

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES DE VAZÕES NA BACIA DO RIO IGUAÇU

Matheus Graciano¹; Daniel H. M. Detzel²

RESUMO – A matriz energética brasileira e paranaense é composta majoritariamente pela geração hidrelétrica. O cálculo de geração de energia de um aproveitamento hidrelétrico depende da vazão afluente, logo quanto maior o entendimento do comportamento do rio e da bacia referente, maior a segurança na operação e na construção destas centrais geradoras hidrelétricas.

Durante muitos anos foi assumido que as séries históricas fluviométricas apresentavam comportamento estacionário. Contudo, sabe-se que diversos fatores podem contribuir para modificar este comportamento estacionário, como por exemplo a ação do homem e as mudanças climáticas, logo torna-se necessário o estudo de detecção de tendências destas séries para que se torne possível fazer previsões de vazões, a longo e curto prazo, com maior precisão.

Na sequência, foram aplicados para as mesmas séries alguns testes estatísticos como o de Mann-Kendall, utilizando o teste de Şen como complemento, para detecção de tendências.

A área de estudo definida foi a da bacia do rio Iguaçu, devido principalmente ao grande potencial de geração de energia apresentado e também por tratar-se de um rio paranaense com uma boa quantidade de estações fluviométricas.

A complementaridade desses dois métodos não apresentou grande eficácia. A aplicação dos mesmos testes considerando a sazonalidade dos registros pode apresentar resultados com maior similaridade.

ABSTRACT – The Brazilian and Paraná energy matrix are composed mainly by hydroelectric generation. The calculation of the power generation of a hydroelectric plant depends on the affluent flow, so the greater the understanding of the behavior of the river and the basin, greater the safety in the operation and the construction of these hydroelectric generating plants.

1) Graduando em engenharia civil da UFPR – matheus-graciano1@hotmail.com
2) D. Eng., Pesquisador no Lactec e Professor Adjunto da UFPR – daniel@lactec.org.br

For many years, it was assumed that the historical fluviometric series presented a steady behavior. However, it is known that several factors can contribute to modify this stationary behavior, as example, the action of man and the climatic changes, so becomes necessary the study of trend detection of these series. It becomes possible to make predictions of flows , in long and short term, with greater precision.

Subsequently, some statistical tests, such as Mann-Kendall, using the Şen test as a complement, were used for the same series to detect trends.

The area of study defined was that of the Iguaçu river basin, due mainly to the great power generation potential presented and because it is a Paraná's river with a good amount of fluviometric stations.

The complementarity of these two methods was not very effective. The application of the same tests considering the seasonality of the records can present results with greater similarity.

Palavras-Chave – Hidrologia estocástica, Detecção de tendências, Bacia do Iguaçu, Método de Şen.

INTRODUÇÃO

Um dos principais focos de discussão da comunidade científica atualmente são os estudos que consigam descrever com precisão o comportamento histórico dos recursos hídricos. O aumento da população gera novas demandas, como o abastecimento urbano, irrigação, alimentação e, por fim, a geração de energia elétrica. Tal situação indica a necessidade de conservação e uso sustentável desse recurso, como políticas de gestão e planejamento, afim de evitar a falta desses recursos

O melhor entendimento das influências climáticas nos recursos hídricos, e posteriormente nos registros da série histórica, passa pela identificação de tendências sazonais de precipitação e vazão, visto que estes dados serão inseridos nos modelos para previsão e gestão hidrológica

Outros autores como (PUMO et al, 2016), também entendem que as tendências dos processos hidrológicos são de extrema importância, visto que fatores climáticos como a intensidade e distribuição sazonal das precipitações, e características do terreno interferem no regime de vazões de um rio.

O modelo estacionário é como um modelo no qual as suas propriedades estatísticas (média e variância) não se alteram em função do tempo, ou seja, seus momentos estatísticos são constantes. (Hipel e McLeod, 1994, p. 67)

Mesmo com o entendimento da não estacionaridade das séries, ainda ocorre uma suposição simplista de que as estatísticas da série observada no passado vão continuar a mesma no futuro. Métodos para estimar a frequência de eventos hidrológicos ainda utilizam deste conceito.

