



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE NAS SÉRIES HIDROMETEOROLÓGICAS DA BACIA DO RIO GRANDE APLICANDO A TÉCNICA DE REAMOSTRAGEM “BOOTSTRAP”

Alexandre Abdalla Araujo¹; Saulo Aires de Souza¹;

RESUMO – Detecções de mudanças em séries hidrológicas são de extrema importância, tanto do ponto de vista prático quanto científico. Estudos dessa natureza são importantes para a compreensão do impacto antrópico nos sistemas naturais e também essenciais na sinalização para os usuários dos recursos hídricos em determinada bacia de evidências de algum comportamento de mudança identificado na série que possa vir a comprometer o planejamento para o uso desses recursos no futuro. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento estatístico das séries hidrometeorológicas na bacia do rio Grande quanto à estacionariedade. Foram aplicados 14 testes estatísticos que compreendem uma gama dos principais testes de estacionariedade utilizados na ciência hidrológica. Os resultados sugerem que, de um modo geral, o comportamento estatístico das séries de vazões mínimas, médias e máximas não apresentam mudanças significativas. No entanto, não se pode afirmar que regionalmente a bacia apresente comportamento estacionário, tendo em vista que foram identificados regiões com resultados significativos para as mudanças analisadas. Estes resultados indicam que o aumento das vazões na bacia pode ser explicado em parte pelo aumento da precipitação, sendo que outras causas, como por exemplo, uso do solo, possam também estar associadas a esse aumento.

ABSTRACT– Detection of changes in hydrological series are extremely important, both from a practical and scientific point view. Such studies are important for understanding the anthropogenic impact on natural systems and essential to water resources users in the basin, given evidence of some changes in the behavior identified in the series that can jeopardize the planning for the use of these resources in the future. The objective of this work is to analyze the statistical behavior of hydrometeorological series in the Rio Grande basin relative to stationarity. A set of 14 statistical tests that comprises a range of key tests of stationarity used in hydrologic science were applied. The results suggest that, in general, the statistical behavior of the low, mean and flood flows series show no significant change. However, it can not be stated that the basin presents stationary behavior since there are significant changes in particular regions. Hence results suggest that the increase in streamflow in the basin can be to some extent explained by the increase in rainfall, besides some other factors, such as soil use, which can be associated with this increase.

Palavras-Chave – Análise de Estacionariedade; Bacia do Rio Grande; Reamostragem *Bootstrap*.

1 - INTRODUÇÃO

Detecção de mudanças em séries hidrológicas é de extrema importância, tanto do ponto de vista prático quanto científico. Sistemas de recursos hídricos são projetados e operados com base no pressuposto de que as séries hidrológicas são estacionárias. Se esta afirmação mostra-se incorreta,

1) Agência Nacional de Águas - ANA: Setor Policial, área 5, Quadra 3, Blocos "B", "L", "M" e "T". Brasília-DF CEP: 70610-200 , PABX: (61) 2109-5400,(61) 2109-5559. E-mails: alexandre.araujo@ana.gov.br; saulo.souza@ana.gov.br.

os procedimentos existentes para o desenvolvimento de projetos de diques, barragens, reservatórios etc. deverão ser revistos. Estudos dessa natureza são também importantes para a compreensão do impacto antropogênico nos sistemas naturais (Doll *et al.* (2009)). A urbanização, o desmatamento, as emissões de gases de efeito estufa, as mudanças nas práticas agrícolas e de uso do solo e a construção de barragens são apenas alguns exemplos de atividades antrópicas que podem estar alterando aspectos importantes do ciclo hidrológico.

Os principais problemas relativos aos recursos hídricos têm sido sempre relacionados ao excesso de água (cheias) ou à falta desse recurso (secas). Isso significa que, além de analisar as características médias, estudar as mudanças nas características de períodos hidrológicos distintos é também de grande importância (ANA, 2007). Assim, é primordial sinalizar aos usuários dos recursos hídricos em determinada bacia as evidências de algum comportamento de mudança identificado nas séries que possa vir a comprometer o planejamento para o uso desses recursos no futuro.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento estatístico das séries hidrometeorológicas na bacia do rio Grande quanto à estacionaridade. Foram avaliadas eventuais mudanças nesse comportamento nas séries de vazões observadas médias, mínimas e máximas, como também nas séries de vazões naturais afluentes aos 15 principais aproveitamentos hidrelétricos localizados na bacia. Adicionalmente, foram realizados as mesmas análises para as séries dos totais anuais precipitados e do número de dias com chuva maior que 5 mm registrada na bacia.

2 – METODOLOGIA

A Bacia Hidrográfica do Rio Grande está situada na Região Sudeste do Brasil, na Região Hidrográfica Paraná que, em conjunto com as Regiões Hidrográficas Paraguai e Uruguai, compõe a Bacia do Prata. É uma bacia de expressiva área territorial, com mais de 143 mil km² de área de drenagem. A Bacia do rio Grande, como parte da bacia do rio Paraná tem sido frequentemente estudada quanto a eventuais mudanças no comportamento hidrometeorológico das séries registradas, notadamente mudanças ocorridas após a década de 70 (MULLER *et al.*, 1998 e DETZEL *et al.*, 2011).

