



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO NA MICRORREGIÃO DO ALTO SERTÃO PARAIBANO

*Paulo Ricardo Cavalcante de Lima¹
Amanda Ribeiro de Andrade¹
João Vítor Pequeno de Oliveira¹
Daisy Beserra Lucena²

IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO NA MICRORREGIÃO DO ALTO SERTÃO PARAIBANO

Recibido el 27 de febrero de 2018; Aceptado el 11 de enero de 2019

Abstract

The development of the semi-arid region of Northeast Brazil (NEB) is strongly dependent on rainfall, and its variations cause economic and social losses to the population, such as the difficulty of maintaining subsistence agricultural activities or even meeting the demand for human supply. This research aims to investigate the circumstantial changes in the distribution of precipitation in the Alto Sertão Paraibano, from the exploration of the characteristics of the pluviometric time series. For the identification of trends in precipitation time series, daily data from 20 years (1996 to 2015) of 15 pluviometric stations of the Executive Water Management Agency of the State of Paraíba were used, applying the non-parametric methods of Mann-Kendall and Pettitt and the parametric method of Linear Regression. It was possible to notice that the rainy season of the microregion corresponds to the months of February to May, being responsible for more than 70% of the total annual precipitation, having an oscillation consistent with the average distribution of annual precipitation. The trend identification methods proved to be efficient and comprehensively applied to analyzes of rainfall time series. The analysis of annual precipitation and the rainy season, although with signs of trends, did not become significant. In turn, the dry season shows a negative trend in the first decade, but with no evidence of a recent trend.

Keywords: trend, Least Squares, Mann-Kendall, Pettitt, daily rain.

¹ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

² Departamento de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, s/n, Castelo Branco III, João Pessoa/PB, CEP: 58051-085, Brasil. Email: paulo.ricardo.c.lima@gmail.com

Resumo

O desenvolvimento da região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB) é fortemente dependente da precipitação pluviométrica, e as suas variações provocam prejuízos econômicos e sociais à população, como a dificuldade de manter atividades agrícolas de subsistência, ou mesmo, atender a demanda de abastecimento humano. O trabalho tem como objetivo investigar as mudanças circunstanciais na distribuição da precipitação no Alto Sertão Paraibano, a partir da exploração das características da série temporal pluviométrica. Para a identificação de tendências em séries temporais de precipitação, utilizaram-se dados diários de 20 anos (1996 a 2015) de 15 estações pluviométricas da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, aplicando os métodos não-paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt e o método paramétrico da Regressão Linear. Pôde-se perceber que a quadra chuvosa da microrregião corresponde aos meses de fevereiro a maio, sendo responsável por mais de 70% do total da precipitação anual, possuindo uma oscilação condizente com a distribuição média da precipitação anual. Os métodos de identificação de tendências apresentaram-se eficientes e de compreensível aplicação a análises de séries temporais de pluviosidade. A análise de precipitação anual e da quadra chuvosa, ainda que com indícios de tendências, não se tornaram significantes. Por sua vez, a quadra seca mostra uma tendência negativa na primeira década, porém sem indícios de tendência recente.

Palavras chave: tendência, Mínimos Quadrados, Mann-Kendall, Pettitt, Chuva diária.

Introdução

A região Nordeste do Brasil é periodicamente afetada pela ocorrência de secas com perdas parciais ou totais na agropecuária, além de comprometer o abastecimento de água devido, principalmente, à irregularidade da estação chuvosa na região, com predominância de chuvas intensas e de curta duração (Silva *et al.*, 1998). Isso se agrava na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB) tornando-a fortemente dependente da precipitação pluviométrica para o seu desenvolvimento, e, conseqüentemente, as suas variações provocam prejuízos econômicos e sociais à toda população.

A intermitência pluviométrica afeta fortemente a produtividade agrícola e criação de animais, ambas praticadas com características de subsistência na microrregião do Alto Sertão Paraibano, foco deste estudo. A subsistência é facilmente associada a uma população mais vulnerável diante de perda de produção, justificando ainda mais o interesse para essa questão nessa região, que ainda, segundo Araújo *et al.*, (2003), está no estado do Nordeste com uma das maiores variabilidades espaciais das chuvas. Dito isso, o conhecimento da dinâmica da precipitação local, de sua variabilidade e os impactos nas diversas atividades, é de extrema importância.

Percebe-se assim que, o estudo das anomalias, variabilidades, mudanças de variáveis meteorológicas, principalmente precipitação e temperatura é de grande interesse por parte dos pesquisadores, tomadores de decisões e sociedade em geral para mitigar os efeitos que, por ventura, venham a se concretizar em relação a previsão para o semiárido nordestino de tornar-se região árida, afetando a agricultura de subsistência, disponibilidade de água e saúde da população (Marengo, 2008).

O tratamento estatístico de variáveis meteorológicas ao longo do tempo, como forma para estudar os fenômenos atmosféricos, determinando seus padrões, variabilidades, mudanças, dentre outros é um instrumento de grande interesse para o planejamento e gestão de diversas atividades agrícolas, agropecuárias, hídricas e humanas (Baptista da Silva *et al.*, 2005).

