



XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA SÉRIE DE VAZÕES DA BACIA DO RIO MUNDAÚ-AL/PE

Aryane Mota de Oliveira¹ ; Pedro Henrique de Omena Toledo²

RESUMO – O conhecimento da variabilidade temporal da vazão é fundamental para o planejamento estratégico dos recursos hídricos. Diversos são os métodos estatísticos que podem ser aplicados para testar o comportamento temporal das variáveis hidrológicas. Estes métodos podem ser paramétricos ou não-paramétricos, sendo que o último permite uma maior abrangência, principalmente com série de dados pequenas. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivo verificar a homogeneidade de séries temporais e a existência de tendência para a variável vazão utilizando os métodos não paramétricos propostos por: Wald-Wolfowitz; Mann e Whitney; Spearman; Man e Kendall; Pettitt; utilizando como área de estudo a bacia do Rio Mundaú. O método de MK indicou mudança de tendência em três dos cinco postos que foram objetos de estudo. Para os postos fluviométrico 3974 e 3977 os métodos de MKS e Pettitt coincidiram no resultado e indicaram a não rejeição da Hipótese nula de não mudança de tendência dos dados observados.

Palavras-Chave: Man – Kendall; Pettitt; Rio Mundaú.

ABSTRACT– Knowledge of the temporal variability of flow is critical to the strategic planning of water resources. There are several statistical methods that can be applied to test the temporal behavior of hydrologic variables. These methods can be parametric or non-parametric, with the latter permits greater abrangência, especially with small number of data. In this sense, this study aimed to verify the homogeneity of time series and the existence of a tendency for the variable flow rate using the nonparametric methods proposed by: Wald-Wolfowitz; Mann and Whitney; Spearman; Man and Kendall; Pettitt; using as a study area the basin of the Rio Mundaú. The method of MK indicated trend change in three of the five stations that were objects of study. For gaging stations 3974 and 3977 methods of MKS and Pettitt concurred in the result and indicated not to reject the null hypothesis of no change in the trend of observed data.

Key-words: – Man – Kendall; Pettitt; Mundaú River.

1) Universidade Federal de Alagoas. Av. Lourival Melo Mota, SN – Tabuleiro dos Martins- Maceió/AL, aryry_mota@hotmail.com

2) Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife-PE. pedro.omena@ufpe.br

1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico de uma bacia é um processo complexo, influenciado pelo clima, características físicas da bacia e as atividades humanas. Devido ao agravamento dos problemas de escassez de água e o aumento global dos desastres relacionados com a água, os efeitos das alterações climáticas e as atividades humanas sobre os recursos hídricos têm sido um foco de pesquisa hidrológica (Liu et al., 2015). O escoamento anual de muitos rios diminuiu notavelmente nas últimas décadas, causando uma série de problemas de recursos hídricos (Miao et al., 2011, Tian et al., 2009).

Desta forma, o conhecimento da variabilidade temporal da vazão é fundamental para o planejamento estratégico dos recursos hídricos.

Quantificar o impacto da mudança do uso da terra no ciclo hidrológico é um desafio, especialmente em escala regional onde diversas mudanças ocorrem ao longo de diferentes estágios (GAO et al., 2016). Em escala local, o efeito da mudança em um único tipo de uso do solo, como a arborização, na vazão pode ser avaliado usando a abordagem de análise de tendência (BROWN et al., 2005; ZHAO et al., 2010).

Segundo Triola (2008), os testes paramétricos têm requisitos sobre a natureza ou a forma das populações envolvidas, os testes não-paramétricos não exigem que as amostras venham de populações com distribuições normais ou qualquer outra distribuição particular. Embora o termo não-paramétrico sugira que o teste não se baseie em um parâmetro, há alguns testes não-paramétricos que dependem de um parâmetro, como a mediana.

Vantagens dos métodos não-paramétricos (Triola, 2008):

- Se aplicam a uma grande variedade de situações, porque não possuem as exigências mais rígidas dos métodos paramétricos correspondentes.
- Podem ser aplicados aos dados categóricos.
- Envolvem cálculos mais simples e são mais fáceis de ser entendidos e aplicados.

