Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

IDENTIFICAÇÃO DE VARIABILIDADES E TENDÊNCIAS INTERANUAIS EM MEDIDAS HIDRO-CLIMÁTICAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO TOCANTINS-ARAGUAIA, BRASIL

PENEREIRO, Júlio César – jcp@puc-campinas.edu.br
Professor Doutor – do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia da PUC-Campinas

MARTINS, Luíza La Salvia – luiza.lsm@puc-campinas.edu.br
Graduanda em Engenharia Ambiental na PUC-Campinas

BERETTA, Victor Zeni – victor.zb@puc-campinas.edu.br
Graduando em Engenharia Ambiental na PUC-Campinas

RESUMO: Mudanças promovidas pelo clima e por ações antrópicas podem gerar significativos impactos sobre o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Neste estudo, avaliou-se a ocorrência de tendências em séries temporais anuais de precipitação pluviométrica, temperaturas mínima, média e máxima e de vazões em rios, registradas em localidades pertencentes à bacia hidrográfica do Tocantins–Araguaia, no nordeste do Brasil. Procurou-se identificar, por meio de testes estatísticos, eventuais pontos de mudança no comportamento das séries temporais que, dependendo da localidade, possuem diferentes períodos de intervalo de tempo. Para tanto, utilizaram-se a Análise de Regressão Linear e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt. Os resultados, apresentados em forma de tabelas, gráficos e mapas, indicam que a maioria dos locais avaliados não registraram tendências, em particular na precipitação. Contudo, as análises dos dados de vazão e temperaturas revelaram locais com tendências significativas confirmadas. Os dados de vazão acusaram comportamentos diferenciados para as tendências entre os rios Tocantins e Araguaia, destacando que antes e depois da barragem de Tucuruí, no rio Tocantins, se registrou tendência positiva e negativa a partir de 1986, respectivamente, coincidindo com a entrada de operação da usina hidroelétrica de Tucuruí.

PALAVRAS-CHAVE: Tendências, testes estatísticos, séries temporais, bacia dos rios Tocantins–Araguaia.

IDENTIFICATION OF VARIABILITY AND INTER-ANNUAL TRENDS IN HYDRO-CLIMATE MEASURES AT THE TOCANTINS RIVER BASIN DISTRICT-ARAGUAIA, BRAZIL

ABSTRACT: Changes promoted by climate and anthropogenic actions may generate significant impacts on the hydrological regime of a river basin. In this study, the occurrence of trends in annual time series of rainfall, minimum, average and maximum temperatures and flow of rivers, registered in localities that belong to the Tocantins-Araguaia river basin, in northeast of Brazil, is evaluated. We aimed to identify through statistical tests, possible points of change in behaviour of the time series which, depending on the locality, have different periods of time. Linear Regression Analysis and nonparametric tests of Mann-Kendall and Pettitt were used. The results, presented in the form of tables, graphs and maps, indicate that majority of the places evaluated did not record trends, particularly in precipitation. However, the analysis of flow and temperatures data revealed places with significant trends confirmed. The flow data showed different behaviour between the Tocantins and Araguaia Rivers, noting that before and after the Tucuruí Dam, on the Tocantins River, have registered positive and negative trends from 1986, respectively, coinciding with the beginning of the operation of the Tucuruí Hydroelectric Station.

KEYWORDS: Trends, statistical tests, times series, Tocantins–Araguaia rivers basin.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

1. INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo informações de dados históricos sobre os índices de precipitações pluviais e vazões em rios têm recebido especial atenção por parte da comunidade científica devido à influência nas condições da qualidade de vida das pessoas, na geração de energia, no uso dos recursos hídricos, além das atividades agropecuárias, industriais, turísticas, dentre outras. De maneira geral, os estudos voltados às alterações climáticas e hidrológicas ocorridos no passado possibilitam compreender melhor as modificações que estão sendo registradas no presente, podendo servir de elementos de estudos que visem uma melhor averiguação do comportamento do clima e do comportamento dos rios de uma determinada região no futuro. Exemplos recentes de projeções conquistadas por meio de modelos climáticos, que consideram diferentes aspectos socioeconômicos, como uso do solo, extração mineral, crescimento urbano, concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE), dentre outros fatores, podem ser averiguados nos trabalhos de Marengo (2007), Marengo *et al*. (2010), Adam; Collischonn (2013) e Blain (2013).

Neste contexto, o 4º. e 5º. Relatórios Científicos do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) das Nações Unidas, usando as medições extraídas desde meados da década de 1970, evidenciaram variações nos parâmetros climáticos. Em ambos os relatos concluiu-se que, inequivocamente, uma parte das variabilidades identificadas no clima de várias regiões do mundo é consequência do atual aquecimento global observado (MEEHL *et al.*, 2007; TOLEDO, 2013, IPCC, 2014). Esses relatórios também sugerem que, com grau superior a 90% de confiabilidade, o referido aquecimento global identificado ao longo das últimas décadas está relacionado às atividades antropogênicas no meio ambiente. Neste sentido, o uso indevido do solo por meio de desmatamentos, queimadas, atividades garimpeiras, as crescentes urbanizações sem planejamentos adequados (KARL *et al.,* 1988), além da contaminação dos recursos hídricos e das emissões de GEE e partículas de aerossóis, passaram a representar importantes fatores de riscos para um desequilíbrio ambiental em diferentes escalas de tempo.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Brasil, estima-se que o país possua atualmente em sua matriz energética mais de 79,3% da geração de energia elétrica advinda de usinas hidroelétricas (EPE, 2014). Como a capacidade de gerar energia por uma usina deste tipo está relacionada à quantidade de água armazenada em seu reservatório, esse armazenamento depende da vazão fornecida pelo rio que o abastece para manter seu nível d´água. Entretanto, a vazão de um rio depende do regime de precipitação pluvial ao qual a sua bacia hidrográfica está submetida. Em função disso, a variabilidade do regime de chuvas de uma região na qual está inserida a bacia hidrográfica traz consequências importantes para o sistema de geração de energia elétrica nacional.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Vários estudos sobre a situação climática no Brasil já foram realizados e revelaram que o país tem experimentado muitas alterações, dependendo da região política. Neste sentido, de acordo com Marengo e colaboradores, os estudos sobre a variabilidade dos parâmetros climáticos locais em bacias hidrográficas são importantes para verificar o comportamento desses sistemas hídricos ao longo dos anos. Essa conduta possibilita ter uma melhor compreensão desses sistemas ambientais e, com isso, abre a possibilidade de realizar previsões visando o planejamento dos recursos hídricos, como construções de reservatórios para abastecimento de cidades e para a geração de energia elétrica, dentre outros (MARENGO *et al.*, 2010).

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de realizar um diagnóstico sobre os comportamentos dos índices de temperaturas, precipitações pluviais e de vazões na região da bacia hidrográfica do Tocantins–Araguaia, considerada hidrologicamente a maior bacia inteiramente em território brasileiro, além de possuir um elevado potencial hidroenergético.

O foco principal do trabalho foi analisar a ocorrência de variabilidades e tendências em séries temporais de dados hidro-climáticos medidos em locais distribuídos ao longo dos rios Tocantins, Araguaia e seus afluentes. Neste sentido, foram aplicados às séries contendo os parâmetros de temperaturas, precipitação pluvial e de vazão métodos estatísticos paramétricos, como o da regressão linear, e não paramétricos como os de Mann-Kendall e de Pettitt no intuito de se detectar mudanças bruscas e tendências significativas nas médias interanuais. Os resultados alcançados foram analisados na tentativa de realizar um estudo exploratório para verificar se as tendências estão relacionadas à origem antrópica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo: localização geográfica e climatológica da região

Cobrindo uma área de 921.921 km^2 a região hidrográfica do Tocantins–Araguaia abrange parte dos estados do Maranhão (3,8%), Tocantins (34,2%), Pará (20,8%), Goiás (26,8%), Mato Grosso (14,3%), além do Distrito Federal (0,1%), o equivalente a aproximadamente 10,8% do território brasileiro (MMA, 2006). Uma caracterização geral desta região hidrográfica está mostrada na Figura 1.

Uma análise superficial da Figura 1 revela que o rio Tocantins tem sua nascente no planalto de Goiás, sendo formado pelos rios das Almas e Maranhão, e possui a extensão total aproximada de 1.960 km até a sua foz no Oceano Atlântico. A figura também destaca o rio Araguaia, principal afluente do Tocantins, com a extensão de 2.600 km e onde se encontra a maior ilha fluvial do mundo, a Ilha do Bananal, com 350 km de comprimento e 80 km de largura.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Na margem direita do Tocantins destacam-se os afluentes: rios Bagagem, Tocantinzinho, Paranã, dos Sonos, Manoel Alves Grande e Farinha; enquanto que na margem esquerda estão os rios Santa Teresa e Itacaiúnas (ANA, 2013). Essa bacia hidrográfica é considerada a segunda maior região brasileira em termos de disponibilidade hídrica, apresentando 13.624 m³/s de vazão média, o que equivale a 9,6% do total do país e uma vazão específica média de 14,84 l/s/km^2, considerando a área total (MMA, 2006).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010 a referida região apresentava uma população de 8.610.721 habitantes, sendo 76% ocupando áreas urbanas, caracterizando uma densidade demográfica de 9,3 hab./km^2, portanto, inferior à do país (22,4 hab./km^2). As principais cidades são: Belém (PA), com ~1.432.844 hab.; Imperatriz (MA), com ~252.320 hab.; Marabá (PA), com ~257.062 hab.; Palmas (TO), com ~265.409 hab. e Araguaína (TO), com ~167.176 hab. O restante da população encontra-se distribuída de forma fragmentada, com predominância de cidades com até 5.000 habitantes. Não obstante, a maior parcela da população concentra-se em 411 cidades inseridas total ou parcialmente nas regiões influenciadas pela hidrografia do Tocantins e o litoral paraense (MMA, 2006, IBGE, 2010).