Aqui cabe salientar que a estacionaridade não é encontrada em nenhum processo na natureza. Contudo, apesar das dificuldades na identificação das alterações na série hidrológica, é fundamental para o setor de recursos hídricos e geração de energia hidrelétrica, estudos e modelos que procurem verificar essas modificações e posteriormente modelar com maior exatidão a geração de série sintéticas. Logo, o processo de detecção ganha significativa importância nesse cenário.

O método para identificação de tendências pode ser resumido como sendo o processo de detecção, baseado na análise de uma série de dados observados em certo período de tempo e buscar identificar mudanças, como por exemplo nas séries de máximos e mínimos (AMORIM. R. S., 2018), objetivando maior entendimento do comportamento atual e futuro da série.

Dois tipos de modelos são conhecidos para realizar esta previsão hidrológica, são eles os modelos estocásticos e os modelos determinísticos. O modelo estocástico, foco desse trabalho, analisa a estrutura da série e sua dependência temporal, enquanto que os modelos determinísticos objetivam representar os processos físicos.

(Quintela e Portela, 2002) argumentam que, no essencial, modelos de previsão podem ser determinísticos e não determinísticos, sendo que, naquele primeiro tipo se incluem os modelos empíricos e os fisicamente baseados, e, no segundo tipo, os modelos probabilísticos e os estocásticos.

Mesmo com a utilização de dados consistidos, alguns cuidados devem ser tomados na aplicação dos modelos, pois os mesmos são baseados em representações aproximadas da realidade, logo estão sujeitos a imprecisões. Estas imprecisões decorrem do monitoramento, muitas vezes, insuficiente e também das incertezas intrínsecas associadas ao processo. Logo, tais incertezas devem ser levadas em consideração nas tomadas de decisão da engenharia.

O modelo de Mann-Kendall (M-K, Mann, 1945, Kendall, 1975) vem sendo utilizado em diversos estudos hidrológicos, aplicando-se o método nas séries temporais (Douglas et al, 2000; Yue et al.; 2003, etc). Este teste não-paramétrico é comumente utilizado para avaliar a significância de séries monotônicas.

Uma das vantagens apresentada pelo teste MK é que, por tratar-se de um método de distribuição livre, seu poder e significância não são afetados pela distribuição dos dados (Mann, 1945). Este teste ganhou notoriedade também na identificação de tendências de séries de outros eventos naturais, como temperatura e precipitação por exemplo.

Segundo (Yue et al, 2002) estes dois testes têm, aproximadamente, a mesma capacidade (poder) para identificar tendências em séries temporais. O uso em larga escala dos métodos não-paramétricos

se deve, principalmente, ao fato de que são métodos que se adequam mais facilmente a situações em que os dados não são normalizados, e também a casos em que faltam registros da série, situação comum no registro de eventos naturais. Contudo, é assumido que estes dados naturais apresentam uma distribuição aleatória idêntica na série temporal, fato este que raramente ocorre na natureza. A aplicação de outro teste em conjunto com MK pode ser interessante neste sentido.

O teste gráfico proposto por Şen (Şen, 2012) ganha espaço devido as restrições dos métodos propostos anteriormente. Este método utiliza uma abordagem distinta, baseado na divisão da série histórica em duas subseções, as quais são plotadas em um sistema de coordenadas Cartesiano. Séries livre de tendências aparecem ao longo de uma linha 1:1 (45°) traçado no plano. Tendências de crescimento (área do triângulo superior) e de decrescimento (área do triângulo inferior) são facilmente identificadas. A validade deste método está documentada em uma série de simulações de Monte Carlo, considerando processos dependentes e independentes (Şen, 2012, 2014).

O uso em conjunto do teste de Mann-Kendall e de Şen já foi aplicado por (O. Kisi, 2014). O processo foi aplicado à parâmetros de qualidade de água em 5 estações localizadas no rio Kizilirmak, na Turquia. Para efeito de comparação, ambos os testes foram aplicados no mesmo conjunto de dados, ou série histórica. O estudo aponta que o método proposto por Şen apresenta algumas vantagens quando comparado ao tradicional teste de Mann-Kendall, principalmente quando aplicado a séries de dados em que são avaliados baixos, médios e altos valores.