Neste trabalho, as principais medidas de avaliação das eventuais mudanças no regime hidrológico de na bacia do rio Grande foram realizadas, inicialmente, a partir de uma análise exploratória dos dados (AED) hidrológicos disponíveis e, posteriormente, por meio de testes estatísticos de estacionaridade que demonstrassem, objetivamente, se as eventuais diferenças detectadas eram estatisticamente significantes. Esses testes estatísticos envolvem a formulação de uma hipótese (hipótese nula), baseada em uma declaração conjectural sobre o comportamento

probabilístico da população da variável hidrológica em questão (AIRES DE SOUZA *et al.*, 2012). A rejeição ou não rejeição da hipótese formulada *a priori* dependerá do confronto entre a conjectura e a realidade física (os dados observados), baseando-se em certa probabilidade ou nível de significância, definido previamente. O nível de significância mede se o teste estatístico é muito diferente da gama de valores que deveriam ocorrer tipicamente sob a hipótese nula (WMO, 2000).

Os resultados obtidos foram interpretados adotando os níveis de significância (N.S) de 10%, 5% e 1% para rejeitar a hipótese nula. No entanto, sempre que necessário, foi considerada a utilização de outros níveis de significância de modo a melhor detalhar a análise. Os resultados dos p-valores foram utilizados na consideração da intensidade das mudanças com vistas aos níveis de significâncias adotados. A seleção dos testes estatísticos está relacionada ao tipo de mudança de comportamento que se quer investigar. As mudanças nas séries hidrometeorológicas são evidenciadas de varias maneiras: abruptamente (saltos na série), gradualmente (tendências) ou de forma mais complexa. Estas mudanças podem afetar algumas características estatísticas das séries como média, mediana, variância, autocorrelação, entre outras.

A tabela 1 apresenta os 14 testes estatísticos de hipótese utilizados e que compreendem uma gama dos principais testes de estacionaridade utilizados na ciência hidrológica: 3 para análise de tendência (mudança gradual), 6 para análise de saltos (mudança abrupta), sendo 4 de saltos na média, 1 na mediana e 1 na variância e 5 para análise de independência (ou aleatoriedade) de séries. Maiores detalhes sobre esses testes podem ser encontrados em ANA (2013b) e WMO (2000).

Em testes de hipótese, métodos de reamostragem são métodos que usam os próprios dados amostrais para determinar os níveis de significância. Estes métodos têm como principais objetivos estimar a precisão das características amostrais (como médias, medianas, variâncias e percentis) e determinar os níveis de significância de maneira mais robusta, utilizando subconjuntos da amostra (método *jackknife*), efetuando sorteio dos dados com reposição (método *bootstrap*) ou testes de permutação (considerando todas as permutações possíveis ou um subconjunto de todas as possibilidades). Tratam-se de métodos bastante usuais em hidrologia porque não requerem *a priori* a necessidade da série seguir uma determinada distribuição, de modo que este pré-requisito, necessário para os testes paramétricos, não precise ser atendido (ANA, 2013b). A metodologia clássica de reamostragem utilizada no presente trabalho é a técnica de *Bootstrap* que é um método para gerar uma distribuição a partir dos dados amostrais, através de sorteio com reposição, na qual são geradas muitas séries com o mesmo número de valores (tamanho) que a série original, mas podendo ser formadas por valores repetidos desta, ou seja, as séries geradas por *bootstrap* podem conter um determinado valor repetido mais de uma vez e não conter certo valor da série original.

Este método permite obter uma estimativa robusta do valor crítico do teste a partir do nível de significância definido *a priori*. Neste trabalho O *bootstrap* foi utilizado para construir testes de

hipótese. Após gerar aleatoriamente um número suficiente de réplicas da série original efetua-se para cada uma delas, e para a série original, o(s) teste(s) de hipótese em questão.

Tabela 1 – Testes de hipótese estatísticos para análise de estacionaridade.

Teste	Tipo de Mudança	Modelo Distributivo	Hipótese Nula
Mann-Kendall (MK)	graduais de tendência	Não-paramétrico	Não apresentar tendência
Rho de Spearman (RS)	graduais de tendência	Não-paramétrico	Não apresentar tendência
Coeficientes de Regressão Linear (RL)	graduais de tendência	Paramétrico	Não apresentar tendência
Distribution-Free CUSUM (DC)	abrupta da média	Não-paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na média
Desvio Acumulado ou Cumulative Deviation (CD)	abrupta da média	Paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na média
Razão de Verossimilhança de Worsley (WL)	abrupta da média	Paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na média
Rank-Sum ou Mann-Whitney (MW)	abrupta da mediana	Não-paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na mediana
t de Student convencional (TT)	abrupta da média	Paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na média
F de Snedecor (ou de Fisher) convencional (TF)	abrupta da variância	Paramétrico	Não apresentar mudança abrupta na variância
Cruzamento da Mediana ou Median Crossing (MC)	Dependência dos dados	Não-paramétrico	Os dados da série são independentes
Inflexões ou Turning Points (TP)	Dependência dos dados	Não-paramétrico	Os dados da série são independentes
Diferenças de Ordens ou Rank Difference (RD)	Dependência dos dados	Não-paramétrico	Os dados da série são independentes
Autocorrelação (AC)	Dependênciados dados	Paramétrico	Os dados da série são independentes
Wald-Wolfowitz (WW)	Dependência dos dados	Não-paramétrico	Os dados da série são independentes

Comparando-se o valor da estatística do teste com os valores ordenados da estatística do teste das réplicas, podem-se identificar os valores críticos e o p-valor (*p-value* em inglês) da estatística do teste da série original. Maiores detalhes sobre a metodologia empregada podem ser encontrados em ANA (2013b).

