

Tendências em regimes hidroclimáticos nas regiões Norte e Nordeste do Brasil

Gabriela Jardim Costa, Denise Helena Lombardo Ferreira, Anna Badinger

Pontifícia Universidade Católica de Campinas, CEATEC, Campus I, Rod. Dom Pedro I, Km 136, CEP 13086-900, Campinas, São Paulo, Brasil; E-Mails: gabriela.jc@puccampinas.edu.br; lombardo@puc-campinas.edu.br; anna.b@puc-campinas.edu.br;

Resumo—Este trabalho teve como objetivo identificar a ocorrência de tendências em séries de regimes climáticos e hidrológicos relativas aos índices anuais das precipitações pluviométricas, das temperaturas médias e da vazão em rios, registradas em localidades pertencentes às bacias das regiões Norte e Nordeste do Brasil. Foram utilizadas as medições realizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Agência Nacional de Águas (ANA). Visando identificar a presença de tendências, para cada série foram aplicadas análises de regressão linear e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt. Os resultados, apresentados em forma de gráficos, tabelas e mapas, confirmam que a maioria dos locais avaliados não registrou tendências, em particular na precipitação pluviométrica. Contudo, as análises dos dados das temperaturas e vazões de rios revelaram vários locais com tendências significativas confirmadas nessas bacias analisadas.

Palavras-chave—norte; nordeste; bacias hidrográficas; mudanças hidro-climáticas; testes estatísticos

Abstract—The aim of this study was to identify the occurrence of trends in series of climatic and hydrological regimes related to annual indices of rainfall precipitation, mean temperatures and river flows, recorded in localities belonging to the northern and Northeast of Brazil. Measurements were taken by the National Institute of Meteorology (INMET) and the National Water Agency (ANA). In order to identify the presence of trends were applied, for each series, linear regression analyzes and non-parametric Mann-Kendall and Pettitt. The results, presented in the form of graphs, tables and maps, confirm that most of the evaluated sites did not register trends, particularly in rainfall. However, analyzes of river temperature and flow data revealed several sites with confirmed significant trends in these analyzed basins.

Keywords—north, northeast; hydrographic basins; hydro-climatic changes; statistical tests

I. INTRODUÇÃO

O interesse em estudar e compreender os fatores que dizem respeito às alterações climáticas e suas consequências, desde algumas décadas atrás vem despertando vários cientistas no mundo todo. Assim, desenvolveram-se novas técnicas, aperfeiçoaram vários dispositivos e surgiram novos equipamentos. Foi justamente por meio desse avanço tecnológico que a Meteorologia, a Climatologia e a Hidrologia, puderam contribuir de forma positiva no acompanhamento e na previsão de alterações climáticas e hidrológicas regionais. Como ciências investigadoras da atmosfera, de rios e de lagos, Do ponto de vista hidrológico, o Brasil destaca-se como um

país que ocupa uma posição privilegiada no mundo, em relação à disponibilidade de recursos hídricos, com aproximadamente 12% da disponibilidade mundial desses recursos, que é de 1,5 milhões de $m^3 s^{-1}$ [1]. No entanto, parte da população brasileira vive sem esse recurso, visto que as reservas brasileiras de água doce não estão distribuídas de maneira uniforme pelo país, pois aproximadamente 80% dessas reservas concentram-se na região Amazônica. Em contrapartida, a região semiárida do Nordeste, embora incluindo grande parte da bacia do rio São Francisco, possui apenas 4% dos recursos hídricos do país, porém abriga quase que 35% da população brasileira.

Assim como em muitos países do mundo, a disponibilidade de água no Brasil depende, em grande parte, do clima e de suas variações em diversas escalas de tempo. Extremos de chuva, especialmente no verão, podem estar associados a enchentes e têm impactos diretos sobre a população, embora em escalas de tempo sazonais, um atraso no início da estação chuvosa pode causar impactos graves na agricultura e na geração de energia hidroelétrica.

O Painel Internacional Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change - IPCC), no quinto Relatório Científico (IPCC AR4) apresenta evidências de mudanças do clima, que podem afetar significativamente a disponibilidade hídrica em muitas regiões, com impactos grandes nos totais de chuva e nos extremos hidrometeorológicos até o final do século XXI [2].

Dessa forma, o Brasil também é vulnerável às mudanças climáticas que se projetam para o futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos. O conhecimento sobre possíveis cenários climáticos e hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro e, também, definir políticas ambientais de uso e gerenciamento de água.