O seguinte trabalho tem como objetivo a aplicação de modelos como os testes de Mann-Kendall e Şen, na região da Bacia do Iguaçu, devido ao grande potencial de geração de energia hidrelétrica da bacia. Entende-se que quanto maior o entendimento dos fenômenos naturais (como intensidade e frequência das precipitações), melhor a previsão da vazão afluente que chegará às unidades geradoras e conseqüentemente maior exatidão no cálculo de energia garantida da unidade.

OBTENÇÃO DAS SÉRIES HISTÓRICAS

As séries históricas das estações fluviométricas para alimentar os testes de tendência foram obtidos a partir do site Hydroweb, utilizando o código da estação para realizar a busca. Os dados provenientes deste site podem por vezes apresentar inconsistências, portanto antes da aplicação deste foi realizado um estudo para analisar quais estações apresentavam dados em quantidade e consistência satisfatórias para serem utilizados. As séries históricas variaram entre 06/1930 e 12/2014. O tamanho mínimo da amostra foi definido em 30 valores, com frequência de medição mensal.

MÉTODO GRÁFICO DE ŞEN PARA DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS.

O método gráfico proposto por Şen ainda é pouco conhecido. O mesmo consiste em dividir a série histórica apresentada em duas subséries mutualmente exclusivas e de mesmo tamanho e, em seguida, ordenar ambas as subséries em ordem crescente, ao final, comparam-se as suas respectivas taxas de crescimento.

O procedimento proposto por Şen (Şen 2012, 2014), pode ser melhor entendido executando seguindo o procedimento:

Dividir a dada série temporal em duas subséries

Colocar ambas subséries em ordem crescente

Plotar ambas as séries ordenadas em um gráfico. A primeira metade ($X_i: i= 1, 2, 3, \dots, n/2$) deve preferencialmente ser locada no eixo horizontal do sistema Cartesiano, enquanto a segunda metade ($X_j: j= n/2 + 1, n/2 + 2, n/2 + 3, \dots, n$) deve preferencialmente ser locada no eixo vertical do sistema cartesiano.

Ambos os eixos devem estar na mesma escala.

Criar uma linha no plano cartesiano 1:1 (45°)

Os gráficos devem ser interpretados da seguinte maneira:

- Caso o gráfico da série histórica fique próximo da linha 1:1 isto significa uma série sem tendência ou com baixa relevância da tendência (no significant trend)

- Podem ocorrer dois tipos de tendência de crescimento:

Tendência de crescimento monotônica (monotonic) – Ocorre quando todos os pontos do gráfico ficam acima da linha 1:1;

Tendência de crescimento não monotônica (no monotonic) – Ocorre quando a série oscila próxima a linha 1:1, estando horas acima e horas abaixo da mesma, contudo estando superior a esta no final da série.

- Podem ocorrer dois tipos de tendência de decrescimento:

Tendência de decrescimento monotônica (monotonic) – Ocorre quando todos os pontos do gráfico ficam abaixo da linha 1:1;

Tendência de decrescimento não monotônica (no monotonic) – Ocorre quando a série oscila próxima a linha 1:1, estando horas acima e horas abaixo da mesma, contudo estando inferior a esta no final da série.

A figura 1, a seguir, exhibe as situações descritas.