3 – RESULTADOS

Para análise das séries de vazões foram utilizados os registros de todas as estações fluviométrica com no mínimo 30 anos de dados sem falha, localizadas na bacia do rio Grande. Como foram efetuados preenchimento e extensão das séries de vazões diárias, dois tipos de série foram considerados: 1) série sem preenchimento/extensão, denominada **original** e 2) série **preenchida/estendida**. O preenchimento e a extensão das séries de vazões diárias foram realizados utilizando técnicas de regressão. Ao todo foram identificadas **59** estações fluviométricas originais que atendiam ao critério predefinido, sendo que depois de efetuado preenchimento/extensão o número de estações aumentou para **93**. O ano de corte para avaliar as mudanças bruscas foi o ano de **1970**, uma vez que estudos anteriores na região sugerem mudanças nas séries a partir deste ano (MULLER *et al.*, 1998). Na aplicação dos testes estatísticos foi considerado principalmente o nível de significância de **5%** para fins de rejeição da hipótese nula. No entanto, quando analisados espacialmente, foram também considerados os níveis de significância de **1%** e **10%**. Na aplicação da técnica de reamostragem *bootstrap* foram consideradas 1000 amostras na construção do teste.

A Tabela 2 apresenta o resumo do resultado geral da aplicação dos testes de estacionaridade às séries de vazões mínimas com 7 dias de duração (Q7dias) e às séries de vazões médias e máximas, originais e preenchidas/estendidas.

A coluna NS da tabela 2 trata do percentual de resultados em que não foi rejeitada a hipótese nula de estacionaridade ao nível de 5%, sendo o valor entre parêntesis o numero absoluto de estações que representa esse percentual. A coluna S representa o percentual de resultados em que foi rejeitada a hipótese nula de estacionaridade.

Tabela 2 – Resumo dos resultados dos testes de estacionaridade das séries de vazões ao N.S de 5% por tipo de mudança: tendência, salto, variância e independência.

Tipo de teste	Vazões Mínimas (Q_7dias)				Médias				Máximas			
	Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida	
	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S
Tendência	66,67(118,0)	33,33(59,0)	58,42(163,0)	41,58(116,0)	88,14(156,0)	11,86(21,0)	77,42(216,0)	22,58(63,0)	67,23(119,0)	32,77(58,0)	46,95(131,0)	53,05(148,0)
Salto	65,42(193,0)	34,58(102,0)	52,04(242,0)	47,96(223,0)	86,78(256,0)	13,22(39,0)	75,48(351,0)	24,52(114,0)	77,29(228,0)	22,71(67,0)	54,84(255,0)	45,16(210,0)
Variância	86,44(51,0)	13,56(8,0)	76,34(71,0)	23,66(22,0)	98,31(58,0)	1,69(1,0)	96,77(90,0)	3,23(3,0)	88,14(52,0)	11,86(7,0)	70,97(66,0)	29,03(27,0)
Independência	50,17(148,0)	49,83(147,0)	36,56(170,0)	63,44(295,0)	49,49(146,0)	50,51(149,0)	41,29(192,0)	58,71(273,0)	78,64(232,0)	21,36(63,0)	59,57(277,0)	40,43(188,0)

A tabela 3 apresenta os resultados individualizados de cada teste. Os resultados sugerem que a maioria das séries de vazões mínimas, medias e máximas não apresenta mudanças significativas em nenhum tipo de mudança analisada. No entanto, para as séries de vazão máximas preenchidas/estendidas houve um número maior de resultados significativos. Isto se deve à incorporação de alguns eventos extremos ocorridos no passado e que não estavam registrados nas séries originais. É importante destacar que em todas as variáveis analisadas, o preenchimento/extensão amplificou os resultados significativos.

Tabela 3 – resumo dos resultados dos testes estacionaridade, ao N.S. de 5%, aplicados nas séries de vazões mínimas (q7dias), médias e máximas, originais e preenchidas/estendidas.