Desvantagens dos métodos não-paramétricos (Triola, 2008):

- Tendem a desperdiçar informação, porque os dados numéricos exatos, são, em geral, reduzidos a uma forma qualitativa.
- Não são tão eficientes quanto aos testes paramétricos, de modo que, com os testes não-paramétricos se precisa, em geral, de evidência mais forte para rejeitar a hipótese nula.

Os testes não-paramétricos de maior utilidade na hidrologia são (Naghetini e Pinto, 2007):

- Teste da hipótese de independência: a independência significa que nenhuma observação presente na amostra pode influenciar a ocorrência, ou não ocorrência, de qualquer outra

observação seguinte. Mesmo que uma série seja considerada aleatória, as observações que a constituem podem não ser independentes.

- Teste da hipótese de homogeneidade: homogeneidade implica que todos os elementos de uma certa amostra provêm de uma única e idêntica população.
- Teste da hipótese de estacionariedade: estacionariedade refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as observações amostrais são invariantes, com relação à cronologia de suas ocorrências.

Neste escopo, este trabalho objetiva verificar a homogeneidade de séries temporais e a existência de tendência nas séries de vazões da bacia do rio Mundaú.

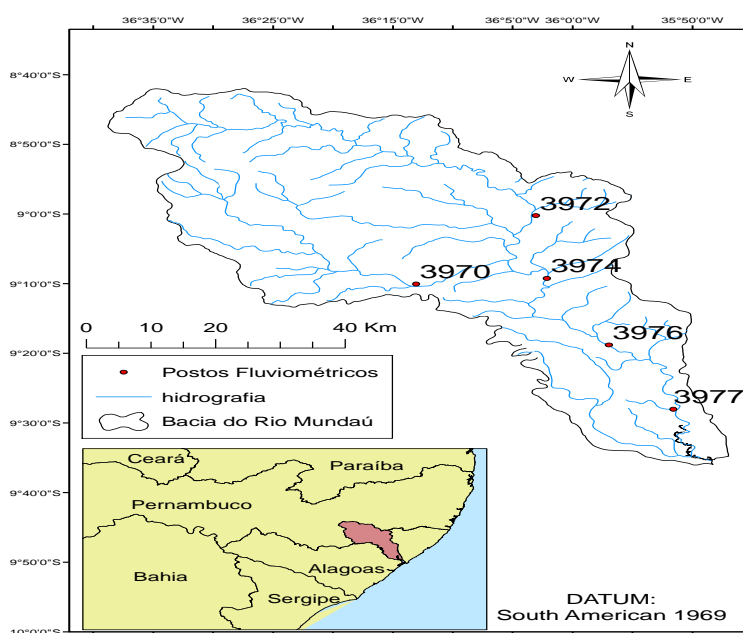
2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Área de Estudo

A bacia do rio Mundaú possui 2.126 km² compartilhados entre os estados de Alagoas e Pernambuco. Na porção noroeste a bacia é caracterizada pelo bioma Caatinga e aspecto climático semiárido, estando inclusive na região classificado como Polígonos das Secas, e o bioma Mata Atlântica na parte baixa estendendo-se até a foz com clima tropical quente e úmido (COSTA, 2014).

A região é caracterizada por uma forte variação no total da precipitação média anual, onde a parte alta da bacia tem uma média de 870 mm/ano e a parte baixa tem uma média de 2.100 mm/ano (COTEC, 1999).

Figura 1 - Área de Estudo



2.2 Dados Utilizados

As vazões médias anuais foram provenientes do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) disponibilizadas no portal <http://hidroweb.ana.gov.br>.