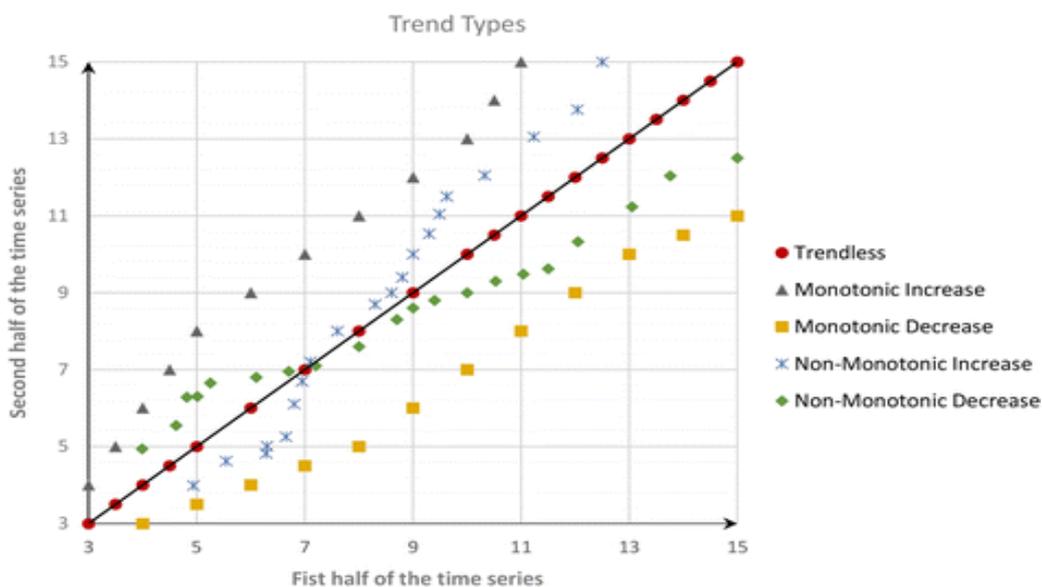


Figura 1 – Exemplos de tendência pelo método de Şen

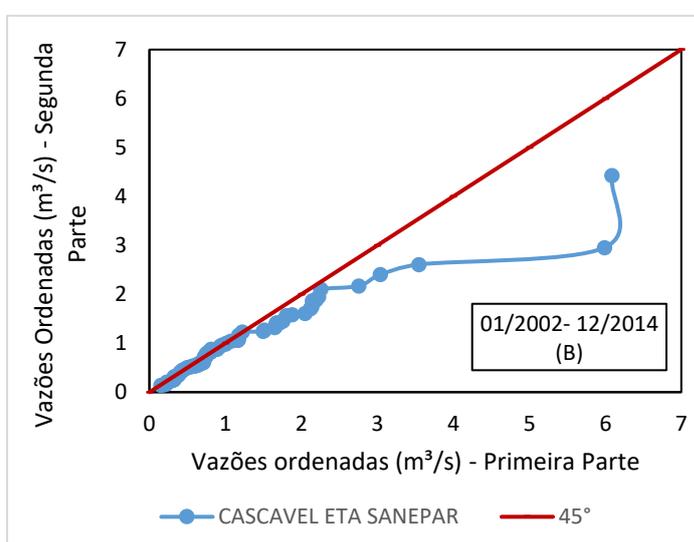
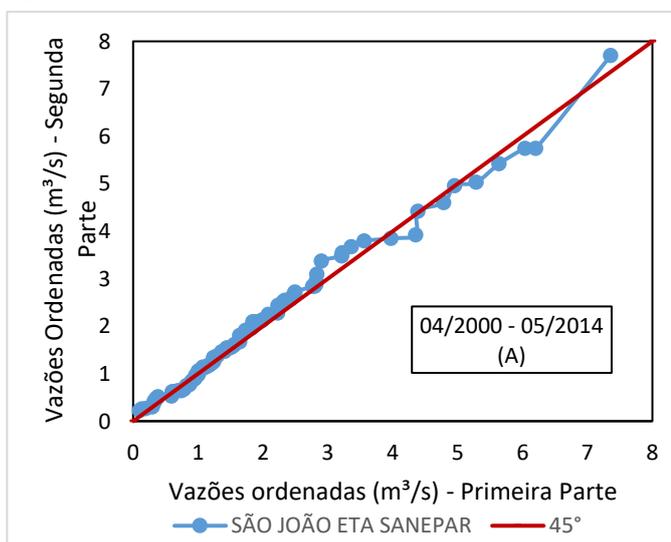
MÉTODO DE MANN-KENDALL