Tipo de Teste	Vazões Mínimas (Q_7dias)				Médias				Máximas			
	Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida	
	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S
Mann-Kendall	67,80% (40)	32,20% (19)	56,99% (53)	43,01% (40)	88,14% (52)	11,86% (7)	78,49% (73)	21,51% (20)	67,80% (40)	32,20% (19)	47,31% (44)	52,69% (49)
Spearman's Rho	62,71% (37)	37,29% (22)	56,99% (53)	43,01% (40)	88,14% (52)	11,86% (7)	77,42% (72)	22,58% (21)	64,41% (38)	35,59% (21)	47,31% (44)	52,69% (49)
Linear Regression	69,49% (41)	30,51% (18)	61,29% (57)	38,71% (36)	88,14% (52)	11,86% (7)	76,34% (71)	23,66% (22)	69,49% (41)	30,51% (18)	46,24% (43)	53,76% (50)
Teste T	54,24% (32)	45,76% (27)	51,61% (48)	48,39% (45)	81,36% (48)	18,64% (11)	70,97% (66)	29,03% (27)	79,66% (47)	20,34% (12)	46,24% (43)	53,76% (50)
Distribution CUSUM	93,22% (55)	6,78% (4)	88,17% (82)	11,83% (11)	98,31% (58)	1,69% (1)	98,92% (92)	1,08% (1)	94,92% (56)	5,08% (3)	92,47% (86)	7,53% (7)
Cumulative Deviation	57,63% (34)	42,37% (25)	49,46% (46)	50,54% (47)	76,27% (45)	23,73% (14)	63,44% (59)	36,56% (34)	64,41% (38)	35,59% (21)	39,78% (37)	60,22% (56)
Worsley Lik. Ratio	66,10% (39)	33,90% (20)	19,35% (18)	80,65% (75)	91,53% (54)	8,47% (5)	72,04% (67)	27,96% (26)	72,88% (43)	27,12% (16)	48,39% (45)	51,61% (48)
Mann-Whitney	55,93% (33)	44,07% (26)	51,61% (48)	48,39% (45)	86,44% (51)	13,56% (8)	72,04% (67)	27,96% (26)	74,58% (44)	25,42% (15)	47,31% (44)	52,69% (49)
Teste F	86,44% (51)	13,56% (8)	76,34% (71)	23,66% (22)	98,31% (58)	1,69% (1)	96,77% (90)	3,23% (3)	88,14% (52)	11,86% (7)	70,97% (66)	29,03% (27)
Median Crossing	61,02% (36)	38,98% (23)	48,39% (45)	51,61% (48)	76,27% (45)	23,73% (14)	79,57% (74)	20,43% (19)	79,66% (47)	20,34% (12)	63,44% (59)	36,56% (34)
Turning Points	89,83% (53)	10,17% (6)	63,44% (59)	36,56% (34)	86,44% (51)	13,56% (8)	88,17% (82)	11,83% (11)	91,53% (54)	8,47% (5)	95,70% (89)	4,30% (4)
Rank Difference	23,73% (14)	76,27% (45)	9,68% (9)	90,32% (84)	33,90% (20)	66,1% (39)	17,20% (16)	82,80% (77)	67,80% (40)	32,20% (19)	39,78% (37)	60,22% (56)
Autocorrelation	40,68% (24)	59,32% (35)	33,33% (31)	66,67% (62)	25,42% (15)	74,58% (44)	10,75% (10)	89,25% (83)	77,97% (46)	22,03% (13)	50,54% (47)	49,46% (46)
Wald-Wolfowitz	35,59% (21)	64,41% (38)	27,96% (26)	72,04% (67)	25,42% (15)	74,58% (44)	10,75% (10)	89,25% (83)	76,27% (45)	23,73% (14)	48,39% (45)	51,61% (48)

A tabela 4 apresenta os resumo da aplicação dos 3 testes de tendência, considerando o sentido, crescente ou decrescente. Em relação às vazões mínimas, nas séries originais, em dois terços das estações registra-se uma tendência de aumento da vazão, sendo que em 40% dessas estações esse aumento foi estatisticamente significativo. Por outro lado, apenas em 20% do um terço de estações que apresentaram tendência decrescente de vazões, essa diminuição é estatisticamente significativa.

No caso das séries preenchidas e estendidas, manteve-se o resultado de aproximadamente dois terços das estações indicando tendência de aumento de vazões, mas o percentual de aumento estatisticamente significativo subiu para 50%. Em relação às vazões máximas o resultado para as séries originais foi aproximadamente o mesmo que o resultado das mínimas para as séries originais. Mas para as séries preenchidas o efeito de aumento nas vazões foi maior (mais de 80% das estações) e com um percentual também maior de valores crescentes estatisticamente significativos (quase 60%). Para as vazões médias, os resultados também apontam uma tendência de aumento das vazões, sendo que ao se comparar o resultado das séries preenchidas/estendidas com as séries originais observa-se um aumento dessa tendência, tanto no percentual de estações em que houve

aumento (de 69% para 88%), quanto no percentual de resultados crescentes estatisticamente significativos (de 15% para 26%).

Tabela 4 – Resumo dos resultados dos testes de tendência ao N.S de 5% em função do sentido: crescente e decrescente.

Significância dos Teste de TENDÊNCIA	Vazões Minimas (Q_7dias)				Médias				Máximas			
	Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida	
	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente
Não Significante	59,83% (70)	80,00% (48)	50,85% (90)	71,57% (73)	85,37% (105)	94,44% (51)	74,39% (183)	100,00% (33)	61,48% (75)	80,00% (44)	40,09% (91)	76,92% (40)
Significante	40,17% (47)	20,00% (12)	49,15% (87)	28,43% (29)	14,63% (18)	5,56% (3)	25,61% (63)	0,00% (0)	38,52% (47)	20,00% (11)	59,91% (136)	23,08% (12)
Total	66,10% (117)	33,90% (60)	63,44% (177)	36,56% (102)	69,49% (123)	30,51% (54)	88,17% (246)	11,83% (33)	68,93% (122)	31,07% (55)	81,36% (227)	18,64% (52)

Os resultados da aplicação dos testes de salto na média são muito semelhantes aos resultados de tendência, conforme pode ser visto na tabela 5, indicando que a média pós 1970 é maior que a média do período anterior e que esse efeito é mais pronunciado quando se realiza preenchimento e extensão de séries, de acordo com o percentual de resultados “Maiores” estatisticamente significativos.

Tabela 5 – Resumo dos resultados dos testes de salto, ao nível de significância de 5%, em função do sentido do salto após 1970: Maior e Menor.