O presente trabalho visa contribuir com os estudos sobre mudanças hidrológicas e climáticas de curto prazo em escalas regionais. Para tanto são abordados estudos de variabilidades e de tendências das temperaturas médias, precipitações pluviométricas e níveis de vazão em rios, em períodos anuais, medidas nos estados do Norte e Nordeste Brasil, pelo qual se encontram algumas bacias hidrográficas de suma importância. Os dados aqui tratados fazem parte de séries históricas que dependem do período que foram coletados, de cada localidade onde essas coletas se iniciaram e, portanto, variam de local para local.

II. METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o assunto de interesse, sendo os esforços direcionados aos estudos relacionados às características geográficas, ambientais e climáticas das bacias hidrográficas das regiões Norte e Nordeste do Brasil e, concomitantemente, as abordagens relacionadas aos tratamentos de dados envolvendo métodos estatísticos para detecção de tendência em série temporal.

A partir do banco de dados climáticos do INMET [3], para temperatura média e precipitação pluviométrica, além dos disponíveis pela ANA [4], para os dados de vazões em rios, foi possível obter as informações necessárias e desejadas para um amplo estudo estatístico envolvendo várias localidades espalhadas ao longo das quatro bacias estudadas.

Foram selecionadas 128 estações meteorológicas do INMET e 75 estações do banco de dados da ANA. Na Fig. 1 estão contidos os posicionamentos das localidades das bacias hidrográficas estudadas.

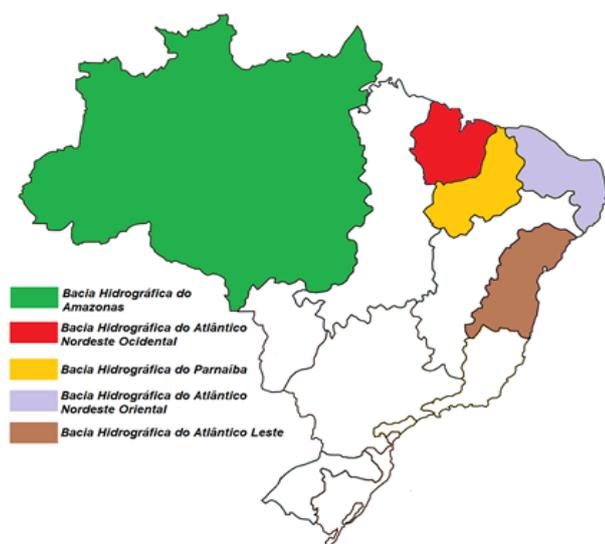


Fig. 1. Mapa das Bacias Hidrográficas das Regiões Norte e Nordeste estudadas.

Após o levantamento e organização dos dados foram usados os modelos matemáticos e estatísticos empregando os programas computacionais utilizando o software Microsoft Excel [5]. A partir desses procedimentos, foi possível inferir se ocorrem, e quando, tendência numa série temporal de dados medidos pelas estações do INMET e da ANA.

A pesquisa empregou três métodos para detecção de tendências nas séries hidroclimáticas de interesse, a saber: o teste da Análise de Regressão e os testes de Mann-Kendall (M-K) e de Pettitt (Pett.). A seguir são discutidos resumidamente esses modelos estatísticos.

Utilizou-se a Análise de Regressão para verificar o comportamento da variabilidade de uma determinada série temporal por meio da significância do coeficiente angular de uma reta ajustada às medições. Para tanto, realizou-se o

cálculo das médias móveis, empregando ordem cinco aos dados e, em seguida, trabalhou-se com uma suavização dos dados visando evitar ou minimizar possíveis flutuações dos mesmos. Posteriormente, tanto para os pontos médios como para os suavizados, aplicou-se o ajuste da equação da reta de tendência e analisou-se o intervalo de confiança em 95% acima e abaixo do valor estimado do coeficiente angular, sendo que, se este intervalo não incluir o valor zero, presume-se que a tendência seja significativa.

O teste de M-K considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). Um valor positivo do coeficiente $U(t_n)$ e $U^*(t_n)$ de M-K indica uma tendência de aumento da variável, enquanto que um valor negativo indica uma tendência de decréscimo, desde que significativos no nível de 5% e 10%.