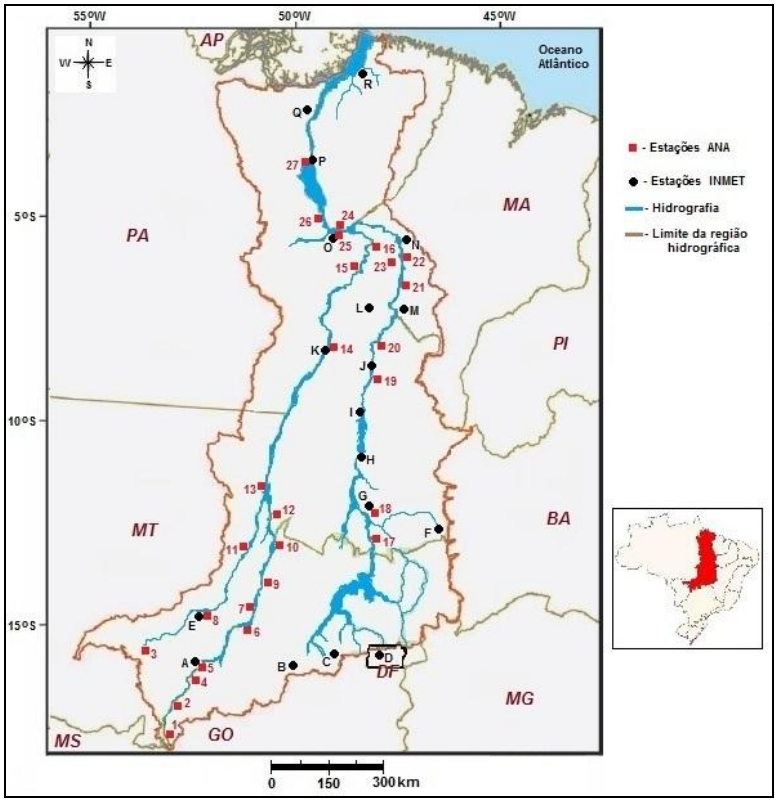

Figura 1: Caracterização e localização geográfica das estações medidoras do INMET e da ANA na região hidrográfica do Tocantins–Araguaia.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Com um clima caracterizado como tropical, com temperatura média anual de 26°C, a região hidrográfica do Tocantins–Araguaia possui dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso, de outubro a abril, com mais de 90% da precipitação, com a existência de alguns dias secos entre janeiro e fevereiro, formando o chamado veranico; e o seco, de maio a setembro, com baixa umidade relativa do ar. De acordo com os dados da ANA, a precipitação média nessa região é da ordem de 1.869 mm/ano, com a máxima registrada de 2.565 mm no litoral paraense, enquanto a evapotranspiração média é da ordem de 1.371 mm/ano. (ANA, 2013).

O regime de precipitações é caracterizado pela ocorrência do aumento das chuvas de acordo com a diminuição da latitude, isto é, deslocando-se do sul para o norte. Verifica-se que, normalmente, a menor precipitação ocorre na faixa a oeste da cidade de Paranã (GO), com valores médios de 1 mm/mês entre os meses de junho e agosto. Entretanto, no extremo norte o período seco reduz-se a três meses do ano, particularmente em junho, julho e agosto, sendo que e no restante da região avaliada a seca atinge entre cinco e seis meses. Constatou-se que o efeito da topografia da região abordada colabora muito pouco com a distribuição e o total das precipitações. Portanto, as causas da ocorrência de chuvas estão associadas aos sistemas de circulação atmosférica (MMA, 2006).

Medidas realizadas pelas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) revelam que as temperaturas médias e as máximas mensais são as mais elevadas na posição continental da região estudada, acarretando que essas medidas registradas nos períodos noturnos sejam bem mais baixas que as diurnas. Constata-se que os mínimos térmicos estão associados às frentes frias oriundas do sul do país, alcançando, com excepcionalidade, valores abaixo de 5ºC na parte sul e da ordem de 10ºC na parte norte da bacia do Tocantins–Araguaia (INMET, 2014).

As usinas hidrelétricas em operação na referida região são: Tucuruí, com 4.200 MW de potência total; Serra da Mesa, com 1.275 MW; Estreito, com 1.087 MW; Luis Eduardo Magalhães (Lajeado), com 903 MW; Cana Brava, com 472 MW; e Peixe Angical, com 452 MW. Neste contexto, o potencial hidrelétrico aproveitado da referida bacia, de acordo com dados apresentados em 2011 pela ANA, é de 13.114 MW, o que corresponde a 16% do total instalado do Brasil (ANA, 2013).

Segundo informações disponíveis no Programa de Monitoramento do Desmatamento nos Biomas Brasileiros por Satélite (MMA/Ibama) e no Projeto de Monitoramento do Desflorestamento da Amazônia Legal (Prodes/INPE), a área de cobertura de vegetação remanescente do bioma Amazônico e Cerrado em relação a área original na bacia do Tocantins–Araguaia é de 39% e 60%, respectivamente. Os remanescentes desses biomas somados representam 53% da área da região hidrográfica, sendo 14% desses localizados em unidades de

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)
conservação e proteção integral ou de uso sustentável, além de terras indígenas (MMA, 2014).

2.2. Dados tratados

Foram usados os dados climáticos diários, medidos por equipamentos na superfície, para temperatura mínima (*T-Mín.*), média (*T-Méd.*) e máxima (*T-Máx.*) do ar e para precipitação pluvial (*Prec.*), pertencentes ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET. No presente levantamento foram selecionadas 18 estações meteorológicas localizadas na região hidrográfica do Tocantins–Araguaia (INMET, 2014).

As medidas hidrológicas utilizadas foram àquelas registradas pelas 27 estações medidoras da Agência Nacional de Águas (ANA), localizadas nas proximidades e/ou às margens dos rios Tocantins e Araguaia, além dos seus afluentes. Esses dados estão disponibilizados no banco de dados HidroWeb da ANA, onde trabalhou-se com dados diários de vazão (*Vaz.*) (ANA, 2014).

As informações das séries temporais trabalhadas nessa pesquisa encontram-se resumidas na Tabela 1, para os dados climáticos, e na Tabela 2, para os dados hidrológicos. Nestas tabelas estão destacadas as identificações numéricas (#), para eventuais análises e comparações com relações às posições no mapa da Figura 1, além dos nomes das localidades, seguido dos respectivos códigos numéricos e das coordenadas geográficas que identificam as estações, além do período de cada série temporal trabalhada.

Seguindo os mesmos procedimentos computacionais realizados por Black (2001) e Groppo *et al*. (2005), todos dados informados nas Tabelas 1 e 2 foram organizados, tratados e reduzidos usando planilhas do aplicativo *Microsoft Office Excel*. Esses procedimentos possibilitaram realizar diferentes tipos de cálculos, particularmente visando correções de eventuais faltas de dados, geração de gráficos, análises do comportamento da variabilidade e da eventual ocorrência de uma tendência nos parâmetros de interesse, além da realização de análises estatísticas acuradas que serão tratadas a seguir.

As ocorrências de falhas nas medições de uma determinada série foram corrigidas pelo método da interpolação por meio da média com grau três, isto é, calculando a média dos três dias anteriores ou posteriores, se os mesmos também não estivessem com esses erros. Para os períodos com falhas maiores que três dias, optou-se por calcular a média entre os três mesmos meses dos três anos anteriores ou posteriores, conforme cada caso específico. No caso de falhas maiores que três anos, optou-se por eliminar os dados anteriores a essas falhas, restando uma série de período menor que a original, porém de maior consistência de dados para serem tratados estatisticamente. Por conta disso, na

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

última coluna das referidas tabelas os períodos das séries temporais de cada localidade são diferenciados.

Tabela 1: Relação dos locais com as estações medidoras do INMET.

#	Local	Estação	Lat. (°)	Long. (°)	Período (anos)
A	Aragarças (GO)	83368	-15,90	-52,23	1972-2012
B	Goiás (GO)	83374	-15,91	-50,13	1961-2013
C	Pirenópolis (GO)	83376	-15,85	-48,96	1976-2012
D	Brasília (DF)	83377	-15,78	-47,93	1962-2013
E	Nova Xavantina (MT)	83319	-14,70	-52,35	1998-2012
F	Taguatinga (TO)	83235	-12,40	-46,41	1961-2013
G	Peixe (TO)	83228	-12,01	-48,35	1975-2013
H	Porto Nacional (TO)	83064	-10,71	-48,41	1961-2013
I	Palmas (TO)	83033	-10,19	-48,30	1994-2013
J	Pedro Afonso (TO)	82863	-8,96	-48,18	1977-2013
K	Conc do Araguaia (PA)	82861	-8,26	-49,26	1961-2013
L	Araguaína (TO)	82659	-7,20	-48,20	1985-2013
M	Carolina (MA)	82765	-7,33	-47,46	1969-2013
N	Imperatriz (MA)	82564	-5,53	-47,48	1976-2012
O	Marabá (PA)	82562	-5,36	-49,13	1973-2013
P	Tucuruí (PA)	82361	-3,76	-49,66	1971-2013
Q	Cametá (PA)	82263	-2,25	-49,50	1970-2013
R	Belém (PA)	82191	-1,43	-48,43	1961-2013

Tabela 2: Relação dos locais com as estações medidoras da ANA.