Significância dos Teste de SALTO na Média	Vazões Mínimas (Q_7dias)				Médias				Máximas			
	Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida		Original		Preench./Estendida	
	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor
Não Significante	59,62% (127)	80,49% (66)	44,86% (157)	73,91% (85)	83,02% (176)	96,39% (80)	71,17% (279)	98,63% (72)	76,47% (156)	79,12% (72)	52,15% (194)	65,59% (61)
Significante	40,38% (86)	19,51% (16)	55,14% (193)	26,09% (30)	16,98% (36)	3,61% (3)	28,83% (113)	1,37% (1)	23,53% (48)	20,88% (19)	47,85% (178)	34,41% (32)
Total	72,20% (213)	27,80% (82)	75,27% (350)	24,73% (115)	71,86% (212)	28,14% (83)	84,30% (392)	15,70% (73)	69,15% (204)	30,85% (91)	80,00% (372)	20,00% (93)

De modo a avaliar o padrão espacial dos resultados dos testes aplicados, foi realizado um procedimento de interpolação utilizando a técnica do inverso do quadrado da distância (IDW) sobre os p-valores calculados para cada teste. No presente trabalho serão apresentados apenas os resultados do teste Mann-Kendall (tendência) e Mann-Whitney (Salto). Na identificação do sentido da mudança, crescente ou decrescente para tendência, e maior ou menor para saltos, foi efetuada uma categorização nos pontos que representam a estação analisada. Os pontos em azul indicam a estação cuja série apresentou aumento nos valores da variável analisada, por exemplo, vazões médias ou mínimas. Em vermelho indica-se o oposto, representando diminuição. Quanto maior o círculo da estação, mais significativas são as diferenças apontadas nos resultados dos testes.

A espacialização dos resultados dos testes de tendência Mann-Kendall (figuras 1a e 1b) e Mann-Whitney (figuras 2a e 2b) entre as séries de vazões mínimas originais e preenchidas/estendidas sugerem uma tendência de aumento das vazões mínimas, sendo encontradas evidências de que possa existir um salto na série após 1970, conforme apontado nas figuras 2a e 2b. Verifica-se que os resultados para as séries preenchidas/estendidas o efeito de mudança é mais pronunciado. Comparando as figuras 2a e 2b, vemos que a área representando os resultados estatisticamente significativos do teste de salto na média MW é maior que a área correspondente no teste de tendência MK, indicando que o efeito da tendência seja devido ao salto ocorrido após 1970. Resultados semelhantes, mas em menor grau, podem ser observados nas espacializações dos

resultados dos testes para as vazões médias (figuras 3a e 3b para os testes MK e figuras 4a e 4b para os testes MW) e máximas (figuras 5a e 5b para os testes MK e figuras 6a e 6b para os testes MW).

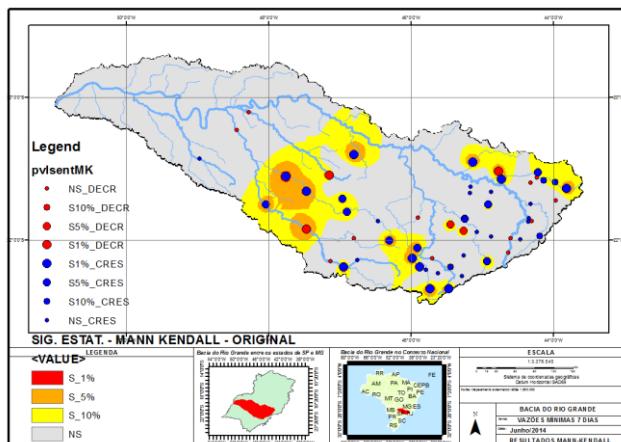


Figura 1a – teste MK para vazões mínimas originais.

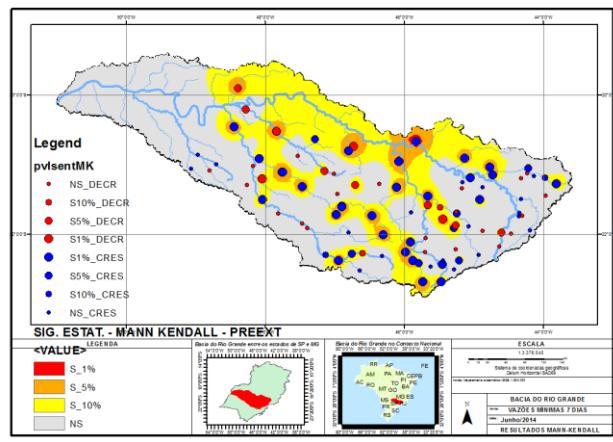


Figura 1b – teste MK para vazões mínimas preenchidas/estendidas.

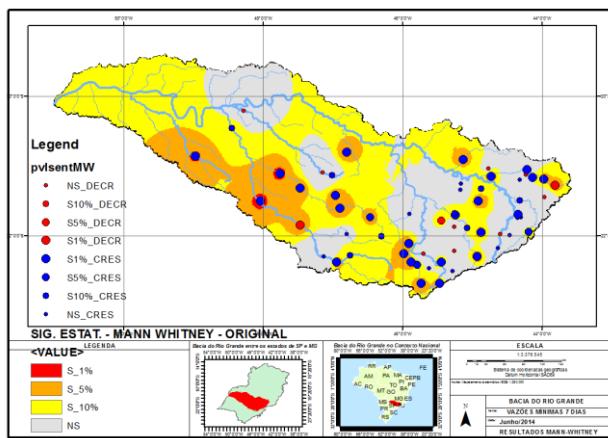


Figura 2a – teste MW para vazões mínimas originais.

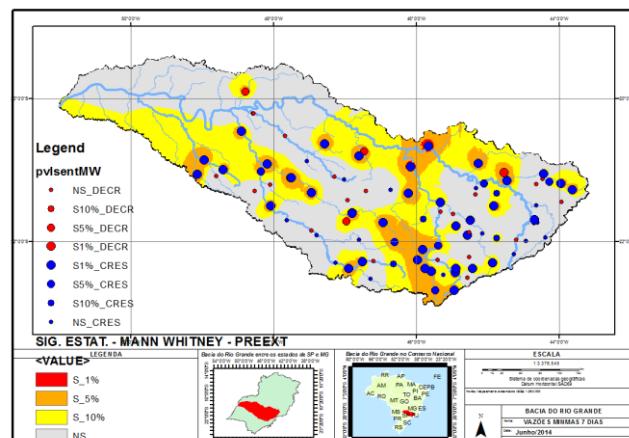


Figura 2b – teste MW para vazões mínimas preenchidas/estendidas.