2.3 Testes Não-Paramétricos

- **Teste da hipótese de independência**

Sabendo que alguns testes estatísticos de hipóteses exigem que certos requisitos sejam atendidos para que sejam realizados - conforme pode ser notado no caso dos testes paramétricos, que exigem que os dados observados sejam independentes entre si; o segundo teste realizado sobre a série de vazões foi o teste de independência proposto por Wald-Wolfowitz, no qual encontra-se descrito a seguir (Naghettini e Pinto, 2007):

Dada uma amostra $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, de tamanho N , e as diferenças $\{X'_1, X'_2, \dots, X'_N\}$, entre as observações X_i e a média amostral \bar{X} , a estatística do teste de Wald-Wolfowitz é dada por:

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i \cdot X'_{i+1} + X'_1 \cdot X'_N \quad (1)$$

Onde a média é dada por $w = \frac{S^2}{N-1}$ e a variância por

$$\sigma_w^2 = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} + \frac{S_2^2 - 2 \cdot S_4}{(N-1) \cdot (N-2)} - \frac{S_2^2}{(N-1)^2} \quad (2)$$

Sendo,

$$S_r = \sum_{i=1}^N (x'_i)^r \quad (3)$$

Por fim, a estatística de teste não paramétrico de Wald-Wolfowitz foi calculada utilizando a equação 4, a qual segue uma distribuição Normal padrão.

$$T = \frac{R - W}{\sqrt{\sigma_w^2}}, \quad (4)$$

Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula (as observações são independentes) se $|T| > Z_{1-\alpha/2}$.

- **Teste da hipótese de homogeneidade**

A homogeneidade de uma amostra implica que todos os elementos de certa amostra provêm de uma única e idêntica população. As amostras hidrológicas geralmente de tamanhos pequenos, tornam difícil a detecção da heterogeneidade eventualmente presente na série completa (Naghettini e Pinto, 2007). A rejeição ou não-rejeição da hipótese de homogeneidade da série analisada neste trabalho foi decidida por meio do teste não-paramétrico de Mann e Whitney (1974).

Este teste parte do da inferência entre dois subprodutos da série hidrológica. A amostra de tamanho N é dividida em duas subamostras de tamanho N_1 e N_2 que sejam aproximadamente iguais e com $N_1 \leq N_2$. Em seguida a amostra original é classificada em ordem crescente, sendo esta

classificação denotada de m . A estatística do teste V de Mann-Whitney é dada pelo menor valor entre as quantidades (Naghetini e Pinto, 2007):

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1+1)}{2} - R_1 \quad (5)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_2 \quad (6)$$

Onde R_1 denota as somas das ordens de classificação dos elementos da primeira subamostra. Se $N_1, N_2 > 20$, e sob a hipótese de que se trata de uma amostra homogênea, demonstra-se que V segue uma distribuição Normal de média igual a:

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad (7)$$

E variância dada por

$$VAR[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (8)$$

Portanto, se a hipótese nula é H_0 : (a amostra é homogênea), a estatística do teste pode ser formulada como:

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{VAR[V]}} \quad (9)$$

a qual segue uma distribuição Normal padrão. Como é um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser de rejeitar a hipótese nula se $|T| = Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$.

- **Teste da hipótese de estacionariedade**

Uma tendência temporal, eventualmente presente em uma série hidrológica X_t , ao longo do tempo t , pode ser detectada pela correlação entre a série e o índice de tempo. Essa é a ideia essencial do teste não-paramétrico de Spearman cuja base é o coeficiente de correlação entre as ordens de classificação m_t , da sequência X_t , e os índices de tempo T_t , esses iguais a 1, 2, ..., N (Naghetini e Pinto, 2007).

A avaliação da estacionariedade da série de vazões médias anuais foi realizada através do teste da correlação de Spearman entre os postos dos dados e suas respectivas posições na série. Foram realizadas as seguintes etapas (Naghetini e Pinto, 2007):

- i) Cálculo do seguinte coeficiente de correlação entre os postos e os índices de tempo:

$$rs = 1 - \frac{6}{N^3 - N} \sum_{t=1}^N (mt - Tt)^2 \quad (10)$$

Onde, N é o tamanho da amostra; mt são os postos dos dados e Tt são os índices de tempo.