No que tange ao teste de Pett., este verifica se duas amostras pertencem à mesma população. Para tanto, calcula-se a estatística $K(t)$ por meio de uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que um membro da segunda amostra. O procedimento localiza o ponto em que houve uma mudança brusca da série temporal, sendo sua significância avaliada em 5% e 10% do valor crítico ($K_{crit.}$), máximo ou mínimo, de $K(t)$.

Maiores detalhes desses testes podem ser obtidos em [6]. No entender desses autores, os dois últimos testes descritos acima são os melhores procedimentos de análises em séries temporais. Isso ocorre porque eles possuem um maior embasamento estatístico para modelos teóricos de descrição climática e hidrológica, sendo importante utilizá-los de forma combinada, isto é, realizando análises gráficas e numéricas em conjunto para que se possa identificar e localizar quando passou a existir uma tendência na série.

III. RESULTADOS

Para todas as séries temporais selecionadas nesse levantamento (Fig. 1), foram realizados os cálculos dos ajustes lineares por meio da análise de regressão, empregando os cálculos das médias móveis e suavizações. Posteriormente a esses cálculos, com o intuito de constituir uma ferramenta adicional de interpretação estatística, foram gerados os gráficos dos comportamentos das séries visando identificar as características e peculiaridades de cada uma, tais como a eventual existência de heterogeneidades e mudanças abruptas.

A Fig. 2 corresponde aos dados de vazão da cidade Barão de Grajaú (MA), pertencente a bacia do Parnaíba, sendo os dados brutos em cálculos anuais explicitados em losangos azuis. A média móvel desses dados está representada por quadrados em vermelho, enquanto a suavização dos mesmos está indicada por circunferências em preto. Examinando esses dois casos, percebe-se que os ajustes lineares acusaram decréscimos, pois, além dos gráficos possuírem inclinações indicando que o comportamento da vazão diminui na medida em que o tempo aumenta. De fato, os coeficientes angulares

das retas ajustadas para esses dados são negativos ($a < 0$), como podem ser verificados nas equações das retas ajustadas na parte inferior dos gráficos.

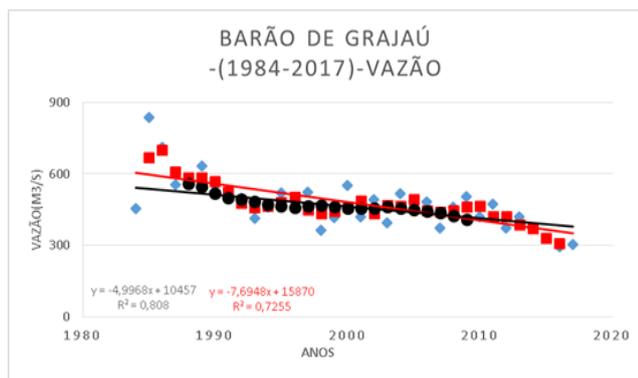


Fig. 2. – Comportamento da vazão em Barão de Grajaú (MA), entre 1984 e 2017, sendo identificada uma diminuição dessa grandeza hídrica.

Os gráficos da Fig. 3 revelam um aumento significativo da Vazão, para o período de 1968 a 2017, na localidade de Óbidos (PA), encontrado na bacia do Amazonas. Este evento ocorre devido aos cálculos realizados por meio dos ajustes lineares, tanto usando média móvel quanto suavização, que indicaram acréscimos nos comportamentos das retas ajustadas ($a > 0$).

Por ser um teste com elevado embasamento estatístico, optou-se neste trabalho por dar maior evidência aos resultados das aplicações dos testes M-K e Pett. A título de exemplificação, algumas formas gráficas são mostradas nas Fig. 4 e 5 em duas localidades e analisadas em sequência. Nessas figuras as linhas horizontais tracejadas e pontilhadas referem-se os intervalos (para o teste M-K, abaixo da figura e em preto) e os níveis (para o teste Pett., acima da figura e em vermelho) de confiança de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$, respectivamente.