Outra análise realizada neste trabalho foi a da aplicação dos testes de estacionaridade às séries de vazões naturais reconstituídas nos locais das 15 principais usinas hidrelétricas (UHEs) localizadas nos rios Grande e Pardo. Os resultados gerais da aplicação dos testes, conforme tabela 6, indicam um alto percentual de rejeição da hipótese nula de estacionaridade nas vazões mínimas e máximas em relação à tendência (acima de 40% significativas) e das mínimas em relação a salto (da ordem de 40%) após 1970. A tabela 7 aponta que na maioria das séries de vazões naturais há um predomínio de resultados decrescentes para as mínimas e médias (69% e 76% respectivamente) e de resultados crescentes para as máximas (84%). Só que, enquanto no caso das mínimas, mais de 60% dos resultados decrescentes são estatisticamente significativos, nas médias, em nenhum caso a diminuição é significativa. Para as máximas, quase metade (47%) dos resultados crescentes são significativos. Os resultados apontados na tabela 7 para as vazões mínimas e médias estão em desacordo com os resultados gerais apresentados nas séries de vazões médias e mínimas observadas nas estações fluviométricas localizadas na bacia como um todo. Assim, recomenda-se efetuar uma

análise mais aprofundada no processo de reconstituição das vazões afluentes a essas usinas de modo a verificar as causas desse comportamento.

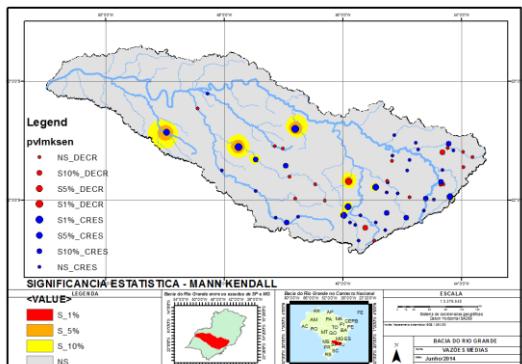


Figura 3a – teste MK nas séries de vazões médias anuais originais.

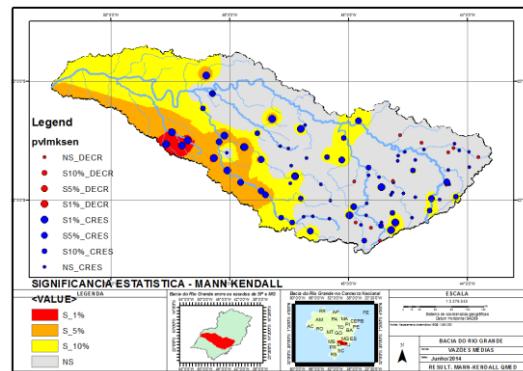


Figura 3b – teste MK nas séries de vazões médias anuais preenchidas/estendidas.

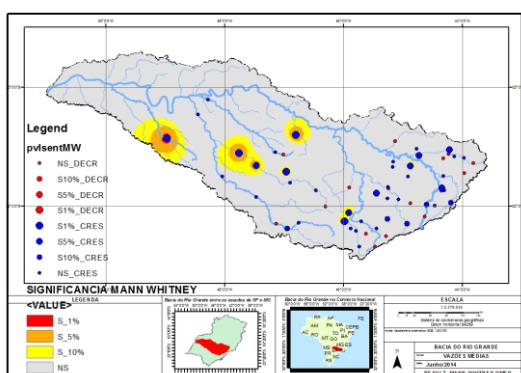


Figura 4a – teste MW nas séries de vazões médias anuais originais. Ano de corte 1970.

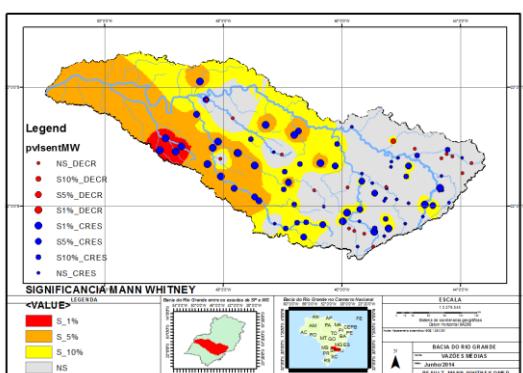


Figura 4b – teste MW nas séries de vazões médias anuais preenchidas/estendidas. Ano de corte 1970.

Para análise dos totais acumulados de precipitação e do número de dias com chuvas maiores que 5 mm, conforme resultados de aplicação de testes de estacionariedade apresentados na tabela 8, foram utilizados os registros de todas as estações que estavam localizadas na bacia do rio Grande, considerando um “buffer” de 30 km. Foram identificadas mais de 1000 estações pluviométricas com registros de chuva. Posteriormente foi efetuada uma nova filtragem dessas 1000 estações considerando apenas aquelas que tinham registrados no mínimo 40 anos de dados sem falhas e que apresentassem no mínimo 20 anos de dados sem falha no período após 1970. Nesta nova filtragem foram identificadas 217 estações. A tabela 8 apresenta um resumo dos resultados dos testes estatísticos aplicados nos totais anuais de chuva e do número de dias de chuva maiores que 5 mm. Observa-se na tabela que mais de 70% dos resultados dos testes de tendência e salto aplicados a todas as séries indicaram pela não rejeição da hipótese nula de estacionariedade.