#	Local	Estação	Lat. (°)	Long. (°)	Período (anos)
1	Alto Araguaia (MT)	24050000	-17,30	-53,22	1965-2012
2	Torixoréu (MT)	24200000	-16,20	-52,55	1971-2012
3	Tesouro (MT)	24500000	-16,08	-53,55	1967-2007
4	Aragarças (GO)	24700000	-15,89	-52,23	1971-2012
5	Barra das Garças (MT)	26050000	-15,25	-53,06	1968-2012
6	Araguaiana (MT)	24850000	-15,74	-51,83	1974-2006
7	Aruanã (GO)	25200000	-14,90	-51,08	1970-2012
8	Nova Xavantina (MT)	26100000	-14,67	-52,36	1969-2012
9	Cocalinho (MT)	26200000	-14,09	-51,70	1981-2012
10	S. Miguel do Araguaia (GO)	25950000	-13,21	-50,59	1974-2012
11	Novo Santo Antônio (MT)	26300000	-12,29	-50,96	1970-2012
12	Nova Crixás (GO)	25700000	-13,69	-50,80	1975-2007
13	São Félix do Araguaia (MT)	26350000	-11,62	-50,66	1974-2012
14	Conceição do Araguaia (PA)	27500000	-8,27	-49,26	1970-2012
15	Xambioá (TO)	28300000	-6,41	-48,54	1970-2012
16	Araguatins (TO)	28850000	-5,63	-48,13	1975-2012

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

17	S Salvador do Tocantins (TO)	21080000	-12,74	-48,24	1978-2005
18	Peixe (TO)	22050001	-12,02	-48,53	1971-2013
19	Miracema do Tocantins (TO)	22500000	-9,57	-48,38	1970-2012
20	Tupiratins (TO)	23100000	-8,39	-48,11	1970-2012
21	Tocantinópolis (TO)	23600000	-6,29	-47,39	1955-2013
22	Descarreto (TO)	23700000	-5,79	-47,47	1974-2012
23	S Bento do Tocantins (TO)	28840000	-6,04	-48,20	2001-2012
24	Marabá–1 (PA)	29050000	-5,34	-49,12	1972-2013
25	Marabá–2 (PA)	29100000	-5,49	-49,22	1970-2012
26	Itupiranga (PA)	29200000	-5,13	-49,32	1977-2013
27	Tucuruí (PA)	29700000	-14,76	-43,93	1978-2012

As medidas disponíveis no banco de dados da ANA, das vazões para a estação de Araguacema (TO), no rio Araguaia, e a estação de Santa Rita do Araguaia (GO), localizada no rio Babilônia, afluente do rio Araguaia, apresentaram-se com muitas falhas intercaladas. Por esse motivo esses dados foram descartados da amostra final trabalhada.

2.3. Análises estatísticas

Com o intuito de verificar a variabilidade de uma determinada série temporal foi empregada a análise paramétrica da regressão linear. Com isso, foi possível avaliar o nível de significância do coeficiente angular determinado. Para tanto, realizou-se o cálculo das médias móveis, empregando ordem cinco aos dados e, posteriormente, trabalhou-se com uma suavização dos dados visando evitar ou minimizar possíveis flutuações dos mesmos. Na suavização utilizou-se a sugestão apresentada por Sello (1999), isto é, para uma dada série temporal empregou-se a seguinte relação:

$$\overline{V}_n = \frac{1}{6}\left[\sum_{i=n-2}^{n+2} V_i + \frac{1}{2}\left(V_{n+3} + V_{n-3}\right)\right] \quad (1)$$

em que, ($\overline{V}_n$) representa o valor médio da variável em estudo para o i-éssimo mês (V_i).

Posteriormente, tanto para os pontos médios como para os suavizados, aplicou-se o ajuste da equação da reta de tendência:

$$Y = a \cdot (x) + b \quad (2)$$

em que, "a" e "b" representam os coeficientes angular e linear, respectivamente, e $x = t$ representa o tempo em anos. Assim, $a > 0$ significa uma tendência crescente, $a < 0$ indica uma tendência decrescente e $a \approx 0$ um comportamento estável. Completando as análises, determinou-se o valor da

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

estatística do R-quadrado (R^2) como uma medida da qualidade do ajuste efetuado, além do intervalo de confiança em 95% acima e abaixo do valor estimado do coeficiente angular da reta de regressão.

Na sequência, cada série temporal foi submetida ao teste de homogeneidade de Pettitt (PETTITT, 1979). Este procedimento não paramétrico utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney (FREUND, 2006), no qual se verifica se duas amostras $Y_1, Y_2, ..., Y_t$ e $Y_{t+1}, Y_{t+2}, ..., Y_T$ pertencem à mesma população. Para tanto, é calculada a estatística $u_{t,T}$ por meio de uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que um membro da segunda amostra, de acordo com a equação:

$$u_{t,T} = u_{t-1,T} + \sum_{j=1}^{T} \operatorname{sgn}\left(Y_i - Y_j\right); \quad \text{para } t = 2, ..., T \tag{3}$$

em que: $\operatorname{sgn}\left(Y_i - Y_j\right) = 1$ para $Y_i > Y_j$; $\operatorname{sgn}\left(Y_i - Y_j\right) = 0$ para $Y_i = Y_j$ e $\operatorname{sgn}\left(Y_i - Y_j\right) = -1$ para $Y_i < Y_j$.

Obteve-se a estatística $K(t)$ do teste por meio do máximo valor absoluto de $u_{t,T}$. Essa estatística localiza o ponto em que houve uma mudança brusca de uma série temporal e sua significância pode ser avaliada por meio da relação:

$$p \cong 2 \cdot e^{\left(\frac{-6 \cdot K(t)^2}{T^3 - T^2}\right)} \tag{4}$$

O ponto de mudança é o valor de t onde ocorre o máximo (ou mínimo) de $K(t)$. A equação anterior permite inferir o valor crítico ($K_{crit.}$) por meio da expressão:

$$K_{crit.} = \pm\sqrt{\frac{-\ln\left(p/2\right) \cdot \left(T^3 + T^2\right)}{6}} \tag{5}$$

Para todos os cálculos envolvendo esse teste, adotaram-se os níveis de significância da mudança em 5% a 10% usando o valor de $K_{crit.}$ da série trabalhada.

Posteriormente, cada série temporal foi tratada pelo teste sequencial de Mann-Kendall, proposto inicialmente por Sneyers (1975). Trata-se também de um teste não paramétrico no qual, na hipótese de estabilidade de uma série, os valores devem ser independentes e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples) (PINHEIRO *et al.*, 2013).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Considerando uma série Y_i de N termos ($1 \le i \le N$) a ser analisada, o procedimento consiste em realizar a soma $t_n = \sum_{i=1}^{N} m_i$ do número de termos m_i da série, relativo ao valor Y_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($Y_j < Y_i$). Para uma série 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 dada por: $E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4}$ e $\mathrm{var}(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72}$. Utilizando um teste bilateral e estando a significância estatística de t_n para a hipótese nula, esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística $U(t_n)$, fornecida pela equação:

$$U(t_n) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{\mathrm{var}(t_n)}} \quad (6)$$

Por meio de uma tabela de distribuição normal padronizada, o valor da probabilidade α_1 é calculado por: $\alpha_1 = prob\left(|U| > |U(t_n)|\right)$. Sendo α_0 o nível de significância do teste (geralmente $\alpha_0 = 0{,}05$), a hipótese nula (H_0) é aceita se $\alpha_1 > \alpha_0$. Caso a hipótese seja rejeitada, existirá uma tendência significativa, sendo que o sinal de $U(t_n)$ indica se a tendência é positiva ($U(t_n) > 0$) ou negativa ($U(t_n) < 0$).

Em sua versão sequencial, a equação $U(t_n)$ é calculada no sentido direto da série, isto é, partindo do valor $i = 1$ até $i = N$. Aplicando o mesmo princípio, porém partindo do valor $i = N$ até $i = 1$, gera-se a estatística inversa $U^*(t_n)$. A intersecção das duas curvas estatísticas, $U(t_n)$ e $U^*(t_n)$, corresponde ao ponto aproximado de mudança da tendência procurada. Entretanto, esse procedimento é considerado significativo se o referido ponto de intersecção ocorrer dentro dos intervalos bilaterais $-1{,}65$ a $1{,}65$ e $-1{,}96$ a $1{,}96$ correspondentes a $\alpha_0 = 0{,}10$ (em 10%) e $\alpha_0 = 0{,}05$ (em 5%), respectivamente (GROPPO *et al*., 2005; PENEREIRO; ORLANDO, 2013).