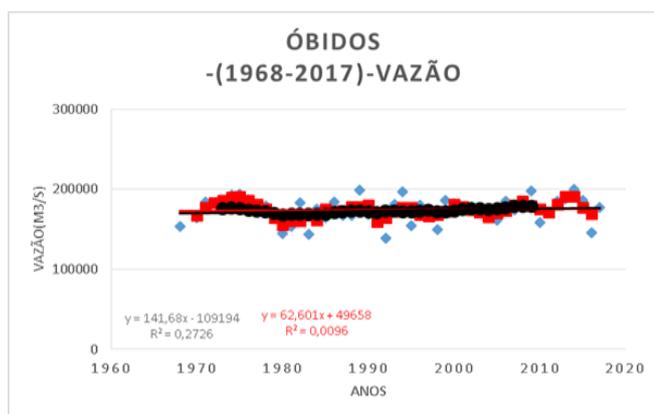


Fig. 3. Comportamento da vazão em Óbidos (PA), entre 1968 e 2017, sendo identificada um aumento dessa grandeza hídrica.

Estabeleceu-se um critério de uniformidade que expressasse os resultados dos dois testes, utilizou-se a seguinte convenção: o sinal (-)(-) para uma tendência negativa confirmada entre 5% e 10% dos intervalos de confiança bilaterais e o sinal (-) se for acima de 10% do intervalo de confiança. De maneira análoga, usou-se os sinais (+)(+) e (+)

para tendência positiva confirmada, respectivamente. Caso não houvesse condições de confirmar tendência um sinal (?) foi adotado.

Ao examinar o comportamento das medidas de vazão entre 1995 e 2015 em Boa Vista, pertencente a bacia do Amazonas, os testes de Mann-Kendall (Fig. 4, à esquerda) obteve resultado positivo com nível (+)(+) a partir de 2013, porém o teste de Pettitt (Fig. 4, à direita) não obteve resultado, logo durante esses anos não foi possível confirmar tendência nesse rio. Isso se justifica porque, no teste de Mann-Kendall ocorreu o cruzamento das curvas entre os intervalos de confiança na referida data. Em controversa, o ponto de mudança brusca de não cruzou os limites críticos estabelecidos de 5% e 10% em 1991.

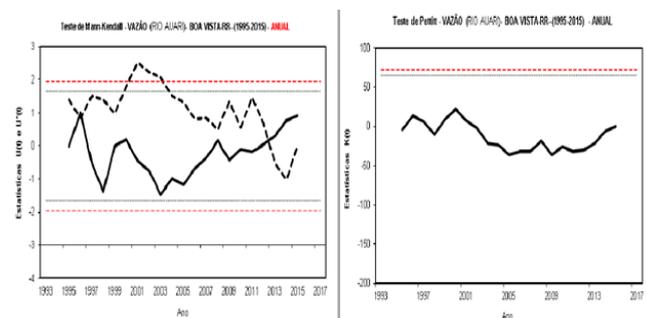


Fig. 4. Estatísticas de Mann-Kendall (ao lado esquerdo) e de Pettitt (lado direito) para medidas de vazão média em Boa Vista (RR), não indicando tendência.

O comportamento da vazão, medida entre 1981 e 2017 na cidade de Teresina (PI), pertencente a bacia do Parnaíba, está mostrado na Fig. 5. Neste caso, os testes de Mann-Kendall e de Pettitt confirmam o registro de tendência negativa. Observa-se que o cruzamento das curvas e, entre um dos intervalos de confiança, ocorreu em 2012, caracterizada com (-) (Fig. 5, à esquerda). Entretanto, o ponto de mudança brusca ocorreu ao cruzar os limites críticos estabelecidos de 5% e 10% (Fig. 5, à direita), no ano de em 2011, (-)(-). Com isso, confirmou-se tendência de diminuição (-) a partir de 2011.

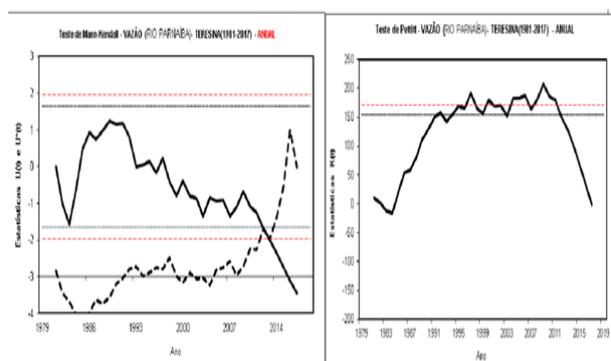


Fig. 5. Idem a figura anterior, porém aplicados às medidas de vazão média em Teresina (PI), indicando diminuição a partir de 2011.