- ii) Cálculo da estatística de teste:

$$T = \frac{rs}{\sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right)}} \quad (11)$$

Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância α (adotado 0,05), a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese (a amostra não apresenta tendência temporal) nula se $|T| > Z_{1-\alpha/2}$.

- **Man-Kendall**

Esse teste consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial. É contado o número de vezes que os termos restantes são maiores do que o valor analisado. A estatística S é obtida pela soma de todas as contagens, como segue:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sinal}(x_i - x_j) \quad (12)$$

Em que o sinal $(x_i - x_j)$ é obtido da seguinte forma: -1 para $x_i - x_j < 0$; 0 para $x_i - x_j = 0$; 1 para $x_i - x_j > 0$.

A estatística S tende a normalidade para n grande, com média e variância definidas como segue:

$$E[S] = 0 \quad (13)$$

$$VAR[S] = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)] \quad (14)$$

sendo n o tamanho da série amostral.

O teste estatístico Z é dado por:

$$Z = \frac{(S-1)}{\sqrt{VAR(S)}} \text{ se } S > 0 \quad (15)$$

$$Z = 0, \text{ se } S = 0 \quad (16)$$

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, \text{ se } S < 0 \quad (17)$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa na série temporal foi avaliada usando-se o valor de Z . Essa estatística é usada para testar a hipótese nula de que nenhuma tendência existe. O valor positivo de Z indica uma tendência crescente. Para testar qualquer tendência constante crescente ou decrescente para um nível significativo de p , é rejeitada a hipótese nula (a amostra não apresenta tendência temporal) se o valor absoluto de Z é maior que $Z_{1-p/2}$.

- **Man-Kendall Sequencial**

Permite a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência. Considerando uma série temporal de m_i de n termos ($2i \leq i \leq n$); o teste consiste na soma t_n do número de termos m_i da série, relativo ao valor x_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($x_j < x_i$), isto é:

$$t_n = \sum_{i=1}^n m_i \quad (18)$$

Para séries com grande número de termos (n), sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência, t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância.

$$E(t_n) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (19)$$

$$Var(t_n) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (20)$$

Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística, $u(t)$, dada por,

$$u(t) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{Var(t_n)}} \quad (21)$$

Em sua versão sequencial, a Equação anterior é calculada no sentido direto da série, partindo do valor de $i=2$ até $i=N$, gerando a estatística $u(t_n)$ e no sentido inverso da série, partindo do valor de $i=N$ até $i=2$, gerando a estatística $u^*(t_n)$. A intersecção das duas curvas geradas representa o ponto aproximado de mudança de tendência, se este ocorre dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t_n) < 1,96$ (1,96 correspondendo $\alpha = 0,05$).

- **Teste de Pettit**

Realiza uma verificação de duas amostras Y_1, Y_2, \dots, Y_t e $Y_{t+1}, Y_{t+2}, \dots, Y_T$ provenientes de populações idênticas. A estatística $U_{t,T}$ faz uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que um membro da segunda amostra.

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(Y_i - Y_j) \quad (22)$$

Para $t = 2, \dots, T$ e onde (T é o total de elementos): $\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$; $\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$; $\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$.

Esse teste indica que o ponto de mudança brusca é aquele no qual o valor de t ocorre para o máximo valor de $K(t)$. Através da inversão da equação anterior é possível inferir os valores críticos (mínimo ou máximo) de $K(t)$ por meio da equação:

$$K_{crit.} = \pm \sqrt{\frac{-\ln(P/2)(T^3 + T^2)}{6}} \quad (23)$$

O teste tem, como hipótese nula (H_0), a não existência de mudança brusca na série enquanto a hipótese alternativa (H_1) ela existe.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando as metodologias supracitadas, foi possível obter os resultados da Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado da Aplicação dos Diversos Métodos