No entender de Sansigolo e Nery (2000), os dois testes descritos acima são os melhores procedimentos não paramétricos de análises em séries temporais visto que possuem um maior embasamento estatístico para modelos teóricos de descrição climática e hidrológica. Porém, como comentado por Penereiro e Orlando (2013), utilizam-se os testes de Pettitt e Mann-Kendall combinados, isto é, realizando análises gráficas e numéricas em conjunto para que se possa identificar e localizar quando uma possível tendência na série temporal passou a existir.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises dos testes paramétricos

Foram realizados os cálculos dos ajustes da linha de tendência e análise de regressão utilizando as médias móveis e suavizações de todas as séries temporais informadas nas Tabelas 1 e 2. Posteriormente a esses cálculos, com o intuito constituir uma ferramenta adicional de interpretação estatística, foram gerados os gráficos dos comportamentos das séries visando a identificação das características e peculiaridades de cada uma, tais como a eventual existência de heterogeneidades e mudanças abruptas.

Os valores dos coeficientes "a", do R^2 e do intervalo de confiança *IC* em 95% (inferior e superior) de cada grandeza climática abordada (*T-Mín.*, *T-Méd.*, *T-Máx.* e *Prec.*) estão apresentados entre a quarta e sexta coluna da Tabela 3. De forma análoga, entre a terceira e quinta coluna da Tabela 4 estão apresentados os mesmos tipos de ajustes só que referentes aos dados hidrológicos (*Vaz.*) para todas as localidades tratadas neste levantamento.

Os dados contidos na Tabela 3 sugerem que, das 18 estações do INMET, o correspondente a 72 séries temporais trabalhadas, a maior parte (86%) acusou aumento (a >0), principalmente no que se referem às temperaturas. Entretanto, todas as diminuições registradas (a <0) estão relacionadas à precipitação pluviométrica (14%). Adicionalmente a esta análise, os dados de vazão contidos na Tabela 4 mostram que, do total das 27 estações da ANA, sete (26%) apresentaram aumento e vinte (74%) acusaram diminuição no índice de vazão média.

A qualidade dos ajustes realizados pode ser conferida por meio do índice R^2, visto que quanto mais próximo da unidade for esse valor, menor é a dispersão dos dados tratados e, consequentemente, melhor o ajuste efetuado. As informações contidas nas tabelas em análises mostram um amplo intervalo de valores desse índice para todas as séries trabalhadas, sendo que o mesmo encontra-se, para as séries climáticas entre 0,0004 (para *Prec.* na cidade de Imperatriz, MA) e 0,9993 (para *T-Méd.* em Palmas, TO), e para as séries hidrológicas entre 0,0082 (em São Félix do Araguaia, MT) e 0,9472 (em São Salvador do Tocantins, TO). Esse fato atesta a ampla diversificação dos dados aqui tratados.

Quanto ao intervalo de confiança (*IC*), que indica a probabilidade do coeficiente angular de uma determinada variável encontrar-se no intervalo inferior e superior calculado de 95% dos dados, os valores dependem da variável que está sendo tratada. Por conta disso, verifica-se nas Tabelas 3 e 4 uma grande distribuição de intervalos de *IC*, tornando esse tipo de análise

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

bastante limitada. Foi por conta desta limitação, além da insegurança pertinente a este tipo de abordagem, que se optou por empregar os métodos estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt, descritos anteriormente.

3.2 Análises dos testes não paramétricos

Como comentado antes, os testes de Mann-Kendall e de Pettitt foram aplicados em todas as séries temporais das variáveis hidro climáticas envolvidas neste levantamento. Alguns resultados dessas aplicações em formas gráficas são mostrados nas figuras 2 a 5 e analisados sequencialmente. Ressalta-se que os gráficos contidos nessas figuras apresentam em linha contínua os testes executados, sendo que as linhas horizontais tracejadas e pontilhadas indicam os intervalos (para o teste de Mann-Kendall) e os níveis (para o teste de Pettitt) de confiança de ±5% a ±10%, respectivamente.

Com o intuito de estabelecer um critério que expressasse os resultados dos dois testes, optou-se por utilizar a seguinte convenção: o sinal (–)(–) para uma tendência negativa confirmada entre 5% e 10% dos intervalos de confianças bilaterais e o sinal (–) se for acima de 10% do nível do intervalo de confiança. De maneira análoga, usou-se os sinais (+)(+) e (+) para tendência positiva confirmada, respectivamente. Em situações onde não houvesse condições de confirmar tendência um sinal (?) foi adotado para o teste empregado à série temporal. As três últimas colunas contidas nas Tabelas 3 e 4 contém esta convenção.

Os comportamentos inferidos para os dados de duas séries hidrológicas, para cidades de Peixe (TO), no rio Tocantins, e Marabá (MA), no rio Itacaiúnas, estão apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Ao analisar o comportamento das medidas de *Vaz.* entre 1971 e 2013 em Peixe, os testes de Mann-Kendall (Figura 2a) e de Pettitt (Figura 2b) confirmam o registro de tendência negativa com nível (–)(–) a partir de 1995. Isso se justifica porque ocorreu o cruzamento das curvas $U(t_n)$ e $U^*(t_n)$ entre os intervalos de confianças na referida data. Não obstante, o ponto de mudança brusca de $K(t)$ cruzou os limites críticos estabelecidos de 5% e 10% também em 1995.

O comportamento da *Vaz.* do rio Itacaiúnas, em Marabá, medida entre 1970 e 2012, está mostrado na Figura 3 e se revela de forma diferente da obtida para Peixe. Neste caso, os testes de Mann-Kendall e de Pettitt também confirmam o registro de tendência, porém positiva e com o nível (+)(+). Observa-se que o cruzamento das curvas $U(t_n)$ e $U^*(t_n)$, entre os intervalos de confianças, ocorreu em 1985 (Figura 3a). Entretanto, o ponto de mudança brusca de $K(t)$ ocorreu ao cruzar os limites críticos estabelecidos de 5% e 10%

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

(Figura 3b), mas em 1984. Com isso, confirmou-se aumento de tendência (+)(+) na vazão média do rio Itacaiúnas, naquele local a partir de 1984.

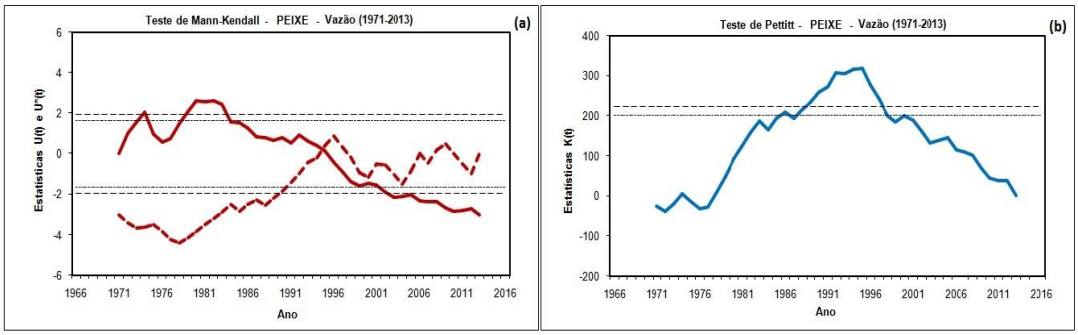

Figura 2: Estatísticas de Mann-Kendall (superior e em vermelho) e de Pettitt (inferior em azul) para medidas de vazão média na cidade de Peixe (TO), localizada próxima do rio Tocantins.

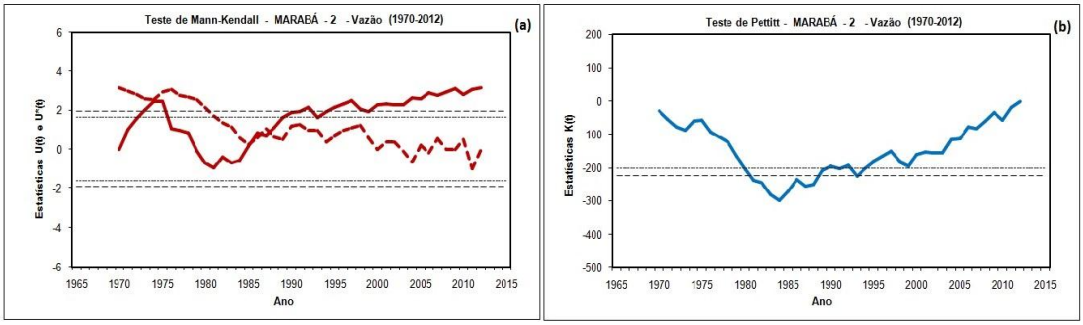

Figura 3: Idem aos gráficos da figura 2, porém aplicados às medidas de vazão média em Marabá (PA) , localizada próxima do rio Itacaiúnas.

A aplicação dos testes não paramétricos aos dados de *Prec.*, medidos entre 1961 e 2013, na cidade de Conceição do Araguaia (PA) revelam que nenhuma tendência pode ser confirmada. Isso se deve porque, como se verifica na Figura 4a, há vários cruzamentos das curvas estatísticas no teste Mann-Kendall dentro dos intervalos de confiança e, além disso, no teste de Pettitt (Figura 4b), a curva estatística em nenhum momento não cruzou os níveis de significância de ±5% e ±10%.

Seguindo os mesmos procedimentos de análises realizadas anteriormente, nenhuma tendência significativa pode ser atribuída ao índice de *T-Máx.* medido entre 1971 e 2013 na cidade paraense de Tucuruí (Figura 5).

