $p = 0,045$) de aumento de ocorrência nos períodos 2 e 3. Visualmente não são observadas tendências de *clusters* nos períodos de ocorrência. Com exceção de um posto, todos os demais apresentaram valores- p acima do nível de significância de 5%, sugerindo nenhuma tendência temporal no período de ocorrência dos picos de vazão.

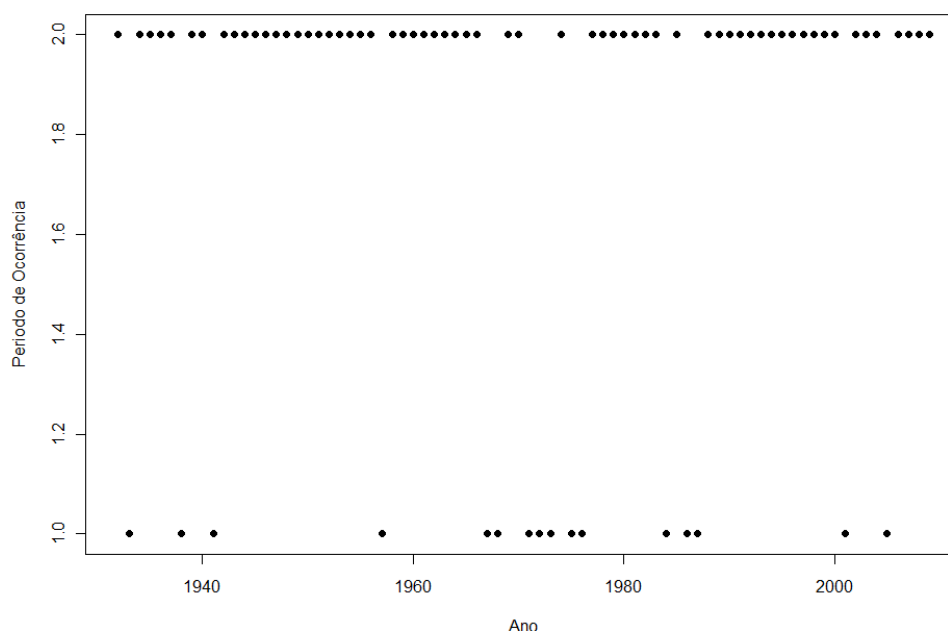


Figura 10 - Variação temporal no período de ocorrência dos picos de vazão para o posto do reservatório Furnas.

apresentaram valor-p menor que 0,05 para os picos de todos os três períodos, sugerindo uma tendência temporal homogênea, mesmo que diferenciada quanto a intensidade ao longo do três períodos.

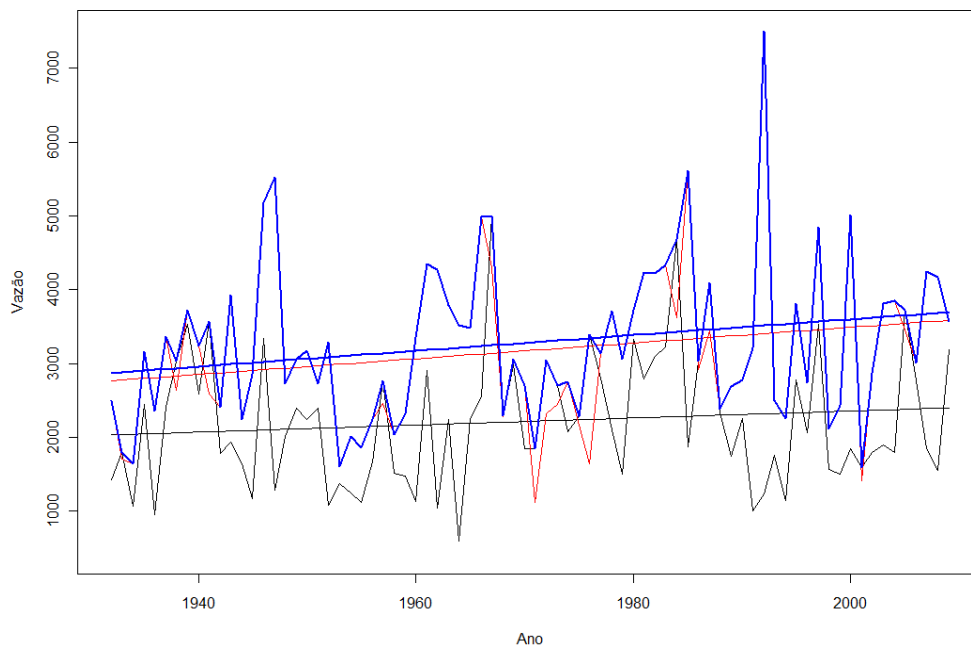


Figura 12 - Vazões máximas observadas para o período 1 (preto) e 2 (vermelho) e ano hidrológico (azul) para o posto de Furnas. As linhas retas indicam a linha de ajuste de tendência temporal.