Principalmente na última década, em que uma das grandes preocupações da população em geral diz respeito às alterações climáticas, algumas perceptíveis, e suas consequências para a humanidade e principalmente no que se refere a um possível aumento ou redução de eventos de precipitação (Back, 2001). Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) mostram os possíveis efeitos do aquecimento global sobre as condições climáticas e suas consequências ambientais. Na região semiárida brasileira, estão previstos aumento da temperatura e alterações no regime de chuvas, com incidência de secas prolongadas e redução no volume de chuvas (Gitay *et al.*, 2002). Na região nordestina, o semiárido sofre bastante os efeitos, consequências, relacionados com a alta variabilidade da precipitação. Apesar, da região exibir um grande potencial à agricultura irrigada pois dispõe de muitos reservatórios de captação (Sousa, 2009).

Diante do exposto, a identificação de alterações em elementos climáticos é de grande importância para valia, e, em geral, a análise da tendência de séries históricas de precipitação é uma das maneiras de se determinar a ocorrência de mudança climática local, possibilitando a avaliação de suas consequências sobre as bacias hidrográficas, culturas, agropecuária e, conseqüentemente, sobre a sociedade.

Diferentes técnicas vêm sendo utilizadas para diagnosticar tendências e/ou variações em séries temporais de dados hidrometeorológicos, especialmente temperatura e precipitação, que são os principais parâmetros envolvidos nas variações climáticas, e o interesse por técnicas estatísticas tem aumentado consideravelmente. Entre inúmeras técnicas, pode-se mencionar o teste estatístico de Mann-Kendall (Haylock *et al.*, 2006), recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o teste de Pettitt, frequentemente realizado em combinação com Mann-Kendall (Penereiro e Orlando, 2013; Sansigolo e Nery, 2000) e o teste dos mínimos quadrados, que pode indicar alterações climáticas (Back e Vieira, 2009).

Trabalhos como os de Santos (2015), Tavares (2015), Lopes e Silva (2013), Sena e Lucena (2013), Penereiro *et al.*, (2012), Silva *et al.*, (2011), Santos (2008), Silva e Azevedo (2008) e Penereiro e Orlando (2000) analisaram as tendências de precipitação em diversos estados e municípios inseridos na região nordeste, utilizando diversos métodos, entre eles o de Mann-kendall, Pettitt e de regressão linear, e identificam diferentes dinâmicas no comportamento de chuvas, além de verificar a existência ou ausência de tendência e se a mesma apresenta-se significativa. Entretanto Back (2001) comenta que a dificuldade no estabelecimento de existência de tendência está na grande variabilidade natural dos dados meteorológicos.

Dessa forma, o trabalho tem como objetivo investigar as mudanças circunstanciais na distribuição da precipitação no Alto Sertão Paraibano, a partir da exploração das características da série temporal pluviométrica, identificando tendências desta série, visando enriquecer a fundamentação para a tomada de decisões por parte da gestão pública das cidades da região e favorecer o desenvolvimento socioeconômico da população da microrregião.

Metodologia

Caracterização da área de estudo

O Estado da Paraíba está situado no Nordeste Brasileiro, entre os paralelos de 6°02'12''S e 8°19'18''S, e meridianos de 34°45'54''W e 38°45'45''W, limitando-se ao norte pelo estado do Rio Grande do Norte, ao sul pelo estado de Pernambuco, a leste pelo Oceano Atlântico e a oeste pelo estado do Ceará. Possui um território de 56468.55 km², dos quais 21.35%, ou seja, 12056.27 km², pertence à microrregião do Alto Sertão Paraibano. Segundo Alves *et al.*, (2009), cerca de 97% do estado encontra-se na delimitação conhecida como Polígono das Secas, no qual localiza-se toda a área alvo deste estudo. A microrregião do Alto Sertão é formada por 39 municípios (Figura 1) e apresenta população de 440164 habitantes, com densidade demográfica de 1440.6 hab/km² (IBGE, 2010).