Em que pese ser identificado, pelo teste de Mann-Kendall, o cruzamento das curvas $U(t_n)$ e $U^*(t_n)$ entre os intervalos de confianças na data de 2005 (Figura 5a), e a curva do teste de Pettitt ter cruzado os dois níveis de significância com o máximo inferido em 1997 (Figura 5b), essas datas são muito diferentes para se afirmar com segurança que há tendência nessa série temporal. Desta forma, optou-se por descartar a possibilidade de tendência na temperatura máxima dessa cidade.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

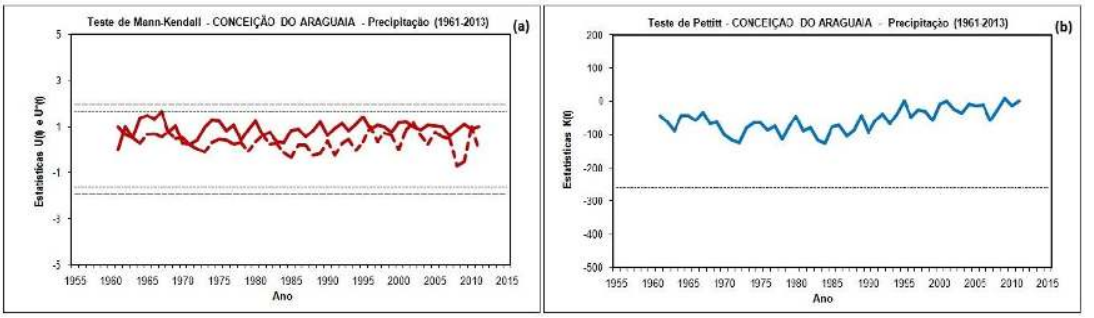

Figura 4: Idem aos gráficos das figuras 2 e 3, mas aplicados às medidas de precipitação pluvial em Conceição do Araguaia (PA).

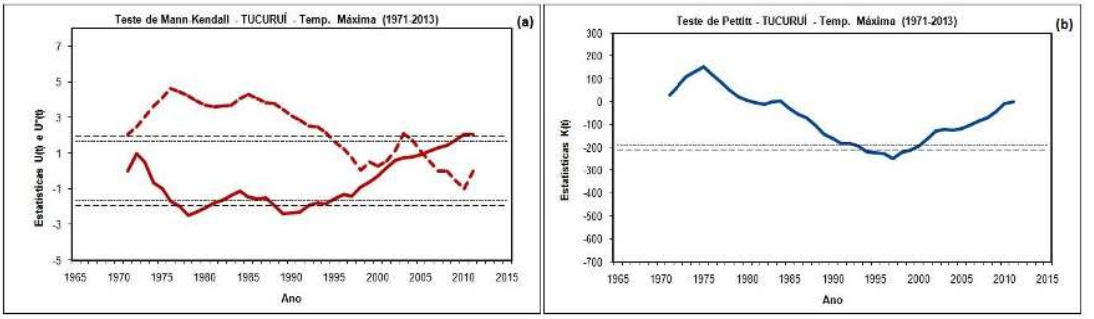

Figura 5: Idem aos gráficos anteriores, porém aplicando os testes não paramétricos às medidas de temperatura máxima em Tucuruí (PA).

Como comentado antes, as três últimas colunas das Tabelas 3 e 4 resumem todas as análises não paramétricas efetuadas para os dados provenientes do INMET e da ANA, respectivamente. Para cada localidade analisada encontram-se os resultados acusados por cada um dos testes em cada série. Ressalta-se que a última coluna de cada tabela contém o resultado final da existência ou não de tendência, o tipo da mesma e a partir de quando esta passou a ocorrer.

Tabela 3:– Resultados das análises estatísticas inferidas para as variáveis climáticas medidas pelo INMET.

#	Cidade	Série	a	R^2	IC (95%)	Mann-Kendall	Pettitt	Tendência
A	Aragarças (GO)	T-Mín.	+0,0220	0,8890	+0,0189/+0,0250	(+)(+)1993	(+)(+)1994	(+)(+)1994
		T-Méd.	+0,0408	0,9622	+0,0376/+0,0440	(+)(+)1994	(+)(+)1993	(+)(+)1993
		T-Máx.	+0,0592	0,9832	+0,0562/+0,0623	(?)	(+)1993	(?)
		Prec.	−11,2777	0,7594	−13,7842/−8,7713	(?)	(−)1983	(?)
B	Goiás (GO)	T-Mín.	+0,0256	0,8067	+0,0214/+0,0298	(?)	(+)(+)1985	(?)
		T-Méd.	+0,0166	0,7693	+0,0136/+0,0196	(+)(+)2002	(+)(+)2001	(+)(+)2001
		T-Máx.	+0,0083	0,1029	+0,0001/+0,0164	(+)(+)2009	(+)(+)1997	(?)
		Prec.	−0,8437	0,0124	−3,3506/+1,6633	(?)	(?)	(?)
C	Pirenópolis (GO)	T-Mín.	+0,0151	0,4859	+0,0084/+0,0217	(?)	(+)(+)1997	(?)
		T-Méd.	+0,0476	0,8669	+0,0396/+0,0557	(+)1998	(+)(+)1997	(+)(+)1997
		T-Máx.	+0,0805	0,9539	+0,0728/+0,0881	(?)	(+)(+)1997	(?)
		Prec.	−2,5862	0,1002	−5,8923/+0,7200	(?)	(?)	(?)
D	Brasília (DF)	T-Mín.	+0,0406	0,8070	+0,0339/+0,0473	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Méd.	+0,0238	0,4660	+0,0152/+0,0324	(+)(+)1997	(+)(+)1993	(+)(+)1993
		T-Máx.	+0,0072	0,0438	−0,0042/+0,0186	(+)(+)2005	(+)1997	(?)
		Prec.	−5,3154	0,4387	−7,3477/+3,2831	(−)(−)1971	(−)1971	(−)1971
E	N. Xavantina (MT)	T-Mín.	+0,0656	0,6964	+0,0158/+01154	(?)	(?)	(?)
		T-Méd.	+0,0692	0,9523	+0,0514/+0,0870	(+)(+)2005	(?)	(?)
		T-Máx.	+0,0785	0,9293	+0,0536/+0,1034	(+)(+)2006	(?)	(?)
		Prec.	+12,3691	0,5869	+0,4391/+24,2992	(?)	(?)	(?)
F	Taguatinga	T-Mín.	+0,0422	0,9523	+0,0390/+0,0453	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Méd.	+0,0431	0,9588	+0,0401/+0,0461	(?)	(+)(+)1986	(?)