Tendo em vista a possibilidade de analisar de maneira conjunta os resultados encontrados pela aplicação dos testes não paramétricos nas séries tempo-rais hidroclimáticas das localidades tratadas, optou-se por apresentar mapas de suas

distribuições a seguir. Decidiu-se, mostrar apenas os mapas de tendências avaliadas longo das bacias hidrográficas das regiões norte e nordeste. Esses mapas estão mostrados na Fig. 6 a Fig. 8 e correspondem a cada grandeza trabalhada no levantamento. Percebe-se que em algumas cidades existem tendências crescentes e decrescentes nos níveis de significâncias avaliados (5% e 10%).

A partir da análise do mapa abaixo, Fig. 6, observa-se a respeito da temperatura média na região Nordeste que 71,9% das estações não obteve tendência, 23,6% apresentou tendência positiva e 4,5% tendência negativa. Já na região Norte 41% não demonstrou tendência, 59% obteve tendência positiva e não houve tendência negativa.

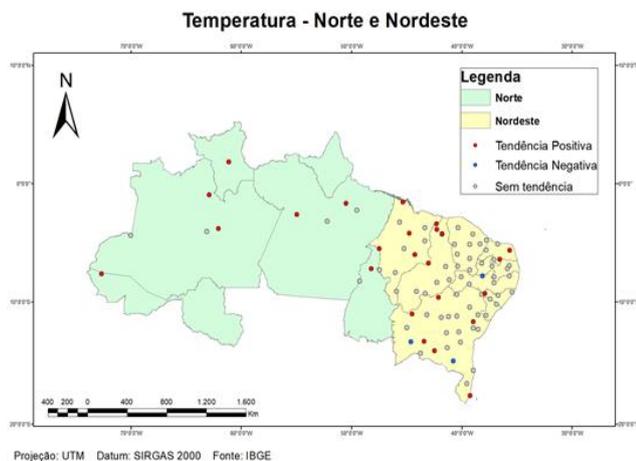


Fig. 6. Mapa de tendências não paramétricas para temperatura média das regiões geopolíticas do norte e nordeste.

O mapa de precipitação, Fig. 7, para região Nordeste demonstrou 99% de estações sem tendências, 1% de tendências negativas e não obteve tendência positiva. Para a região Norte 75% não obtiveram tendências, 7,5% apresentaram tendências positivas e 17,5% tendências negativas.

Na Fig. 8, mapa de tendências não paramétricas, foram averiguados que na bacia do Amazonas 83,8% não demonstraram tendências, 5,4% tendências positivas e 10,8% negativas. Para bacia do Atlântico Nordeste Ocidental 50% não obtiveram tendências e 50% foram negativas. Nos rios da bacia do Parnaíba 7,7% não obtiveram tendência e 92,3% tiveram tendências negativas. Na bacia do Atlântico Nordeste Oriental houve 42,9% sem tendência e 57,1% tendências negativas. Para bacia do Atlântico Leste 75% não demonstraram tendências e 25% demonstraram tendências negativas.

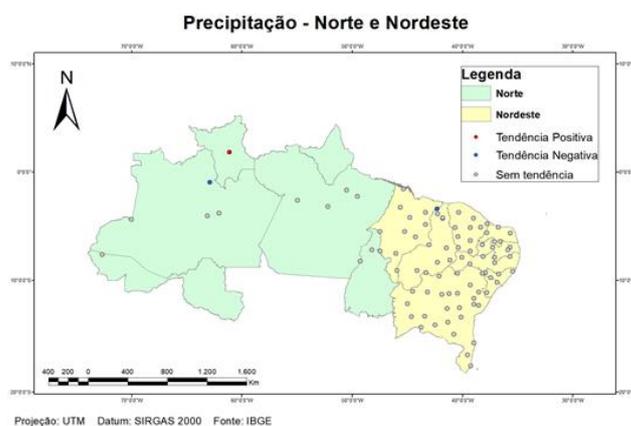


Fig. 7. Mapa de tendências não paramétricas para precipitação das regiões geopolíticas do Norte e Nordeste.