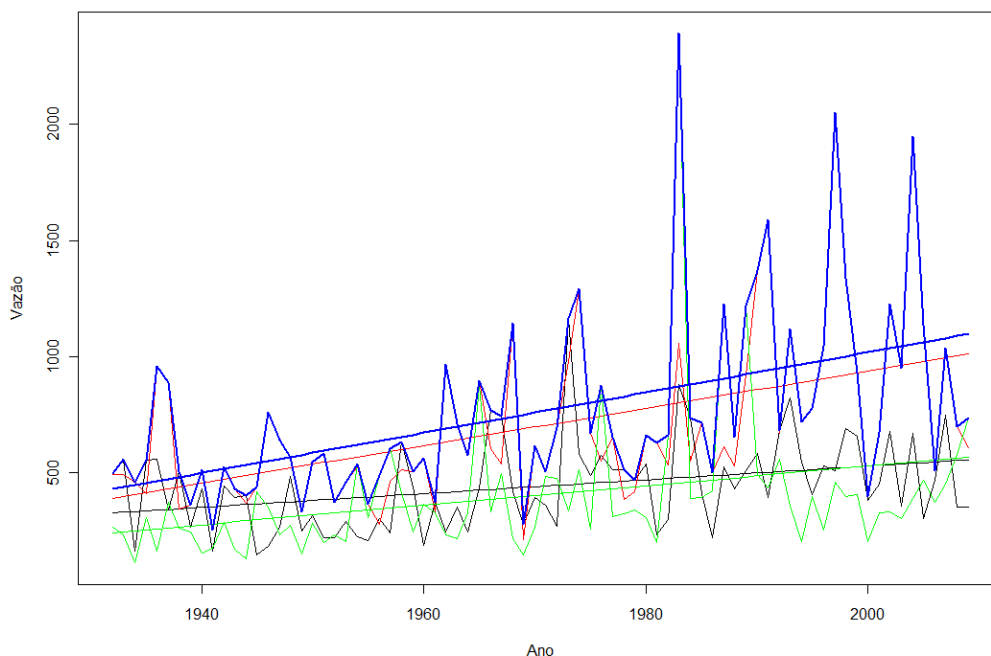


Figura 13 - Vazões máximas observadas para o período 1 (preto), 2 (vermelho), 3 (verde) e ano hidrológico (azul) para o posto do Marimbondo. As retas mostram a tendência temporal.

5 – DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Buscou-se neste trabalho analisar os dados de picos de vazão de vários postos localizados na Bacia do Rio Paraná quanto a diferenças na magnitude dos picos sazonais de vazão e evidências de tendências temporais nesses dados. Com isso, foram estabelecidas as principais bases empíricas para o estudo e desenvolvimento de modelos de análise de frequências de cheias para os postos da região que não necessitem de satisfazer as suposições básicas dos modelos clássicos, como homogeneidade e estacionariedade dos dados.

A análise hidrológica mostrou que os picos de vazão tendem a ocorrer nos períodos 1 (Set-Dez) e 2 (Jan-Abr) para a maior parte dos reservatórios, com uma predominância no período 2. Nos reservatórios localizados na parte sudeste da bacia o pico anual de vazão pode ocorrer também no período 3 (Maio-Ago). Uma correlação linear entre os picos desses períodos foi observada na maior parte dos reservatórios, mas o estabelecimento da causa dessa associação, seja hidrológica devido a persistência das vazões ou climática devido à associação entre picos de precipitação, requer investigações adicionais.

Nenhuma evidência de concentração dos picos em algum período ao longo do anos foi observada. Porém, tendências temporais de aumento no pico da vazão também foram observadas nos diversos períodos, com uma maior magnitude nas cheias que ocorrem no período 2 (Jan-Abr), e portanto são as tendências temporais que mais influenciam as tendências nos máximos anuais já observados em estudos anteriores (Mueller *et al.*, 1998). Estudos que considerem séries parciais de vazão máxima visando analisar tendências temporais na frequência de ocorrência de eventos de cheias serão temas de trabalhos futuros.