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

	(TO)	T-Máx.	+0,0466	0,8391	+0,0398/+0,0534	(+)(+)1986	(+)(+)1986	(+)(+)1986
		Prec.	−1,9418	0,0732	−4,2430/+0,3595	(?)	(?)	(?)
G	Peixe (TO)	T-Mín.	+0,0321	0,7078	+0,0232/+0,0409	(+)(+)1982	(+)(+)1985	(+)(+)1985
		T-Méd.	+0,0391	0,8896	+0,0332/+0,0450	(?)	(+)(+)1992	(?)
		T-Máx.	+0,0505	0,9633	+0,0462/+0,0547	(+)1986	(+)(+)1992	(?)
		Prec.	−6,4453	0,8262	−7,7203/−5,1703	(−)(−)1999	(?)	(?)
H	Porto Nacional (TO)	T-Mín.	+0,0467	0,9741	+0,0442/+0,0493	(?)	(+)(+)1981	(?)
		T-Méd.	+0,0013	0,9733	+0,0455/+0,0508	(?)	(+)(+)1994	(?)
		T-Máx.	+0,0364	0,7643	+0,0297/+0,0431	(+)(+)1994	(+)(+)1994	(+)(+)1994
		Prec.	+0,1940	0,0016	−1,4320/+1,8202	(?)	(?)	(?)
I	Palmas (TO)	T-Mín.	+0,1210	0,9913	+0,1096/+0,1323	(+)2001	(+)(+)2001	(+)(+)2001
		T-Méd.	+0,0957	0,9993	+0,0932/+0,0981	(+)(+)2002	(+)(+)2001	(+)(+)2001
		T-Máx.	+0,0702	0,9776	+0,0596/+0,0808	(+)(+)2002	(+)2001	(+)2001
		Prec.	+12,4170	0,5892	−1,9763/+26,8103	(?)	(?)	(?)
J	Pedro Afonso (TO)	T-Mín.	+0,0312	0,9271	+0,0272/+0,0352	(+)(+)2000	(+)(+)2000	(+)(+)2000
		T-Méd.	+0,0446	0,9942	+0,0431/+0,0462	(?)	(+)(+)1997	(?)
		T-Máx.	+0,0582	0,9795	+0,0544/+0,0620	(?)	(+)(+)1997	(?)
		Prec.	−1,1892	0,0153	−5,5130/+3,1344	(?)	(?)	(?)
K	C. do Araguaia (PA)	T-Mín.	+0,1174	0,9208	+0,1060/+0,1289	(?)	(?)	(?)
		T-Méd.	+0,0758	0,9663	+0,0711/+0,0805	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Máx.	+0,0347	0,8814	+0,0305/+0,0389	(+)1994	(+)(+)1994	(+)(+)1994
		Prec.	+1,2582	0,2634	+0,5574/+1,9590	(?)	(?)	(?)
L	Araguaína (TO)	T-Mín.	+0,0396	0,9687	+0,0353/+0,0438	(+)(+)1997	(+)(+)1997	(+)(+)1997
		T-Méd.	+0,0314	0,9691	+0,0281/+0,0348	(+)(+)1997	(+)(+)1996	(+)(+)1996
		T-Máx.	+0,0227	0,9384	+0,0192/+0,0262	(+)(+)1995	(+)(+)1994	(+)(+)1994
		Prec.	−0,3114	0,0107	−2,1089/+1,4861	(?)	(?)	(?)
M	Carolina (MA)	T-Mín.	+0,0496	0,9679	+0,0462/+0,0530	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Méd.	+0,0524	0,9738	+0,0491/+0,0556	(?)	(+)(+)1989	(?)
		T-Máx.	+0,0609	0,9549	+0,0559/+0,0660	(?)	(+)(+)1989	(?)
		Prec.	+3,4631	0,6064	+2,4034/+4,5229	(?)	(?)	(?)
N	Imperatriz (MA)	T-Mín.	+0,0421	0,6658	+0,0292/+0,0550	(+)(+)1988	(+)(+)1988	(+)(+)1988
		T-Méd.	+0,0562	0,9454	+0,0503/+0,0620	(+)(+)1991	(+)(+)1990	(+)(+)1990
		T-Máx.	+0,0734	0,9658	+0,0674/+0,0794	(?)	(+)(+)1995	(?)
		Prec.	−0,1879	0,0004	−4,4240/+4,0481	(+)(+)1983	(+)1983	(+)1983
O	Marabá (PA)	T-Mín.	+0,0573	0,9823	+0,0542/+0,0604	(?)	(?)	(?)
		T-Méd.	+0,0582	0,9846	+0,0552/+0,0612	(?)	(+)(+)1994	(?)
		T-Máx.	+0,0579	0,9513	+0,0525/+0,0633	(?)	(+)(+)1986	(?)
		Prec.	−9,4687	0,5072	−13,3129/−5,6245	(+)(+)1983	(?)	(?)
P	Tucuruí (PA)	T-Mín.	+0,0547	0,8449	+0,0454/+0,0639	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Méd.	+0,0432	0,9146	+0,0380+0,0484	(?)	(+)(+)1997	(?)
		T-Máx.	+0,0317	0,4936	+0,0190/+0,0444	(+)(+)2005	(+)(+)1997	(?)
		Prec.	+5,3446	0,4472	+2,9980/+7,6912	(?)	(?)	(?)
Q	Cametá (PA)	T-Mín.	+0,0318	0,4433	+0,0185/+0,0451	(+)(+)1995	(+)(+)1995	(+)(+)1995
		T-Méd.	+0,0342	0,5823	+0,0234/+0,0450	(+)(+)2002	(+)(+)1996	(?)
		T-Máx.	+0,0429	0,5794	+0,0293/+0,0565	(+)(+)2003	(+)(+)1996	(?)
		Prec.	+1,1411	0,0838	−0,3198/+2,6020	(?)	(?)	(?)
R	Belém (PA)	T-Mín.	+0,0382	0,9176	+0,0345/+0,0419	(?)	(+)(+)1986	(?)
		T-Méd.	+0,0264	0,7978	+0,0221/+0,0308	(+)1996	(+)(+)1994	(+)(+)1994
		T-Máx.	+0,0147	0,3181	+0,0077/+0,0217	(+)(+)2001	(+)(+)1997	(+)(+)1997
		Prec.	+7,9011	0,7696	+6,3175/+9,4846	(+)(+)1983	(?)	(?)

Tabela 4: Resultados das análises estatísticas medidas para os índices de vazões em estações medidoras da ANA.

#	Estação	a	R^2	IC (95%)	Mann-Kendall	Pettitt	Tendência
1	Alto Araguaia (MT) Rio Araguaia	+0,3910	0,5165	+0,2592/+0,5229	(+)(+)1974	(+)(+)1978	(+)(+)1978
2	Torixoréu (MT) Rio Araguaia	−0,2239	0,0148	−0,9298/+0,4821	(+)(+)1972	(?)	(?)
3	Tesouro (MT) Rio das Garças	−0,3700	0,0813	−0,8612/+0,1211	(+)(+)1972	(+)(+)1975	(+)(+)1975
4	Aragarças (GO) Rio Araguaia	−2,4219	0,4352	−3,4900/−1,3539	(+)(+)1972	(?)	(?)
5	B. das Garças (MT) Rio das Mortes	+0,5632	0,0494	−0,3417/+1,4682	(+)(+)1972	(+)(+)1976	(+)(+)1976
6	Araguaiana (MT) Rio Araguaia	−7,0506	0,6059	−9,7811/−4,3200	(?)	(?)	(?)
7	Aruanã (GO) Rio Araguaia	−0,9207	0,0413	−2,6045/+0,7630	(+)(+)1972	(?)	(?)
8	N. Xavantina (MT) Rio das Mortes	−0,2464	0,0094	−1,2900/+0,7970	(+)(+)1973	(+)(+)1977	(+)(+)1977
9	Cocalinho (MT) Rio das Mortes	+0,6690	0,0746	−0,4980/+1,8360	(?)	(?)	(?)
10	S.M. Araguaia (GO) Rio Araguaia	+8,9346	0,2677	+2,8479/+15,0213	(+)(+)2009	(+)(+)2005	(?)
11	N. S. Antônio (MT) Rio das Mortes	−2,7143	0,2260	−4,6220/−0,8065	(?)	(?)	(?)

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

12	Nova Crixás (GO) Rio Araguaia	–5,9861	0,6208	–8,2325/–3,7398	(?)	(?)	(?)
13	S. F. Araguaia (MT) Rio Araguaia	+1,6651	0,0082	–5,8791/+9,2093	(?)	(?)	(?)
14	C. do Araguaia (PA) Rio Araguaia	–31,2097	0,6733	–39,4667/– 22,9527	(?)	(?)	(?)
15	Xambioá (TO) Rio Araguaia	–14,0315	0,4451	–19,9814/–8,0816	(?)	(?)	(?)
16	Araguatins (TO) Rio Araguaia	–10,7962	0,4213	–16,1273/–5,4651	(?)	(?)	(?)
17	S. S. Tocantins (TO) Rio Tocantins	–24,1878	0,9472	–27,4585/– 20,9171	(–)(–)1986	(–)(–)1992	(?)
18	Peixe (TO) Rio Tocantins	–34,4056	0,9120	–38,4637/– 30,3476	(–)(–)1995	(–)(–)1995	(–)(–)1995
19	M. Tocantins (TO) Rio Tocantins	–42,2379	0,9061	–47,4029/– 37,0729	(–)(–)1998	(–)(–)1995	(–)(–)1995
20	Tupiratins (TO) Rio Tocantins	–41,3859	0,8891	–46,9381/– 35,8337	(–)(–)1994	(–)(–)1992	(–)(–)1992
21	Tocantinópolis (TO) Rio Tocantins	–28,8870	0,4362	–38,7476/– 19,0265	(–)(–)2006	(–)(–)1992	(?)
22	Descarreto (TO) Rio Tocantins	–58,0421	0,9152	–65,3207/– 50,7634	(–)(–)1990	(–)(–)1992	(–)(–)1992
23	S.B. Tocantins (TO) Rio Piranhas	+0,7157	0,3989	–0,2943/+1,7257	(+)(+)2004	(?)	(?)
24	Marabá–1 (PA) Rio Tocantins	+8,9765	0,7984	+7,2636/+10,6893	(–)(–)1987	(?)	(?)
25	Marabá–2 (PA) Rio Itacaiúnas	–52,5731	0,5827	–69,7955/– 35,3507	(+)(+)1985	(+)(+)1984	(+)(+)1984
26	Itupiranga (PA) Rio Tocantins	–31,4259	0,1165	–5,9081/+68,7600	(?)	(?)	(?)
27	Tucuruí (PA) Rio Tocantins	–71,1373	0,6725	–93,6673/– 48,6072	(–)(–)1983	(–)(–)1986	(–)(–)1986

Por meio de análises das formas gráficas dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt, além dos resultados expostos nas Tabelas 3 e 4, pode-se afirmar que há uma diversidade de informações relacionadas à tendência das variáveis hidro-climáticas. Por conta disso, decidiu-se elaborar mapas das distribuições das tendências nessa região hidrográfica, como será apresentado a seguir.

3.3. Distribuições das tendências hidro-climáticas

Mapas seqüenciais dos resultados encontrados por ocasião da aplicação dos testes não paramétricos nas séries temporais hidro-climáticas das localidades tratadas ao longo da região hidrográfica do Tocantins–Araguaia são apresentados na Figura 6. Cada mapa corresponde a uma determinada grandeza trabalhada no levantamento. Numa análise superficial desses mapas é possível identificar os locais onde se detectaram tendências crescentes e decrescentes nos níveis de significâncias avaliados (5% e 10%), segundo a legenda apresentada ao lado direito da Figura 6b.