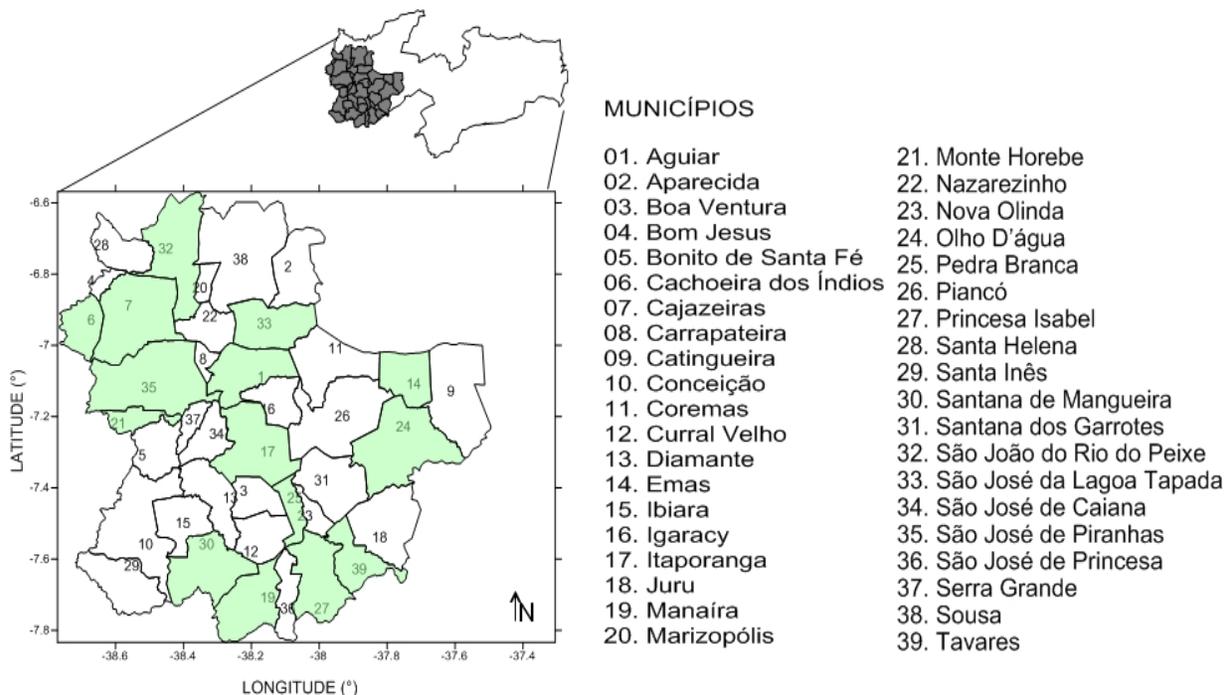


Figura 1. Distribuição espacial dos municípios pertencentes à microrregião do Alto Sertão Paraibano. Os municípios destacados na cor verde clara são os selecionados para a análise. Fonte: Elaboração própria.

Francisco *et al.*, (2016) descreve as características do Alto Sertão da Paraíba: encontra-se inserido na região semiárida brasileira, com altitude entre 400 a 700 m, apresentando relevo variando de plano a ondulado e montanhoso, temperatura geralmente entre 21 e 32°C, precipitação em torno de 700 a 900 mm. O sistema de classificação climática de Koppen-Geiger (1981) descreve o clima como tropical quente e úmido, com precipitação anual superior à evaporação potencial e concentrada no verão e outono (Aw'), com solo formado praticamente de argila de atividade alta e a vegetação composta por caatinga hiper e hipoxerófila.

Silva e Lucena (2015) apontam que precipitação média anual para o Alto Sertão é de 857.06 mm com desvio de 295.42 mm. A microrregião apresenta claramente duas estações definidas, das quais a estação não-chuvosa compreende os meses de agosto a novembro e o período chuvoso concentra-se nos meses de janeiro a abril, apresentando precipitação que corresponde a 58.15% da precipitação anual. A distribuição espacial das chuvas para a microrregião varia de oeste a leste, com maior concentração na porção oeste no período de chuvas, e no período seco, se tornam melhores distribuídas com uma pequena concentração pluviométrica no centro da região.

Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram valores de precipitação obtidos através da base de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), valores diários de chuva para o período de 1979 a 2016 para os 39 municípios. Contudo, grande parte dos postos pluviométricos apresentam falhas na série de dados, alguns com mais de um ano consecutivo, o que acarretaria no acúmulo de erros na análise da tendência, caso fosse realizado o preenchimento de dados por técnicas específicas. Portanto, depois de uma análise de consistência, selecionou-se o período de 1996 a 2015, contabilizando um total de vinte anos, devido a disponibilidade de dados contínuos para a região.

É necessário destacar que a Organização Meteorológica Mundial (OMS) recomenda que estudos de comparação e identificação de mudanças climáticas sejam realizados em séries de dados meteorológicos de, no mínimo, 30 anos. Contudo, há um recorrente problema no que se refere a obtenção de dados meteorológicos no Brasil, a ausência de dados confiáveis, ininterruptos, e de longo prazo. Entretanto, mediante a necessidade de estudos deste tipo, autores como Santos *et al.*, (2019), Penereiro e Orlando (2013), realizaram trabalhos para diversas áreas do país a fim de verificar indicativos de tendência climática nestas regiões, utilizando, para tanto, séries temporais menores que o recomendado. Acredita-se, portanto, que a análise realizada com pelo menos 20 anos permite indícios de possíveis alterações e análise da variabilidade climática.

Verifica-se na Figura 1, que a disposição dos postos pluviométricos escolhidos apresenta boa distribuição espacial na microrregião. A partir da série temporal diária da precipitação determinaram-se os totais mensais, os anuais, a média para o período, e foi aplicado técnicas de análise da tendência. Diante dos diversos métodos para identificação e análise de tendências em

dados de precipitação, foram escolhidos três testes: um paramétrico, a análise de regressão (método dos mínimos quadrados), cujo o entendimento de sua análise estatística é de fácil assimilação, e dois não-paramétricos, o teste de Mann-Kendall, proposto pela Organização Meteorológica Mundial para identificação da tendência em séries temporais, e o teste de Pettitt. Optou-se pela utilização de mais de uma técnica estatística para realizar uma comparação entre os resultados, o que os torna mais verídicos. Ambos os testes pressupõem a hipótese nula (H_0): ausência de tendência, e a hipótese alternativa (H_1): existe uma tendência.