O desenvolvimento de modelos para análise de frequência de cheias na região requer portanto a consideração desses fatores. Uma mistura de distribuições como realizada em Smith *et al.* (2010) pode ser adequada para avaliar as diferentes famílias de distribuições que compõem a cheia anual, porém deve ser considerada a dependência linear existente entre os dados de pico de vazão dos períodos 1 e 2 e dos períodos 2 e 3, como apresentado aqui. Uma clara tendência temporal foi também observada nos picos de cheia, sugerindo que os parâmetros dessas distribuições devem ser não-estacionários. O acoplamento dessas duas características em um só modelo de frequência de cheias é um tópico aberto na literatura e será também tema de investigações futuras, incluindo o estudo dos processos climáticos responsáveis pelos resultados obtidos neste trabalho. Visa-se assim a obtenção de modelos mais robustos e confiáveis que são essenciais para um melhor gerenciamento do risco de cheias na região.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a ONS pela disponibilização dos dados de vazão diária para a região.

BIBLIOGRAFIA

- CLARKE, R. T. (2002A). "Estimating time trends in Gumbel-distributed data by means of generalized linear models". *Water Resources Research*, 38(7), 1111.
- _____ (2002B). "Estimating trends in data from the Weibull and a generalized extreme value distribution". *Water Resources Research*, 38(6), 1089.
- FILL, H. D.; OLIVEIRA, F. B.; SANTOS, P. (2008). "Avaliação de Cheias Considerando Distribuições Sazonais". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, no. 2, pp. 5-13.
- HOLLANDER, M., WOLFE, D. A. (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. New York: John Wiley & Sons.
- JAIN, S.; LALL, U. (2001). "Floods in a changing climate: Does the past represent the future?". *Water Resources Research*, 37(2), pp. 3193-3205.
- KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. (2002). "Statistics of extremes in hydrology". *Advances in Water Resources*, 25, pp. 1287-1304.
- 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.
- KWON, H-H., KHALILL, A. F.; SIEGFRIED, T. (2008). "Analysis of extreme summer rainfall using climate teleconnections and typhoon characteristics in South Korea". *Journal of the American Water Resources Association*, 44 (02), pp. 436-448.
- LIEBMANN, B. et al. (2004). "An Observed Trend in Central South American Precipitation". *J. of Climate*, v.17, p. 4357-4367.
- LIMA, C.H.R.; LALL, U. (2008). "Hidroclimatologia de cheias: eventos extremos, não-estacionariedade, processos climáticos de larga escala e uma perspectiva para simulações num contexto de mudanças climáticas globais", II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro, Out. 2008.
- MAIDMENT, D. R. (editor) (1992). "Handbook of Hydrology". Mc-GraHill.
- MARTINS, E. S.; STEDINGER, J. R. (2001). "Historical Information in a generalized maximum likelihood framework with partial duration and annual maximum series", *Water Resources Research*, Vol. 37 (10), pp. 2559-2567.
- MILLY, P. C. D., WETHERALD, R. T.; DUNNE, K. A.; DELWORTH, T. L. (2002). "Increasing risk of great floods in a changing climate". *Nature*, vol. 415, 31 de Janeiro.

- MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKY, E. (1998). *"Análise de estacionariedade de series hidrológicas na bacia incremental de Itaipu"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n. 4, p. 51-71, 1998.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM. 552p.
- OLSEN, J. R.; STEDINGER, J. R.; MATALAS, N. C.; STAKHIV, E. Z. (1999). *"Climate variability and flood frequency estimation for the upper Mississippi and lower Missouri rivers"*, Water Resources Research, 35 (6), pp. 1509-1523.
- REBOITA, M.S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, E. T. (2010). *"Regimes de precipitação na América do Sul: Umma Revisão Bibliográfica"*. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, pp. 185-204.
- SMITH, J.A., VILLARINI, G., BAECK, M.L. (2010). *"Mixture Distributions and the Hydroclimatology of Extreme Rainfall and Flooding in the Eastern United States"*. J. of Hydrometeorology, v. 12, pp. 294-309.
- STEDINGER, J. R., COHN, T. A. (1986). *"Flood frequency analysis with historical and paleoflood information"*, Water Resources Research 22 (5), pp. 785–793.
- TEIXEIRA, M.S.; SATYAMURTY, P. (2010). *"Trends in the Frequency of Intense Precipitation Events in Southern and Southeastern Brazil during 1960–2004"*. J. of Climate, v.24, p. 1913-1921, 2011.
- WAYLEN, P., WOO, M-K. (1982). *"Prediction of Annual Floods Generated by Mixed Processes"*. Water Resources Research, v. 18, no. 4, pp. 1283-1286.