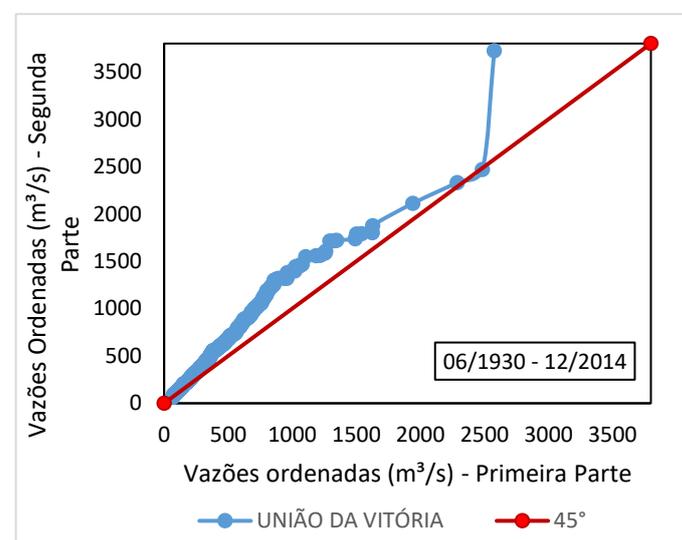
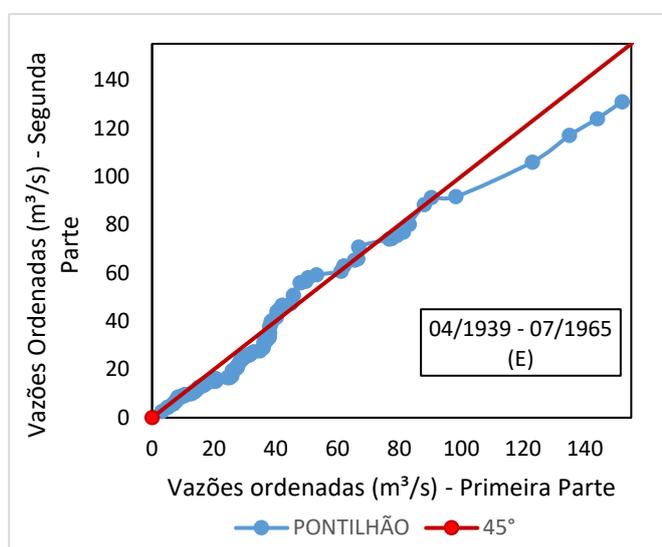
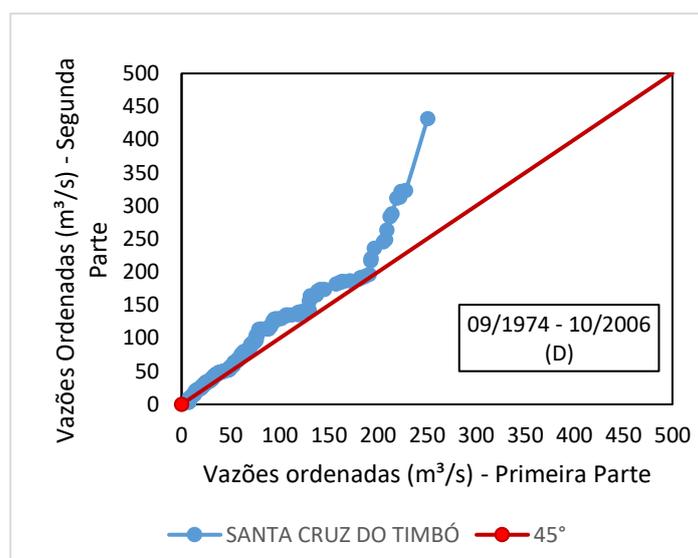
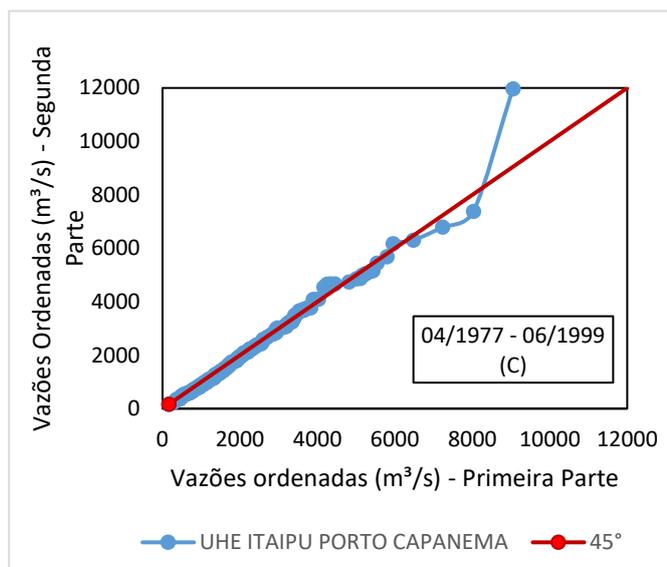
O valor de significância adotado na execução do método foi de 0,05. A interpretação do teste de Mann-Kendall está associada à rejeição, ou não, da hipótese nula (H_0) por meio dos p-valores.