Durbin-Watson (DW)

O teste de Mann-Kendall necessita que as variáveis em análises não sejam autocorrelacionadas (Bayazit e Önöz, 2007), portanto optou-se por utilizar o procedimento estatístico de Durbin-Watson para a detecção da ausência de autocorrelação (dependência) nas variáveis. O procedimento estatístico de Durbin-Watson baseia-se na medição da correlação do resíduo analisado com o resíduo imediatamente anterior a ele na série temporal. Quando os resíduos são positivamente autocorrelacionados com seus antecessores, o valor da estatística D (Equação 1) se aproxima de zero (Levine *et al.*, 2000). Quanto menos correlacionados forem os resíduos, o valor de D tende a 2. Nos casos raros em que o valor de D ultrapassa 2, podendo chegar até 4, os dados apresentam autocorrelação negativa.

$$D = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

Equação (1)

Ainda, segundo Bayazit e Önöz (2007), o obstáculo encontrado para a validação do modelo é a precisão do momento em que indica a existência da autocorrelação da série, pois a quantidade de variáveis independentes influenciará nos valores de D encontrados. Dessa forma, o teste de Durbin-Watson é acompanhado de uma tabela de valores de limites inferiores e superiores avaliados para o número de variáveis independentes, o número de observações e a significância estatística desejada. Os resultados do valor de D são analisados de acordo com a Figura 2.

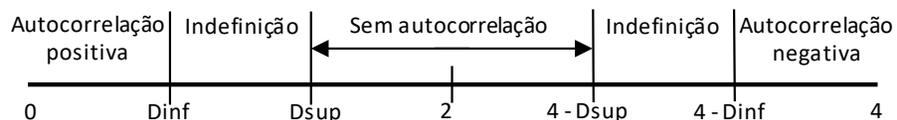


Figura 2. Gráfico de avaliação do teste de autocorrelação de variáveis de Durbin-Watson. Fonte: Elaboração própria.

Método dos mínimos quadrados

O método da análise de regressão linear é método paramétrico, pois exige o ajuste de dados empíricos/observados à uma distribuição teórica conhecida. Essa técnica é baseada no método dos mínimos quadrados, que consiste no ajuste de uma reta a um conjunto de pontos. Para

caracterizar objetivamente essa tendência temporal será traçada uma reta de regressão linear. A regressão linear é um modelo adequado para representar o comportamento de uma variável dependente (y), aqui a precipitação, em função de uma variável independente (x), os anos, se a relação entre elas é aproximadamente linear (Triola, 2005). Como resultado da regressão linear tem-se dois parâmetros: β que é o coeficiente angular da reta e α o coeficiente linear da reta. O coeficiente angular (β) define o grau de inclinação da reta. Ou seja, $\beta > 0$ significa que a reta tem uma inclinação positiva, y aumenta à medida que x aumenta. Quando $\beta < 0$, a inclinação da reta é negativa e y diminui à medida que x aumenta. Dessa forma, o coeficiente indicará se a tendência é crescente ou decrescente no decorrer do tempo.

Uma importante parte da verificação de adequação de um modelo de regressão linear é a aplicação de um teste estatístico que verifique a significância estatística da tendência, para isto utiliza-se a estatística t de Student. O teste de hipótese para a inclinação da reta, diz que se a hipótese nula ($\beta = 0$) não é rejeitada, a conclusão é que não há relação linear significativa entre as variáveis (Walpole *et al.*, 2010).

Mann-Kendal(MK)

É um teste não paramétrico que tem sido amplamente aplicado à detecção de tendências monotônicas em séries (ou seja, o teste não detecta se ocorre uma “mudança de direção” na tendência), sem especificar se tais tendências são lineares ou não lineares. De acordo com Önöz e Bayazit (2003) os benefícios deste teste são a irrelevância dos dados não pertencerem a uma distribuição particular e o resultado dele são menos afetados por outliers, pois o cálculo baseia-se no sinal das diferenças e não diretamente nos valores da variável. O teste MK consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial; é contado o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado. As equações descritivas destes testes são baseadas em Santos (2016). A estatística S_{MK} é obtida a partir da Equação 2:

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

Onde o valor do termo $\text{sinal}(x_i - x_j)$ deverá ser obtido da seguinte forma:

$$\text{sinal}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1, & \text{para } (x_i - x_j) < 0 \\ 0, & \text{para } (x_i - x_j) = 0 \\ 1, & \text{para } (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \quad \text{Equação (3)}$$

Para séries com um grande número de valores N (tamanho da série temporal), admitindo-se a hipótese nula (H_0), a estatística S_{MK} tende à normalidade:

$$E(S) = 0 \quad \text{Equação (4)}$$

$$\text{Var}(S) = 1/18 [n(n-1)(2n+5)]$$

Equação (5)

Quando o valor de S é um grande número positivo ou negativo, os valores posteriormente mensurados tendem a ser maiores ou menores, indicando uma correlação dos dados, e se o valor for um número pequeno, nenhuma tendência é indicada, ocasionando também o erro. Segundo Meals *et al.*, (2011), o teste τ de Mann-Kendall é análogo ao coeficiente de correlação das variáveis na regressão linear, e indica o quanto as variáveis são correlacionadas. A hipótese nula H_0 é rejeitada quando S e τ são significativamente diferentes de zero.