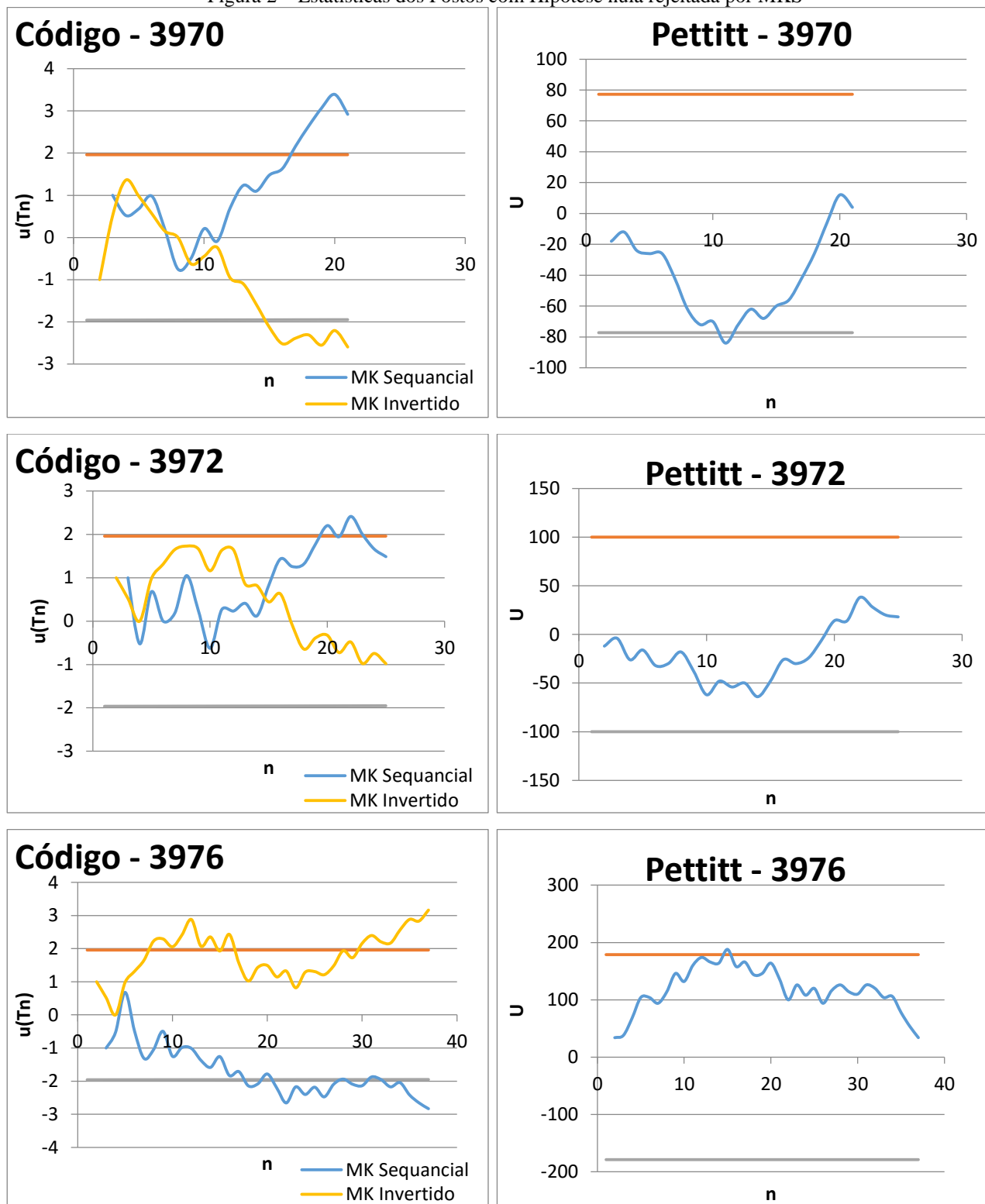
Bacia Hidrográfica	Código	WW	S	MW	MK	MKS	Pettit
Rio Mundaú	3970	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada
	3972	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	H0 rejeitada	Não rejeita H0
	3974	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0
	3976	Não rejeita H0	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada	H0 rejeitada
	3977	Não rejeita H0	Não rejeita H0	Não rejeita H0	H0 rejeitada	Não rejeita H0	Não rejeita H0

*WW - Wald-Wolfowitz; S - Spearman; MW - Mann e Whitney; MKS - Man e Kendall; MKS - Man e Kendall sequencial.