A rejeição de H_0 significa na rejeição da hipótese de não haver tendência, ou seja, ao rejeitar H_0 assume-se que existe a probabilidade de haver tendência na série estudada. As séries que rejeitaram H_0 , foram aquelas cujo p-valor foi menor que o valor de significância adotado, no caso de 0,05.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

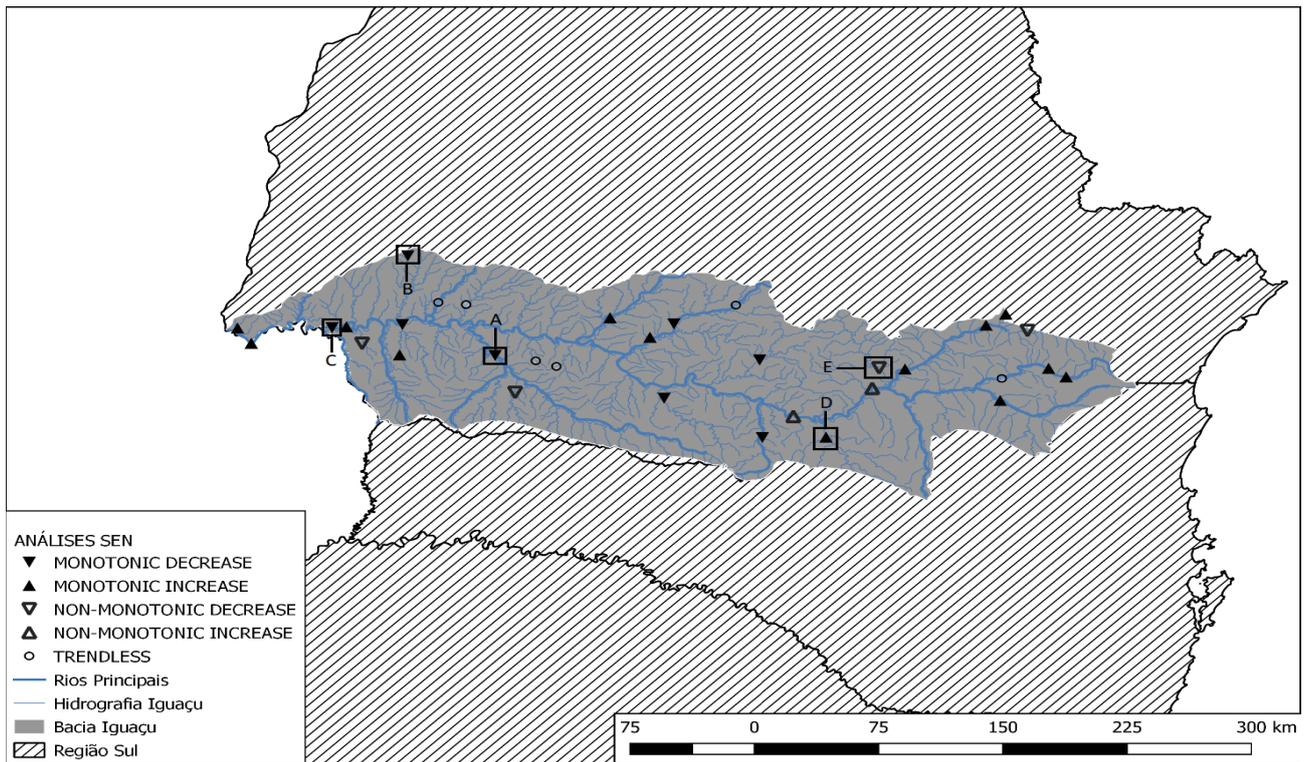
A seguir são mostrados os 5 gráficos (A, B, C, D e E) para exemplificação de cada situação possível pelo método de Şen.





Exemplos das tendências ou não-tendência detectadas pelo método de Şen. Gráfico (A) – Sem tendência (TRENDLESS), Gráfico (B) – Decréscimo monotônico (MONOTONIC DECREASE), Gráfico (C) – Crescimento não-monotônico (NON-MONOTONIC INCREASE), Gráfico (D) – Crescimento monotônico (MONOTONIC INCREASE) e Gráfico (E) – Decréscimo não-monotônico (NON-MONOTONIC DECREASE). A sexta figura é apenas mais um exemplo.