A distribuição das tendências relacionadas à vazão média (*Vaz.*) está mostrada na Figura 6a revelando as 27 localidades avaliadas. Deste total, cinco (18,5%) registraram tendências (+)(+), dezessete (63,0%) não mostraram

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

evidência de tendências e outras cinco (18,5%) acusaram tendências (–)(–). Em nenhuma localidade foi detectada tendência positiva (+) ou negativa (–), isto é, com nível de significância acima de 10%. A mesma figura revela que as tendências positivas estão localizadas ao longo do rio Araguaia e afluentes, em particular ao sul da bacia em questão, nos estados de Mato Grosso e Goiás, sendo que essas ocorrências foram inferidas entre 1976 e 1978. Em contra partida, as tendências negativas estão distribuídas ao longo do rio Tocantins, exceto para a localidade paraense de Marabá (PA), que registrou tendência positiva. Verifica-se que no médio Tocantins as ocorrências de tendências negativas foram registradas entre 1992 e 1995.

As distribuições das tendências climáticas estão mostradas na sequência da Figura 6 para as 18 cidades abordadas no levantamento. O mapa da Figura 6b revela a distribuição dos índices pluviométricos (*Prec.*) na referida bacia. Detectaram-se tendências em duas cidades (11,1%): Imperatriz (MA), com significância acima de 10% (+) e Brasília (DF), com tendência negativa (–) também acima de 10%. Os outros 25 municípios da região estudada neste levantamento não registraram quaisquer indícios de tendências nos índices de chuvas.

Quanto às medidas das temperaturas, verifica-se que a *T-Mín.* (Figura 6c) possuí sete locais (38,9%) com evidências de tendência positiva com significância (+)(+) e nos onze postos de medições restantes não acusaram tendência significativa. No entanto, quase todas as tendências detectadas localizam-se nas estações medidoras instaladas ao longo do rio Tocantins e seus afluentes, exceto em Aragarças (GO) que se localiza às margens do rio Araguaia.

Os mapas das Figuras 6d e 6e, respectivamente para as *T-Méd.* e *T-Máx.*, revelam que ao longo da bacia hidrográfica os comportamentos dessas grandezas são semelhantes ao da *T-Mín.*, visto que as tendências inferidas estão distribuídas principalmente ao longo do rio Tocantins. No caso da *T-Méd.* foram detectadas oito cidades (44,4%) com aumentos de nível (+)(+), enquanto que para a *T-Máx.* foram encontradas seis cidades (33,3%) que acusaram aumento desse parâmetro também com nível (+)(+).

Ainda quanto aos dados de temperaturas tratadas neste levantamento, ao longo do rio Araguaia e seus afluentes, em que pese haver apenas três estações medidoras, quase não se registrou tendências. No entanto, para as informações trabalhadas no rio Tocantins e seus afluentes as situações foram bem diferentes, pois se registraram tendências positivas no percurso desse sistema hidrográfico.

Uma possível explicação para o comportamento das tendências detectadas nas temperaturas parece estar relacionada às características geográficas da região. Ao analisar as Figuras 6c, 6d e 6e, percebe-se que nas subdivisões hidrográficas alto Tocantins e Araguaia prevalece o bioma Cerrado,

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

justamente onde foram detectadas a maioria das tendências positivas nas temperaturas. No entanto, na subdivisão baixo Tocantins, onde domina o bioma Amazônia, além do ecótono Amazônia-Cerrado, situado ao sul do baixo Tocantins, ao norte do Tocantins e a noroeste e norte do Araguaia, também foram identificadas tendências positivas, porém em menor número, como se discutiu anteriormente.

No que tange às medidas hidrológicas para os índices de vazão média na bacia em estudo, a distribuição de tendências inferidas revela-se diferente das medidas climáticas, no entanto, sob alguns aspectos, parecem estar em sintonia. Uma análise comparativa dos mapas de temperaturas (Figuras 6c, 6d e 6e) com o de vazão (Figura 6a) possibilita constatar que: a) no bioma Cerrado e ao sul do Araguaia, onde detectaram-se ausências de tendências nas temperaturas, identificaram-se a maioria das tendências positivas nos índices de vazão; b) no bioma Amazônia, no ecótono Amazônia-Cerrado, além da porção norte do bioma Cerrado, por onde percorre o rio Tocantins, identificou-se tendências positivas nas temperaturas, entretanto, foi exatamente nestas áreas que detectaram-se tendências negativas na vazão daquele rio e seus afluentes; c) nenhuma relação parece existir entre a precipitação pluviométrica com as temperaturas e as medidas hidrológicas. Desta forma, presume-se que hajam correlações diferenciadas entre as tendências registradas nas temperaturas com as das vazões nos rios envolvidos nas áreas dessa região hidrográficas.

Tendo em vista a grande disponibilidade de recursos naturais na região, de certa forma, o mesmo favoreceu a não esgotabilidade hídrica, refletindo nas práticas de uso e ocupação do solo, muitas vezes de forma equivocada. Essas maneiras desordenadas de manejo e gestão dos recursos naturais constituem um traço representativo da cultura dessa região, o que fatalmente se tornará em recursos insustentáveis a médio e longo prazo. Neste sentido, é imprescindível realizar estudos hidrográficos que contemple as diferentes alternativas que a região oferece, tratando de conciliar o uso dos recursos naturais com suas aptidões e dentro de limites ambientalmente sustentáveis.

Como quase 9,6% do total da potência hidráulica instalada no Brasil estão na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia (MMA, 2006), vale lembrar que o potencial desta região é limitado principalmente pelas crescentes restrições climáticas, ambientais e da biodiversidade. No que tange ao potencial hidroelétrico total da região, destaca-se, em ordem de importância, as sub-bacias dos rios Tocantins, Araguaia, Paranã, Sono e Itacaiúnas. Quanto à geração de energia, o grande potencial hidroelétrico e sua localização frente aos mercados consumidores da Região Nordeste, colocam a região hidrográfica do Tocantins–Araguaia como prioritária para a implantação de aproveitamentos hidrelétricos. Por conta disso, destacam-se a usina de Tucuruí, localizada no baixo Tocantins, e as usinas Serra da Mesa, Cana Brava e Luís Eduardo Magalhães (Lajeado), localizadas no alto Tocantins.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

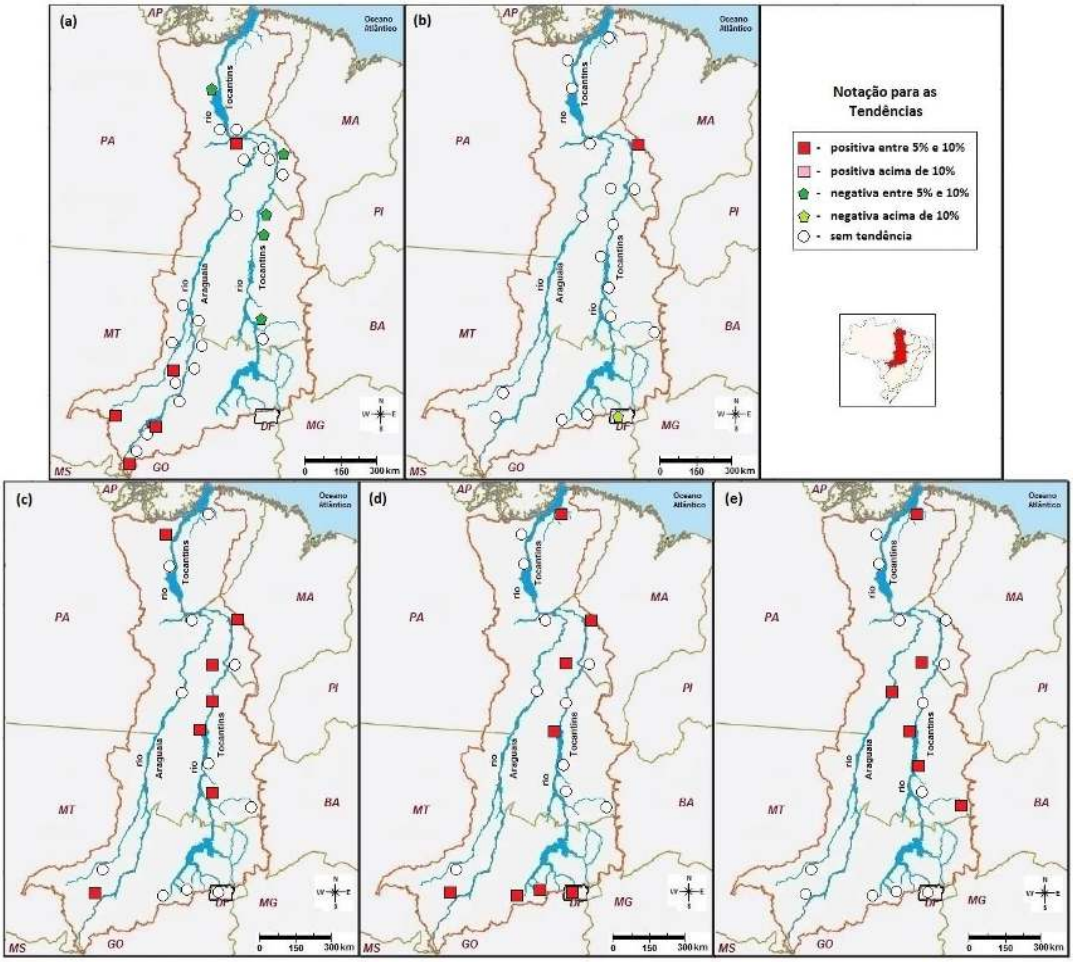

Figura 6:– Mapas das tendências hidro-climáticas na região hidrográfica do Tocantins–Araguaia para: *(a)* Vaz.; *(b)* Prec.; *(c)* T-Mín.; *(d)* T-Méd. e *(e)* T-Máx.