O posto 3970 foi o único dentro os analisados que rejeitou a hipótese nula de que os dados da série são independentes. Por se tratar de uma série curta (21 anos) e recente (iniciada no ano de

1993) existe a possibilidade da interferência do barramento localizado a jusante do posto na dependência dos dados. Na Figura 2 é possível perceber o comportamento da tendência das séries históricas de vazão para os diversos postos da mesma região.

Figura 2 – Estatísticas dos Postos com Hipótese nula rejeitada por MKS



Para o posto fluviométrico 3970, o método de MK invertido indicou o ano de 2002 como ponto de mudança de tendência da série de dados, o método de Pettitt indicou o ano de 2005.

Para o posto fluviométrico 3972, o método de MK invertido indicou o ano de 2005 como ponto de mudança de tendência na série de dados, todavia o método de Pettitt não indicou mudança na série. Desta forma, não se pode afirmar que há mudança de tendência na ocorrência das vazões médias anuais para o posto em questão.

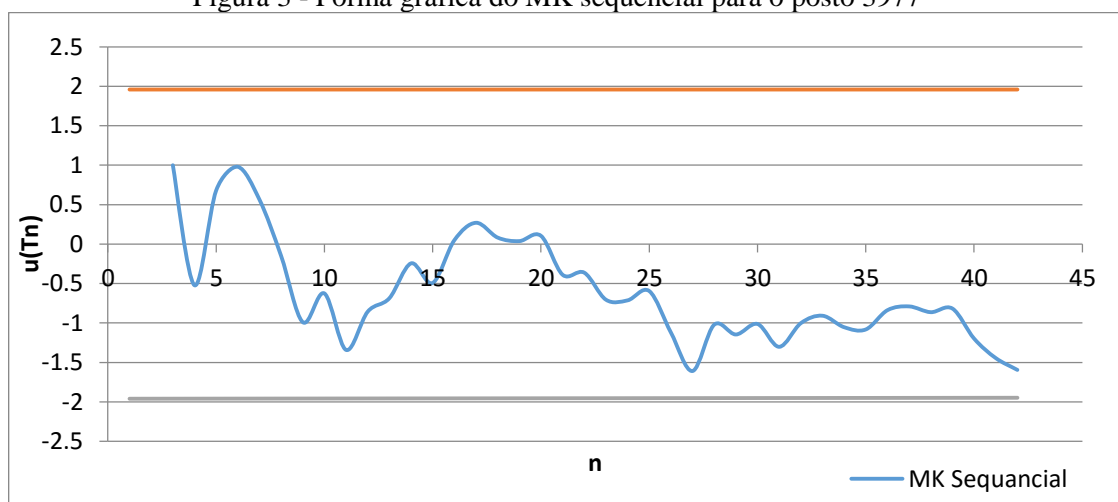
É possível notar nos postos 3970 e 3972 que há tendência positiva na série de dados. É preciso analisar se essa mudança de tendência possa está relacionada com a variabilidade climática da região ou com mudanças abruptas nos padrões de ocupação do solo, como por exemplo, a alternância do tipo de cultivo.

Para o posto fluviométrico 3976, no método de MK invertido as curvas não se cruzaram, mas estiveram bem próximas no ano de 1970, entretanto no método de Pettitt há indicação de mudança de tendência não significativa na série de dados no ano de 1993.