MÉTODO DE ŞEN



MÉTODO DE MANN-KENDAALL

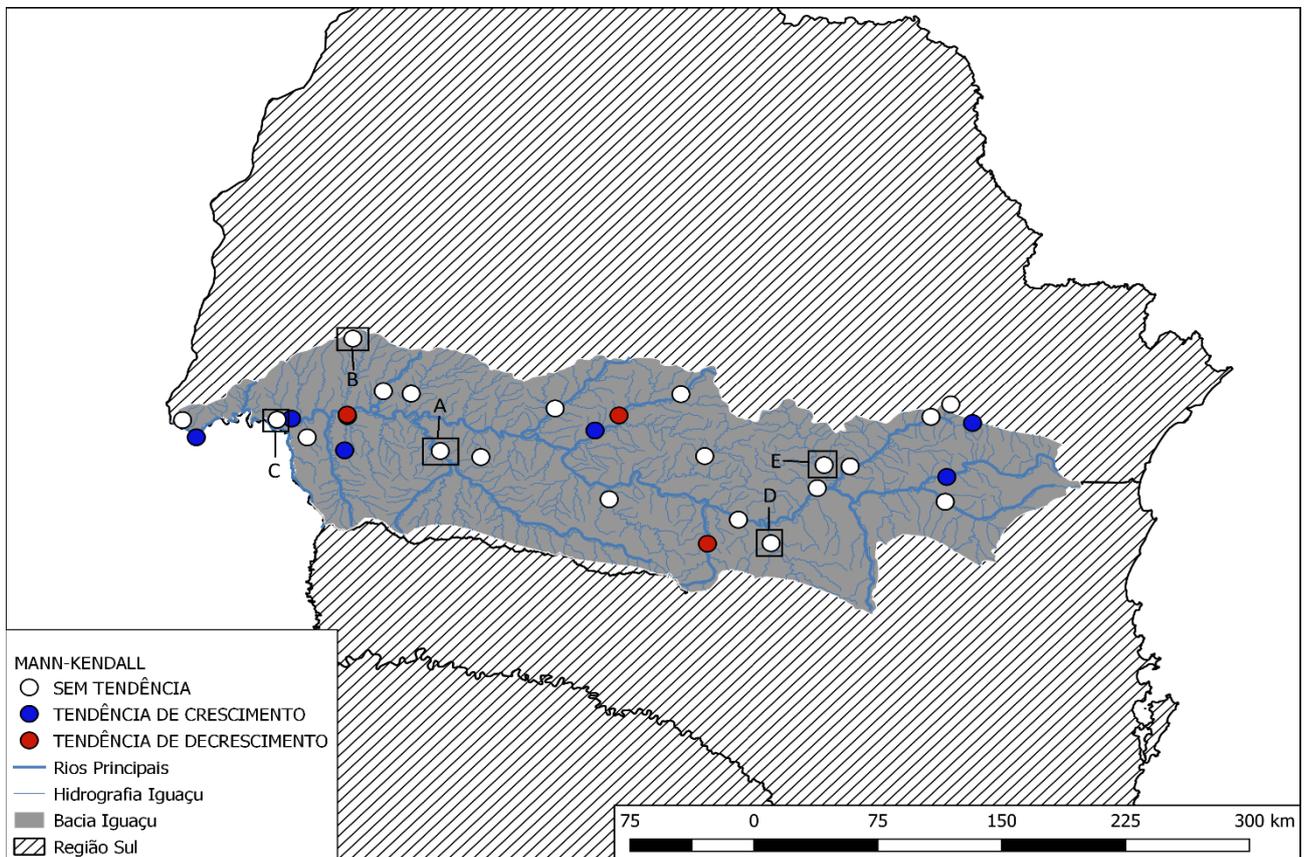


Figura 2 – Mapas com os resultados dos testes de Şen e de Mann-Kendaall

CONCLUSÕES

Os resultados não foram tão consistentes quanto esperado. Poucas estações observadas apresentaram resultados complementares esperados, aplicando-se os dois testes propostos.

Uma provável justificativa para estes resultados tenha sido a escala temporal adotada para aplicação dos testes. O intervalo dos registros de um mês pode ter causado essa diferença entre os dois testes.