Dessas, somente a usina de Tucuruí tem a capacidade hidrelétrica instalada que representa 16% do total nacional em operação, sendo responsável pelo abastecimento de energia elétrica de 96% do Estado do Pará e 99% do Maranhão (ANA, 2013a). A construção do reservatório de Tucuruí foi entre 1976 e 1984, sendo que a inauguração da usina ocorreu em 22 de novembro de 1984. A barragem que a compõem é de terra e possui 11 km de comprimento por 78 m de altura, represando uma área de 2.850 km^2 quando cheio. A vazão média do rio ao longo do ano é da ordem de 11.000 m^3/s. Como anteriormente comentado, a usina está ligada ao Sistema Norte/Nordeste, um dos três que compõem o Sistema Interligado Nacional - SIN (EPE, 2014) de energia elétrica, que corresponde aos mercados da região do baixo Tocantins, Belém, Tucuruí, Altamira, Itaituba e Santarém, no Pará, e toda a Região Nordeste do Brasil.

Examinando em detalhes o mapa da Figura 6a, assim como as medições contidas na Tabela 4, pode-se identificar algumas ocorrências de locais sem tendência ou com tendência negativa, entre 1992 e 1995, no índice de vazão ao longo do rio desde a nascente até a Barragem de Tucuruí. Exceção feita aos

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

dados medidos no rio Itacaiúnas, próximo a Marabá (PA), que acusou tendência positiva (+)(+) a partir de 1984. Logo após essa barragem, registrou-se tendência negativa (–)(–) a partir de 1986. Certamente, esses resultados não são meras coincidências e requerem uma avaliação mais aprofundada das suas causas. Em princípio, pode-se conjecturar que sejam reflexos da influência da referida barragem sobre o fluxo d'água naquela região hidrográfica.

A usina hidroelétrica de Tucuruí teve a conclusão das obras e o enchimento do reservatório a partir de 1984. Em novembro de 1984 entrou em operação as duas primeiras turbinas da usina e, após oito anos, o reservatório de Tucuruí consolidou a primeira fase da concepção inicial, que eram de doze turbinas operantes. Por meio dessas datas, julga-se que o referido reservatório tenha alterado com o tempo os índices de vazão, culminando em maiores e menores valores dessa grandeza antes e após o reservatório ter sido efetivamente formado, respectivamente. Esse decréscimo na vazão fez-se sentir a partir de 1986, como revelam as quebras de tendências estatísticas nas localidades avaliadas e mostradas na Tabela 4 e Figura 6a.

Por meio dos dados técnicos extraídos neste levantamento, apresentados nas Tabelas 3 e 4 e nos mapas da Figura 6, pressume-se também que o clima regional ao longo da bacia Tocantins–Araguaia tenha se alterado com o tempo, culminando em maiores índices de temperaturas a partir do meados da década de 1990. Essas alterações parecem não ter acarretado mudanças nos índices de *Prec.* , mas devem ter influenciado a *Vaz.*, visto que para esse último parâmetro foram identificadas localidades que acusaram tendências em conssonância com as séries de *T-Mín.*, *T-Méd.* e *T-Máx*. aqui tratadas.

Pelos resultados apresentados acima, ainda é difícil fechar um quadro conclusivo do quanto as mudanças antropogênicas têm influenciado no clima dessa região hidrográfica do Brasil. Além disso, as dificuldades de se quantificar o papel de cada agente hidro-climático se deve à deficiência de uma rede coerente de estações medidoras, além da quase ausência de entendimento dos processos climáticos complexos e das limitações ainda impostas pelos modelos hidro-climáticos 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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados produzidos neste trabalho mostraram que as análises exploratórias realizadas para as séries temporais anuais dos parâmetros hidro-climáticos ao longo da bacia do Tocantins–Araguaia agregaram informações

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

relevantes, em particular para estudos de planejamento ambiental e operações de sistemas hidroelétricos. Os resultados indicaram que:

- Em geral, as séries de *Prec.* não apresentaram tendências significativas. Apenas duas cidades acusaram ocorrências pouco significativas, sendo de aumento em Imperatriz (MA), com o nível (+) a partir de 1983, e de diminuição em Brasília (DF), com o nível (–) desde 1971.

- Em várias cidades foram identificadas mudanças no comportamento dos três índices de temperaturas (*T-Mín.*, *T-Méd.*, e *T-Máx.*), ocorrendo durante entre o final da década de 1980 até o início da década de 2000. Em todas as ocorrências foram registrados aumento dessas grandezas climáticas, estando localizadas principalmente ao longo do rio Tocantins e seus afluentes.

- Das 27 estações medidoras da ANA, dez acusaram tendências significativas nos índices de *Vaz.*. Cinco tendências foram positivas de nível (+)(+), sendo que quatro delas estão localizadas no alto Araguaia e apenas uma, Marabá, que encontra-se no rio Itacaiúnas. As outras cinco tendências, todas negativas de nível (–)(–), distribuíram-se ao longo do rio Tocantins.

Em suma, analisando os resultados estatísticos encontrados por meio das análises exploratórias dos dados nos períodos abordados, conclui-se que, em termos gerais, uma possível tendência de aumento das temperaturas anuais na região da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia. Esses aumentos térmicos devem ter afetado os índices de vazão, em particular no rio Tocantins desde a nascente até a Barragem de Tucuruí.

Os resultados aqui apresentados alertam para o cuidado que se deve ter ao apontar as possíveis causas de mudanças observadas nas séries, tendo em vista a complexidade em associar essas alterações com as variações naturais do clima e as influências antropogênicas. Em que pese todas as incertezas associadas às mudanças climáticas e, consequentemente, aos impactos dessas possíveis alterações nas séries hidro-climáticas, como apresentado e discutido anteriormente, estudos nessa linha de atuação são relevantes e oportunos para auxiliar gestores de recursos hídricos e energéticos no cenário atual sobre o comportamento do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adam, K.N.; Collischonn, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. 2013. Disponível em: <www.arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto/index.html> Acessado em: 10/09/2014.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas, HidroWeb**. 2014. Disponível em: <www.hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em: 09/06/2014.

Back, A.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

Blain, G.C. Seasonal variability of maximum daily rainfall in Campinas, State of São Paulo, Brazil: trends, periodicities, and associated probabilities. **Acta Scientiarum**, v. 35, n. 3, p. 557-564, 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Programa de Expansão de Transmissão**. 2014. Disponível em: <www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>. Acessado em: 04/11/2014.

Freund, J.E. **Estatística aplicada: economia, administração e contabilidade**. 11a. edição. Porto Alegre: Editora Bookman, 612 p., 2006.

Groppo, J.D.; Moraes, J.M.; Beduschi, C.E.; Martinelli, L.A. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. **Geociências**, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Acessado em: 02/10/2014.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados para Pesquisa e Ensino – BDMEP**. 2014. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acessado em: 07/05/2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change 2014: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Field, C.B., *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1-32, 2014. Disponível em: <www.ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WG2AR5_SPM_FINAL.pdf>. Acessado em: 15/08/2014.

Karl, T.R.; Diaz, H.F.; Kukla, G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. **Journal of Climate**, v. 1, n. 11, p. 1099-1123, 1988.

Marengo, J.A. **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**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. 2ª. edição. Brasília: MMA, v. 26, 212 p., 2007.

Marengo, J.A.; Tomasella, J.; Nobre, C.A. Mudanças climáticas e recursos hídricos. In: **Águas do Brasil: análises estratégicas**. Bicudo, C.E.de M.; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B. (eds.). Capítulo 12, 224p., 2010. Disponível em: <www.abc.org.br/rubrique.php3?id_rubrique=150>. Acessado em: 08/08/2014.

Meehl, G.A.; Stocker, T.F.; Collins, W.D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A.T.; Gregory, M.; Kitoh, A.; Knutti, R.; Murphy, J.M.; Noda, A.; Raper, S.C.B.; Watterson, I.G.; Weaver, A.J.; Zhao, Z.C. Global Climate Projections. In: **Climate change 2007: the physical science basis**. Solomon, S., *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 749-844, 2007.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 132 p., 2006.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Controle e Prevenção do Desmatamento**. 2014. Disponível em: <www.mma.gov.br/florestas/controle-e-prevenção-do-desmatamento>. Acessado em: 09/10/2014.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)
Penereiro, J.C.; Orlando, D.V. Análises de tendência 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, p. 5-21, 2013.

Pettitt, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

Pinheiro, A.; Graciano, R.L.G.; Severo, D.L. Tendência das series temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

Sansigolo, C.A.; Nery, J.T. Distribuição de extremos de temperatura mínima no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 247-253, 2000.

Sello, S. Time series forecasting: A nonlinear dynamics approach. **Los Alamos National Laboratories**. 1999. Disponível em: <www.arxiv.org/abs/physics/9906035>. Acessado em: 17/06/2014.

Sneyers, R. Sur l´analyse statistique dês séries d´observations. **Organisation Météorologique Mondial**, 192 p., 1975.

Toledo, K. Quinto relatório do IPCC mostra intensificação das mudanças climáticas. **Agência FAPESP**. 2013. Disponível em: <www.agencia.fapesp.br/17944>. Acessado em: 30/09/2013.

Texto submetido à RBClima em 05/12/2014