Segundo Pezzatti et al. (2013), a literatura apresenta vários testes estatísticos que são utilizados para detectar a homogeneidade de séries temporais, através dos quais se verificam mudanças abruptas (quebra) na média ou na variância da distribuição da variável de interesse. Dentre esses testes, o de Pettitt vem se destacando sobre os demais por ser menos sensível à distribuição heterogênea e a dados espúrios, sobremaneira em estudos de vazão, precipitação e temperatura (Tomozeiu et al., 2002; Biggs & Atkinson, 2011; Villarini et al., 2011).

O posto 3977 é o que apresenta menor distância da foz e recebe a contribuição de todos os demais postos, além de apresentar a série mais longa (42 anos) se estendendo de 1974 a 2015. Apesar de não apresentar tendência, é possível observar pela aplicação de MK sequencial que existe um decaimento (Figura 3) ao longo dos anos na vazão média anual, principalmente a partir do ano de 1993.

Figura 3 - Forma gráfica do MK sequencial para o posto 3977



Portanto, tendência negativas na série de dados de vazões são preocupantes para os gestores de recursos hídricos principalmente em regiões semi-áridas devido a escassez de água. Com a

redução da carga média é necessário estudos mais completos a fim de assegurar e subsidiar a gestão da água principalmente em córregos afluentes a reservatórios.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se afirmar que apenas o posto 3976 apresenta mudança de tendência validada por todos os métodos. Os postos 3970 e 3972 apresentam tendência positiva de crescimento.

Sobremaneira o resultado do método do MK sequencial mostrou uma tendência negativa para o posto 3977, o que representa um decaimento nas vazões, vários fatores podem ter interferido para este decaimento, como por exemplo, mudança da cobertura do solo, variações climáticas, redução da precipitação, entre outros. Sendo assim, fatores que precisam ser estudados com cautela.

Todavia, este resultado é um alerta para que os gestores dos recursos hídricos estudem a situação e possam tomar decisões de forma a reverter o quadro.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIGGS, E. M.; ATKINSON, P. M. A. (2011). “*Characterization of climate variability and trends in hydrological extremes in the Severn Uplands*”. International Journal of Climatology, v.31, p.1634-1652, 2011.
- COSTA, D. D. (2014). “*Previsão hidrológica de longo-prazo baseado em componentes climáticas em bacias hidrográficas semiáridas/tropicais*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.
- COTEC CONSULTORIA TÉCNICA LTDA. (1999). “*Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Mundaú*”. Governos de Pernambuco – Secretaria de Recursos Hídricos. [S.I].
- LIU, W., XU, Z., LI, F., ZHANG, L., ZHAO, J., YANG, H.,(2015).” Impacts of climate change on hydrological processes in the Tibetan plateau: a case study in the Lhasa River basin”. Stoch. Env. Res. Risk A. 29, 1809–1822.
- MIAO, C., YANG, L., LIU, B., GAO, Y., LI, S. (2011). “*Streamflow changes and its influencing factors in the mainstream of the Songhua River basin, Northeast China over the past 50 years*”. Environ. Earth Sci. 63, 489–499.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- PEZZATTI, G.B.; ZUMBRUNNEN, T.; BÜRGI, M.; AMBROSETTI, P.; CONEDERA, M.(2013). “*Fire regime shifts as a consequence of fire policy and socio-economic development: An analysis based on the change point approach*”. Forest Policy and Economics, v.29, p.7-18, 2013.
- TIAN, F., YANG, Y., HAN, S. (2009). “*Using runoff slope-break to determine dominate factors of runoff decline in Hutuo River basin, North China. Water*” Sci. Technol. 60, 2135–2144.
- TOMOZEIU, R.; BUSUIOC, A.; STEFAN, S. (2002). “*Changes in seasonal mean maximum air temperature in Romania and their connection with large-scale circulation*”. International Journal of Climatology, v.22, p.1181-1196, 2002.
- TRIOLA, M.F. Introdução à Estatística. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- VILLARINI, G.; SMITH, J.A.; BAECK, M.L.; KRAJEWSKI, W.F.(2011). “*Examining flood frequency distributions in the Midwest U.S*”. Journal of the American Water Resources Association, v.43, p.447-463, 2011.