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

Equação (6)

No caso de H_0 rejeitada, o ângulo de mudança poderá ser calculado utilizando-se o método estimador da Curvatura de Sen: ($\beta = \text{mediana}(y_j - y_i / x_j - x_i)$). Este teste possibilita identificar se houve ou não mudança de tendência na série.

E dessa forma, o teste de Z_{MK} é dado por:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

Equação (7)

O teste de Mann-Kendall também é um método apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas e permite também a detecção aproximada do ponto inicial de determinada tendência (Back, 2001; Goossens e Berger, 1986) através das estatísticas $u(t)$ e $u'(t)$. O teste consiste em contar o número de vezes em que um dado em uma sequência é maior que os dados anteriores na mesma. Considerando uma série Y_i de N termos em que $1 \leq i \leq N$, o teste realiza a soma t_n da contagem m_i de quantos termos Y_{i-1} são menores que o termo Y_i em sequência:

$$t_n = \sum_{i=1}^N m_i$$

Equação (8)

Quando N é grande, sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência, t_n apresentará uma distribuição normal com média $E(t_n) = [N.(N-1)]/4n$ e variância $\text{var}(t_n) = [N.(N-1).(2N+5)]/72$ (Moraes *et al.*, 1995). Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística $u(t)$ dada por:

$$u(t) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{\text{var}(t_n)}}$$

Equação (9)

A estatística $u'(t)$ pode ser obtida aplicando-se o mesmo princípio ao inverso da série temporal. Segundo Back (2001), a tendência de uma série de dados apresenta-se significativa para o teste de Mann-Kendall quando os valores absolutos de $u(t)$ ultrapassam os limites de confiança (geralmente adotados a 5 e 10%), e seu início aproximado é determinado pela intersecção das curvas $u(t)$ e $u'(t)$, se a intersecção ocorrer dentro dos valores do intervalo de confiança.

Teste de Pettitt

Este teste localiza aproximadamente o ponto onde houve a mudança brusca na média da tendência temporal. O resultado do teste de Pettitt (Pettitt, 1979) mostra se duas amostras oriundas da mesma série temporal podem ser consideradas pertencentes a mesma população. Segundo Back (2001) esse método é uma versão do teste de homogeneidade de populações de Mann-Whitney (teste U). Trabalhos como os de Back (2001) e Mortatti *et al.* (2004) adotam o nível de significância de 5% para aplicação deste teste.

A estatística $U_{t,T}$ verifica o número de vezes que um elemento da primeira amostra é maior que um elemento da segunda. A estatística $U_{t,T}$ é estimada pela equação:

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_t - x_j); \text{ para } t=2, \dots, T \text{ e } 1 \leq t \leq T \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

A estatística $U_{t,T}$ é então calculada para os valores de $1 < t < T$, e a estatística $k(t)$ do teste de Pettitt se escreve:

$$k(t) = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad \text{Equação (11)}$$

Esta estatística localiza o ponto $p(t)$ onde houve uma mudança brusca na média de uma série temporal, e a sua significância pode ser calculada aproximadamente pela equação:

$$p(t) = 1 - \exp\left(-\frac{6k(t)^2}{T^3 + T^2}\right) \quad \text{Equação (12)}$$

O ponto de mudança brusca é o t (ano da série) onde ocorre o máximo de $k(t)$. Os valores críticos k_{crit} de $k(t)$ podem ser calculados pela equação:

$$k_{crit} = \pm \sqrt{\frac{-\ln\left(\frac{\alpha}{2}\right)(T^3 + T^2)}{6}} \quad \text{Equação (13)}$$

Resultados e discussão

Análise da tendência na precipitação interanual

A análise da distribuição da precipitação anual média para a região do Alto Sertão Paraibano (Figura 3) apresentou uma alta variabilidade, com os menores índices pluviométricos em 1998 e 2012. Alves (2016) observa que as reduções de precipitação no NEB estão fortemente atreladas ao fenômeno ENOS (El Niño Oscilação-Sul), sendo 1998 um dos anos onde o El Niño, aquecimento das águas do Pacífico, aconteceu com forte intensidade. De forma análoga, o evento La Niña, um resfriamento anormal das águas, é responsável pelo aumento das chuvas na região, como observado nos anos de nos anos de 2008 e 2009. Marengo *et al.*, 2016 explica que a redução das chuvas em 2012 não foi resultado do ENOS, mas ocorreu devido a um papel ativo da Alta Pressão, mais próxima do continente nos anos de 2011 e 2012, o que afetou negativamente o regime de chuvas em 2012, perdurando até 2015. Estes anos registraram uma redução de aproximadamente 50% das chuvas do que a média anual calculada para região, que é de 851.6 mm nos 20 anos em estudo.