Observando as figuras 7a e 8a para o teste MK e 7b e 8b para o teste MW verifica-se para diversos locais na bacia uma tendência de aumento na precipitação total e no nº de dias chuvosos bem como um aumento na média dessas variáveis após 1970. No entanto em grande parte da bacia, conforme apontado na tabela 8, os aumentos não são significativos.

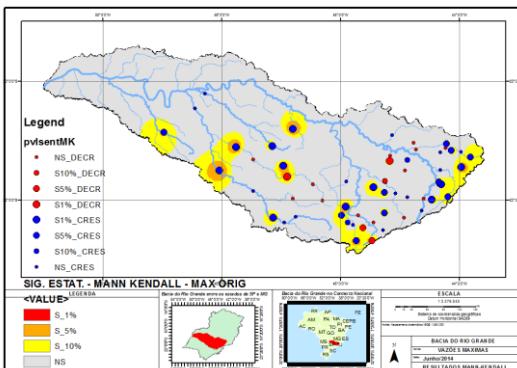


Figura 5a – teste MK para vazões máximas originais.

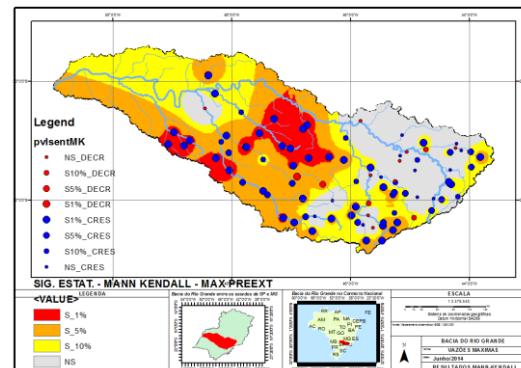


Figura 5b – teste MK para vazões máximas preenchidas/estendidas.

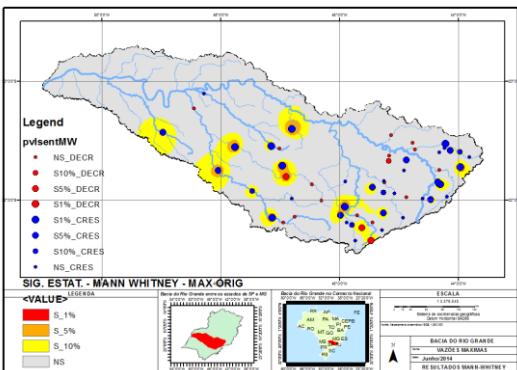


Figura 6a – teste MW para vazões máximas originais.

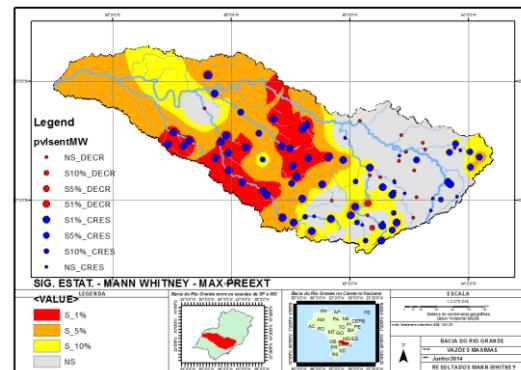


Figura 6b – teste MW para vazões máximas preenchidas/estendidas.

Tabela 6 – Vazões naturais de UHEs: resumo dos testes de estacionariedade ao N. S de 5%.

Tipo de teste	Mínimas (Q_7dias)		Médias		Máximas	
	Original		Original		Original	
	NS	S	NS	S	NS	S
Tendência	53% (24)	47% (21)	100% (45)	0% (0)	56% (25)	44% (20)
Salto	60% (45)	40% (30)	100% (75)	0% (0)	84% (63)	16% (12)
Variância	100% (15)	0% (0)	100% (15)	0% (0)	100% (15)	0% (0)
Independência	32% (24)	68% (51)	37% (28)	63% (47)	52% (39,0)	48% (36)

4 – CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que de um modo geral o comportamento estatístico das séries de vazões mínimas, médias e máximas não apresentam mudanças significativas, visto que mais de 60% dos resultados para diferentes testes não indicam mudanças. No entanto não se pode afirmar que regionalmente a bacia apresente comportamento estacionário, tendo em vista que foram identificados regiões com resultados significativos para as mudanças analisadas. Sendo que estas mudanças, significativas ou não, apontam para um aumento das vazões. Os resultados para o total precipitado anual e para o numero de dias de chuva maiores que 5mm são bem próximos dos resultados apontados nas vazões. No entanto verifica um numero maior de resultados não significativos para as chuvas. Estes resultados indicam que o aumento das vazões na bacia pode ser explicado em parte pelo aumento da precipitação sendo que outras causas, como por exemplo, uso do solo, possam também estar associadas a esse aumento.

Tabela 7 – Vazões naturais de UHEs: resultados dos testes de tendência, ao N. S de 5%.

Significância dos Teste de TENDÊNCIA	Mínimas (Q_7dias)		Médias		Máximas	
	Original		Original		Original	
	Cresc.	Decresc.	Cresc.	Decresc.	Cresc.	Decresc.
Não Signif.	85,7% (12)	38,7% (12)	100,0% (11)	100,0% (34)	52,6% (20)	71,4% (5)
Signif.	14,3% (2)	61,3% (19)	0,0% (0)	0,0% (0)	47,4% (18)	28,6% (2)
Total	31,1% (14)	68,9% (31)	24,4% (11)	75,6% (34)	84,4% (38)	15,6% (7)

Tabela 8 – Totais anuais e nº de dias com chuvas maiores que 5mm: resumo dos resultados de estacionaridade, ao N.S. de 5%, por tipo de mudança: tendência, salto, variância e independência.