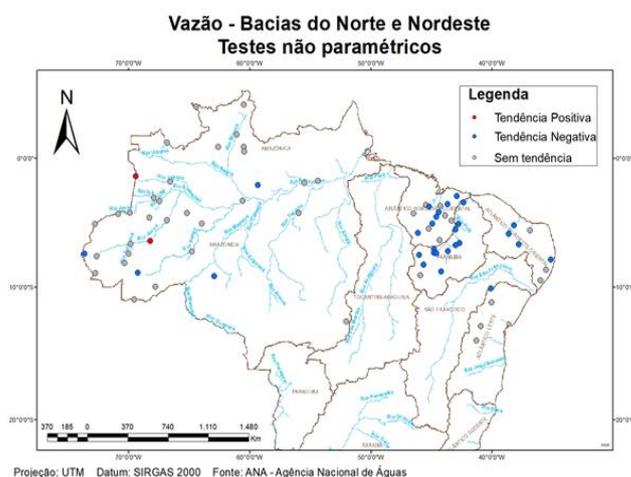


Fig. 8. Mapa de tendências não paramétricas para dados de vazão de bacias do Norte e Nordeste.

Na Fig. 9 é representado o mapa referente aos testes paramétricos para a vazão dos rios. Interpretando-o pode-se aferir que na bacia do Amazonas em 54% das estações apresentaram coeficiente angular positivo ($a > 0$) e 46% apresentaram coeficiente angular negativo ($a < 0$). Na bacia do Atlântico Nordeste Ocidental houve 21% com coeficiente angular positivo e 79% com coeficiente angular negativo. Na bacia do Parnaíba houve apenas coeficiente angular negativo. Para bacia do Atlântico Nordeste Oriental 28,6% apresentaram coeficiente angular positivo e 71,4% apresentaram coeficiente angular negativo. Na bacia do Atlântico Leste 25% demonstraram coeficiente angular positivo e 75% coeficiente angular negativo.

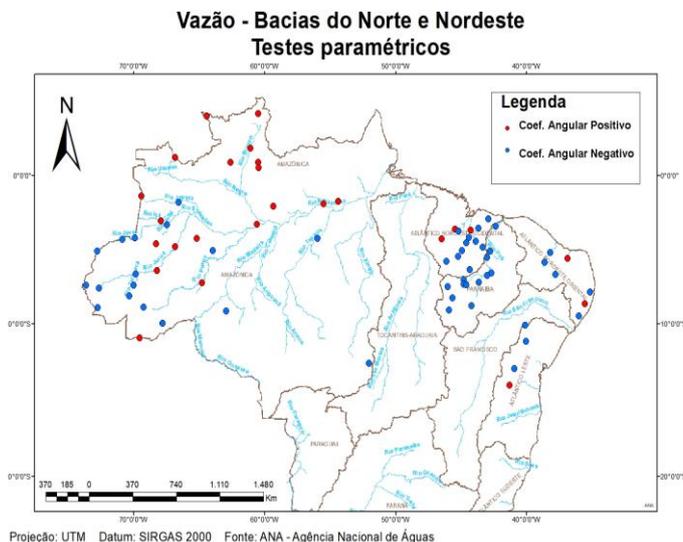


Fig. 9. Mapa para dados de vazão de bacias do Norte e Nordeste a partir do teste paramétrico.

As alterações percebidas nas variáveis hidroclimáticas das bacias estudadas, localizadas no Norte e Nordeste do Brasil, podem ser justificadas pelo fenômeno El Niño e La Niña.

El Niño e La Niña caracterizam-se pelo aquecimento/esfriamento das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical Central e do Leste. O gradiente de pressão entre o Pacífico Central e do Oeste (chamado de “oscilação sul”) experimenta variações associadas ao aquecimento ou esfriamento do Pacífico Equatorial. A interação entre o comportamento de anomalias de TSM (Temperaturas da Superfície do Mar) no Pacífico Tropical e as mudanças na circulação atmosférica decorrente deste aquecimento constitui o fenômeno de interação oceano-atmosfera mencionado na literatura como ENOS (El Niño Oscilação Sul) [7].

A partir destes fenômenos é possível concluir que as três variáveis hidroclimáticas estão diretamente conectadas entre si, já que dependendo da temperatura atmosférica, pode haver mudanças na vazão dos rios de cada bacia, alterando as precipitações em cada região.

Na Amazônia, a determinação de anos com vazões menores que o normal, ou tendências negativas, podem ser dados pelo El Niño enquanto que La Niña determina vazões maiores que o normal, tendência positiva. No Nordeste o El Niño pode ser relacionado com os grandes períodos de seca.