A aplicação dos testes envolvendo a sazonalidade pode ser um caminho para a obtenção de resultados mais próximos.

Analisando-se as ilhas de estudo, é possível notar que o teste de Mann-Kendall apresentou resultados mais consistentes, visto que estações próximas ou localizadas no mesmo rio apresentam resultados similares. Este fato não acontece no teste gráfico de Şen, visto que estações muito próximas apresentam tendências diferentes.

Um desses casos é o das estações São Mateus do Sul e UHE Gov. Ney Aminthas São Mateus do Sul. As duas estão localizadas muito próximas, contudo elas apresentam comportamento de Crescimento Monotônico (MONOTONIC INCREASE) e Decrescimento Não-Monotônico (NON-MONOTONIC DECREASE), respectivamente. O período analisado foi diferente para as duas. A série histórica de São Mateus do Sul estudada começa em 05/1930 e acaba em 12/2014. Já a série histórica de UHE Gov. Ney Aminthas São Mateus do Sul começa em 03/2003 e acaba em 06/2009. Restringindo a série de São Mateus do Sul ao mesmo período da série histórica da UHE Gov. Ney Aminthas São Mateus do Sul, período compreendido entre 03/2003 e 06/2009, o resultado segundo o método de Şen foi o mesmo, Decrescimento Não-Monotônico (NON-MONOTONIC DECREASE).

A discrepância entre alguns resultados no mesmo teste pode ter sido causado devido a sua localização à jusante de reservatórios, logo a série de vazões registrada é diferente do natural.

Outra análise realizada foi comparar somente as séries caracterizadas como não-monotônicas com os resultados de Mann-Kendall. Por tratar-se de uma análise gráfica, a mesma está sujeita a apresentar, eventualmente, resultados com mais de uma interpretação possível, principalmente nos que apresentam comportamento não-monotônico. Alguns resultados apresentaram boa complementariedade como no Rio Jordão, em que os três postos fluviométricos apresentaram resultados semelhantes para ambos os testes, mesmo com a existência do efeito cascata no rio.

REFERÊNCIAS

- D. Pumo, F. Lo Conti, F. Viola, L.V. Noto, (2016) An automatic tool for reconstructing monthly time-series of hydro-climatic variables at ungauged basins
- HIPEL, K. W., McLEOD, A. I. Time series modelling of water resources and environmental systems, 1994. Disponível em: <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>. Acesso em: 12/11/2012.
- AMORIM, R. S. (2018). Detecção de Tendências em Séries de Extremos Hidrológicos Considerando Efeitos de Autocorrelação Temporal e Multiplicidade de Testes. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DMXXX/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167 p.
- Alves, B. C. C., Souza, F. A. S., Silveira, C. S. (2013). “Análise de Tendências e Padrões de Variação das Séries Históricas de Vazões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)”. In: RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 18, n. 4 (Out/Dez)
- Quintela, A. C.; Portela, M. M, (2002). A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.7, n.4, p.51-64, 2002.
- H.B. Mann (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13 (1945), pp. 245-259
- M.G. Kendall (1975) Rank Correlation Method. Charles Griffin, London (1975)
- Z. Şen (2012) Innovative trend analysis methodology. *J. Hydrol. Eng.*, 17 (9) (2012), pp. 1042-1046
- Z. Şen (2014) Trend identification simulation and application. *J. Hydrol. Eng.*, 19 (3) (2014), pp. 635-642
- Yue, S., Pilon, P., and Cavadia, G. (2002). “Corrigendum to ‘Power of the Mann-Kendall and Spearman’s Rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series.’” *J. Hydrol.*, 259(1–4), 254–271.
- Yue, S., and Wang, C. Y. (2002). “Applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test.” *Water Resour. Res.*, 38(6), 1068.
- Detzel, D. H. M., Bessa, M. R. B., Vallejos, C.A.V., Santos, A.B., Thomsen, L.S., Mine, M. R. M., Bloot, M. L., Estrócio, J.P. (2011). “Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras”. In: RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 16, n. 3 (Jul/Set), 95 – 111.
- Kisi, O., Ay, M., (2014) Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey
- Douglas, E.M., Vogel, R.M., Kroll, C.N., (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology* 240 (1–2), 90–105