Tipo de teste	TOTAL ANUAL		Nº DIAS DE CHUVA > 5mm	
	Original		Original	
	NS	S	NS	S
Tendência	71,4% (437)	28,6% (175)	78,1% (478)	21,9% (134)
Salto	71,3% (727)	28,7% (293)	76,6% (781)	23,4% (239)
Variância	91,2% (186)	8,8% (18)	87,8% (179)	12,2% (25)
Independência	84,7% (864)	15,3% (156)	86,5% (882)	13,5% (138)

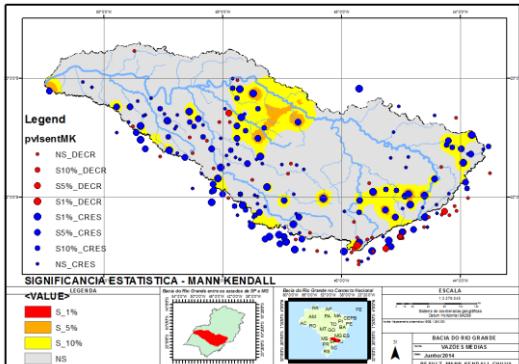


Figura 7a – Resultado do teste Mann-Kendall nas séries totais anuais precipitados.

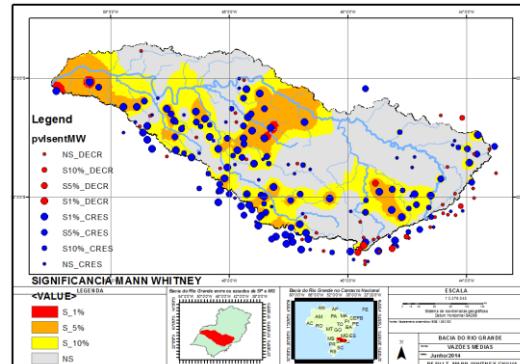


Figura 7b – Resultado do teste Mann-Whitney nas séries totais anuais precipitados.

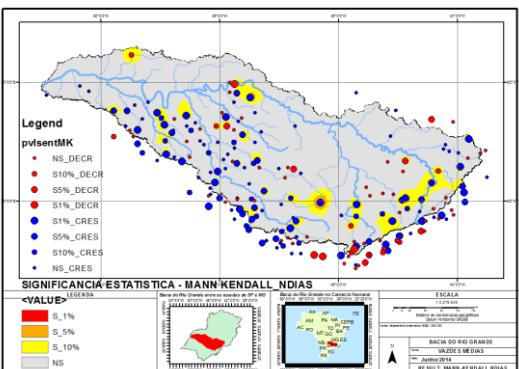


Figura 8a – Resultado do teste MK nas séries de número de dias com chuvas superiores a 5mm.

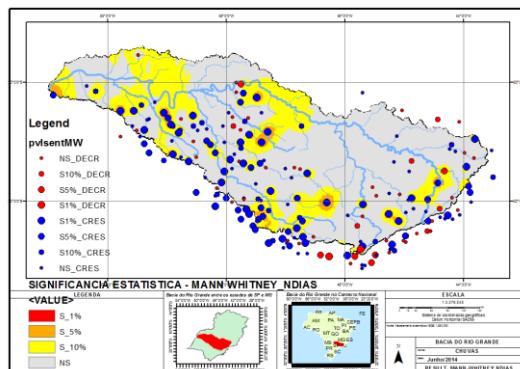


Figura 8b – Resultado do teste MW nas séries de número de dias com chuvas superiores a 5mm.

BIBLIOGRAFIA

- ANA – Agência Nacional de Águas (2013a). Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia do rio São Francisco e usos consuntivos a montante da UHE Sobradinho. Nota Técnica nº 006/2013/SPR.
- ANA – Agência Nacional de Águas (2013b). Implementação de funções para análise estatística e de estacionariedade de séries hidrológicas em uma ferramenta integrada para apoio a estudos hidrológicos. Nota Técnica nº 031/2013/SPR-ANA.
- Detzel, D.H.M; Bessa, M.R.; Vallejos, C.A.V; Santos, A.B.; Thomsem, L.S.; Mine, M.R.M; Bloot, M.L.; Estrócio, J. P. (2011). Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 16, Nº 3, p. 95-111.
- Doll, P., Fiedler, K., and Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 2413–2432, doi:10.5194/hess-13-2413-2009.
- MERZ, B.; VOROGUSHYN, S.; UHLEMANN, S.; DELGADO, J.; HUNDECHA, Y. (2012). More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, pp. 1379–1387.
- MÜLLER, I. I. KRÜGER, C. M.; KAVISKI, E. (1998). Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 3 (4), p. 51-71.
- NAGHETTINI, MAURO; PINTO, EBER J. A. 2007. *Hidrologia Estatística*. CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Minas Gerais-MG.
- AIRES DE SOUZA, S.; ARAUJO, A.A; TROGER, F. A. (2012). ANÁLISE DE ESTACIONARIDADE EM SÉRIES HIDROLÓGICAS NO LOCAL DO FUTURO APROVEITAMENTO HIDROELETRICO SÃO LUIZ DO TAPAJÓS . Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa.
- WMO - World Meteorological Organization. (2000). DETECTING TREND AND OTHER CHANGES IN HYDROLOGICAL DATA. WMO/TD-No. 1013. Geneva. Switzerland.