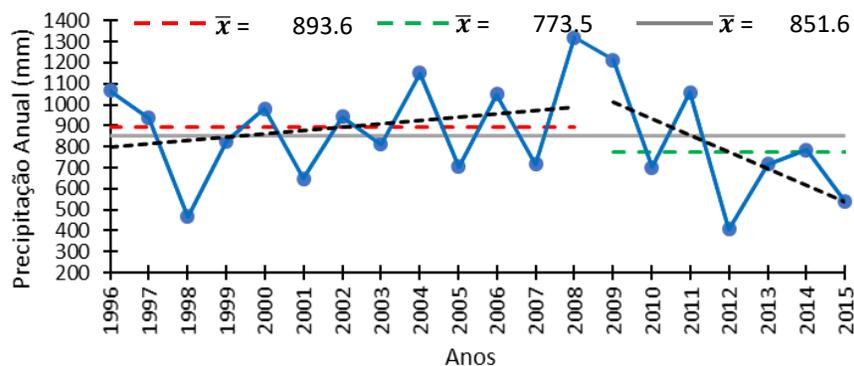


Figura 3. Precipitação anual média para a região do Alto Sertão Paraibano (1996-2015). Fonte: Elaboração própria.

Observando as precipitações anuais (Figura 3), pode ser observada uma disparidade maior no ano de 2008, uma descontinuidade. Assim, traçando-se uma reta linear simples, tem-se que, na situação dos anos anteriores a este, a média anual da precipitação era de 893.6 mm (em vermelho) e uma tendência linear positiva, e nos anos seguintes, uma diminuição para 773.5 mm (em verde), apresentando uma tendência linear negativa. Os valores encontrados para a média anual estão entre 700 e 900 mm, corroborando com Becker *et al.*, (2011) e Francisco *et al.*, (2015).

Para verificar se existe uma possível autocorrelação entre as variáveis precipitação e anos, foi realizado o teste de Durbin-Watson, o qual demonstrou que o valor da estatística $D = 2.19$ está entre os valores do limite $D_{sup} = 1.20$ e $4 - D_{sup} = 2.59$, para o intervalo de confiança de 95%, e

entre os limites $D_{sup} = 1.15$ e $4-D_{sup} = 2.85$, para o intervalo de confiança de 99%, ou seja, o teste estabelece que não existe autocorrelação entre os resíduos dos dados. Esse resultado era esperado, uma vez que a quantidade de precipitação ao longo do tempo não depende de uma data específica. Ademais, como explicado, esse é um pressuposto para aplicação do teste de Mann-Kendall, as séries necessitam ser independentes.

Os testes de Análise de Regressão Linear e de Mann-Kendall foram aplicados para afirmação da tendência observada na Figura 3, verificando a significância estatística. Os resultados da inclinação pelo método dos mínimos quadrados e inclinação de Sen, Tabela 1, apresentam valores negativos e bastantes próximos, indicando uma tendência negativa para a região, porém sem nenhuma significância estatística. O mesmo resultado foi encontrado utilizando Mann-Kendall, onde o valor da estatística S é negativo e, juntamente com o τ , indica decrescimento na tendência (redução das precipitações), porém a estatística Z não aponta significância estatística aos níveis de confiança. Inoportunamente, não foram encontrados na literatura trabalhos que analisaram, ou indicaram, tendência (positiva ou negativa) para a região do alto sertão paraibano.

Tabela 1. Resultados dos testes de Mann-Kendall e Análise de Regressão para a precipitação anual da região do Alto Sertão Paraibano (1996-2015).

Métodos Parâmetros	Teste de Mann Kendall			Inclinação Sen	Análise de Regressão		
	S	τ	Z		β	tc	t
Resultados	-24	-0.13	-0.75	-9.32	-7.22	-0.74	2.1009

Este primeiro conjunto de testes é usado para identificar a existência de uma tendência recente positiva ou negativa. Apesar de utilizar diferentes métodos, em geral os testes paramétricos e não paramétricos capturam a tendência da série de forma concisa. Entretanto, observa-se que a descontinuidade, ou “quebra”, pode ser confirmada pelas estatísticas $u(t)$ e $u'(t)$ de Mann-Kendall, bem como pela estatística $k(t)$ de Pettitt, os quais estimam o local da mudança brusca na série e se a série tornou-se significativa estatisticamente em algum ano.

Analisando a interseção das linhas $u(t)$ e $u'(t)$, é notada a mudança da tendência de precipitação a partir do ano 2009 (Figura 4), ano em que houve um evento máximo de precipitação, porém a série não apresentou tendência significativa para o período, ou seja, os valores de $u(t)$ não ultrapassam os limites de confiança. Há um segundo cruzamento das linhas entre os anos de 2012 e 2013 dentro do intervalo de confiabilidade, porém o teste de Pettitt não apresenta cruzamento da estatística $K(t)$ com os intervalos de confiança, portanto a ocorrência de tendência na precipitação não é comprovada.