O clima nas regiões políticas brasileiras, assim como em outras partes do mundo, é muito complexo, visto que envolve controles internos e externos ao sistema terra-atmosfera-oceano, não sendo um aval para os seres humanos degradarem o meio ambiente, como infelizmente tem ocorrido nas últimas décadas, em particular nas Regiões Norte e Centro-Oeste do país. Devido ao aumento populacional que fatalmente ocorrerá nas próximas décadas, sugere-se a adoção de políticas de conservação ambiental bem elaboradas e mudanças nos hábitos de consumo para que as gerações futuras possam dispor dos recursos naturais que se dispõem atualmente [8].

Pelos resultados apresentados acima, ainda é difícil analisar e concluir o quanto as mudanças antropogênicas têm influenciado o clima nessa região do Brasil. Além disso, a dificuldade de quantificação do papel de cada agente hidroclimático se dá pela deficiência de uma rede de estações medidoras, pela ausência de entendimento dos processos climáticos complexos e pelas limitações dos modelos hidroclimáticos até então disponíveis. Em particular, a falta de medições de dados meteorológicos e hidrológicos de longo período no Brasil é um forte fator limitante à capacidade de diagnosticar e quantificar as influências dos diferentes agentes que atuam no clima e na hidrologia do território brasileiro [9].

IV. CONCLUSÃO

As análises realizadas por meio dos testes estatísticos não paramétricos nas séries temporais de cada parâmetro meteorológico e hidrológico indicaram que:

- Avaliou-se um aumento da temperatura média em todas as regiões das bacias hidroclimáticas estudadas principalmente a partir das décadas de 1990 e 2000. Para os dados de precipitação não houveram muitas confirmações de tendência, não podendo concluir muito a respeito. A partir dos dados de vazão não teve muitos resultados de tendências para os testes não paramétricos, porém analisando os dados de regressão percebe-se um comportamento de aumento na vazão dos rios da bacia da Amazônia, e uma diminuição das vazões dos rios encontrados nas bacias da região Nordeste.

- Não se pode descartar a provável influência dos fenômenos El Niño e La Niña no clima, assim como na hidrologia de alguns rios, pertencentes as bacias do Amazonas, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba e Atlântico leste, localizados nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Sendo assim, ainda não se pode ter um quadro exato sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas e hidrológicas, devido à ação antropogênica quando se olha as distribuições espaciais das tendências inferidas no presente trabalho. Portanto, faz-se necessário uma melhor avaliação dos dados aqui mostrados. Nessas perspectivas, estudos deste tipo poderão contribuir para a mitigação das mudanças que estão ocorrendo nos ecossistemas e nas biodiversidades das bacias das Regiões Norte e Nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] I.A. Shiklomanov, A.I. Shiklomanov, R.B. Lam-mers, B.J. Peterson, C.J. Vorosmarty, “The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean”. In: E.L. Lewis, E.P. Jones, T.D. Prowse, P. Wadhams (eds) The freshwater budget of the Arctic Ocean. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 2000, pp. 281-296.
- [2] T.R. Karl, H.F. Diaz, G. Kukla, “Urbanization: its detection and effect in the United States climate record”. Journal of Climate. v. 1, pp. 1099-1123, 1988.
- [3] INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP. 2015. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 07 mai. 2018.
- [4] ANA. Agência Nacional de Águas. Sistema – HidroWeb. 2015. Disponível em: <www.hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 07 mai. 2018.
- [5] J.C. Penereiro, D.H.L. Ferreira, “Estatística apoiada pela Tecnologia: uma proposta para identificar tendências climáticas”. Acta Scientiae. v. 13, n.1, pp. 87-105, 2011.

2018 Brazilian Technology Symposium

- [6] C.A. Sansigolo, M.T. Kayano, "Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913-2006 period". *Theoretical and Applied Climatology*. v. 101, pp. 209-216, 2010.
- [7] J.A. Marengo, "Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI". Brasília: MMA, (Série Biodiversidade). v. 26, 2. ed, 212p, 2007.
- [8] J.W. Zanquim Jr., A.P.H. Moraes, F.T. Moraes, E.C.C. Melnick, "Danos ambientais urbanos e instrumentos de solução dos conflitos". In: *Novos Direitos – Cidades em Crise? Anais...* São Carlos: Editora RiMa, pp. 175-188, 2015.
- [9] J.C. Penereiro, D.V. Orlando, "Análises de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do rio Parnaíba entre os estados do Maranhão e Piauí/Brasil". *Revista Geográfica Acadêmica* v. 7, n. 2, pp. 5-21, 2013.