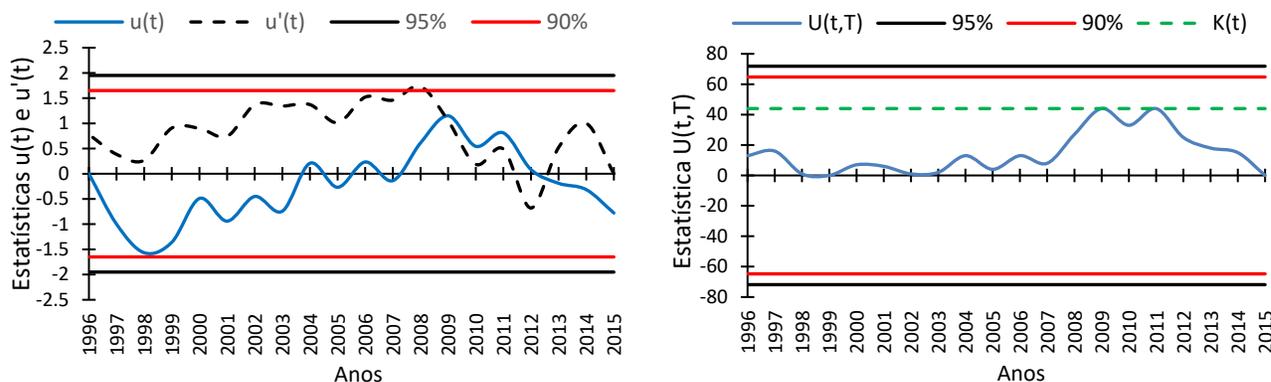


Figura 4. Estadísticas $u(t)$ e $u'(t)$ do teste de Mann-Kendall (à esquerda) e a estatística $U(t,T)$ do teste de Pettit (à direita) para a precipitação total anual. Fonte: Elaboração própria.

Análise da tendência na precipitação para os períodos chuvosos e secos

Segundo Silva *et al.*, (2004), a quadra chuvosa do Alto Sertão Paraibano é formada pelos meses de janeiro a abril. Isto é confirmado quando avaliados os dados de precipitação dos 15 municípios em análise (Figura 5), apresentando um total para o quadrimestre de 631.9 mm, o que corresponde a mais de 70% da precipitação anual, como observado por Silva *et al.*, (2012), mostrando a grande variabilidade e a concentração das chuvas em poucos meses do ano. Os quatro meses com menores volumes (quadra seca) são os de agosto a novembro, abrangendo apenas 4.8% da precipitação anual, com valores que não ultrapassam, em média, 40.8 mm.

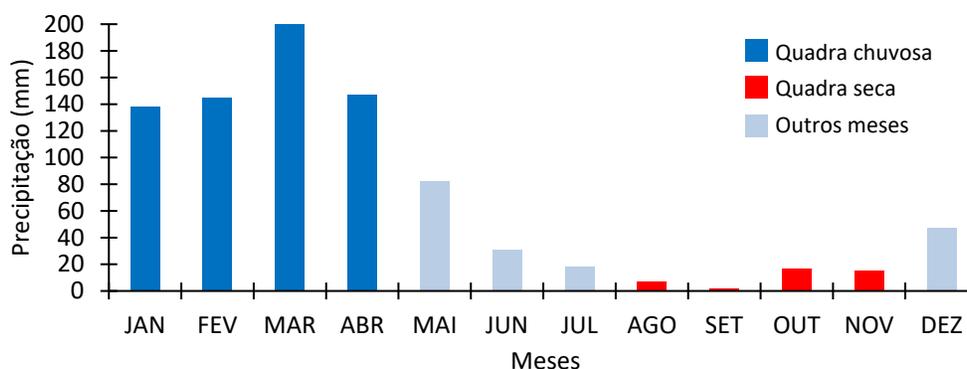


Figura 5. Distribuição da precipitação média mensal (1996 a 2015) para a microrregião do Alto Sertão. Fonte: Elaboração própria.

A análise da distribuição média do período chuvoso para o Alto Sertão assinala os eventos extremos de precipitação máxima em 2008 (75% acima da média do período chuvoso) e mínima

em 2012 (46% abaixo da média do período chuvoso). Observa-se na Figura 6 que a distribuição da precipitação no período chuvoso assemelha-se à distribuição da precipitação interanual, e isso se deve ao fato de que o período chuvoso corresponde a mais de 70% do volume anual de chuvas da microrregião.

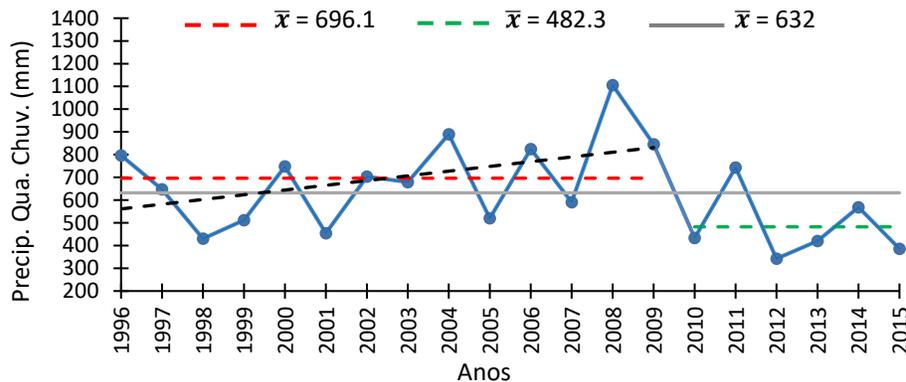


Figura 6. Distribuição média da precipitação para o período chuvoso da microrregião do Alto Sertão Paraibano no período de 1996 a 2015. Fonte: Elaboração própria.

A estação não-chuvosa (quadra seca) apresenta comportamento contrastante em relação a distribuição de precipitação da estação chuvosa, com média de precipitação cerca de 15 vezes menor que a dos primeiros quatro meses do ano. A distribuição para o período seco da série histórica de precipitação do Alto Sertão Paraibano pode ser visualizada na Figura 7.

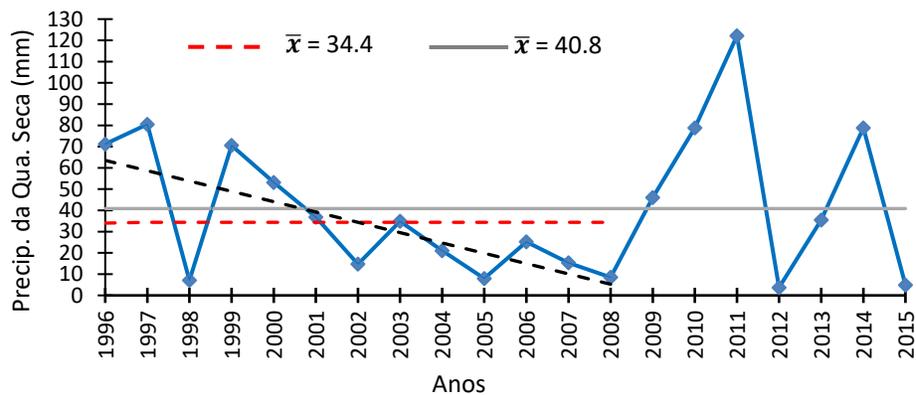


Figura 7. Distribuição média da precipitação para o período seco da microrregião do Alto Sertão Paraibano no período de 1996 a 2015. Fonte: Elaboração própria.

Observa-se uma tendência negativa no período de 1996 a 2008, porém o período seguinte apresenta variabilidade bastante irregular. Têm-se, nos anos de 2008 e 2009, discordâncias com os eventos máximos da série interanual, os quais apresentam valores bastante inferior e pouco acima da média, respectivamente. No ano de 2011 ocorreu o ápice do volume na estação não-chuvosa para a série, sendo outubro mês mais chuvoso desse ano (71% da estação não-chuvosa). Todavia, a estação não-chuvosa contribui com apenas 4.8% da precipitação anual da microrregião.

A Tabela 2 exhibe os coeficientes de declividade (inclinação) da regressão linear, correspondente à análise de tendência da precipitação da estação não-chuvosa e chuvosa para os 15 postos, como também o valor da inclinação obtida através do método de Sen. Os valores negativos da inclinação de Sen e do coeficiente angular do método dos mínimos quadrados, indicam decréscimo suave na linha de tendência para o período seco. Todavia, a estatística Z do teste de Mann-Kendall para as duas estações indica que essa tendência negativa é não significativa aos níveis 5% e 1% de confiança. O mesmo resultado é encontrado comparando-se os valores de t_c da análise de regressão, os quais são menores que o valor tabelado $t = 2.1009$.

Tabela 2. Resultados dos testes de Mann-Kendall e Análise de Regressão para as estações chuvosa e não-chuvosa da região do Alto Sertão Paraibano (1996-2015).

Métodos Parâmetros	Teste de Mann Kendall			Inclinação Sen	Análise de Regressão		
	S	τ	Z		β	t	t_c
Est. Chuvosa	-32	-0.17	-1.01	-9.16	-6.91	2.1009	-0.74
Est. Não-chuvosa	-26	-0.14	-0.81	-1.07	-0.38	2.1009	-0.05

Como esperado, observa-se que as formas gráficas da análise das estatísticas $u(t)$ e $u'(t)$ do teste de Mann-Kendall e a estatística $K(t)$ de Pettitt, para a precipitação no período chuvoso, tem características semelhantes às estatísticas da precipitação anual média. Nota-se (Figura 8) que no teste de Mann-Kendall há o início de uma tendência negativa indicada pelo cruzamento das linhas no ano de 2009, porém sem significância estatística, além do não cruzamento da estatística $k(t)$ do teste de Pettitt com os intervalos de confiança adotados, não havendo indícios de tendência na série de precipitação para o período chuvoso.

De modo análogo, as formas gráficas da Figura 9 apresentam as curvas das estatísticas para a estação não-chuvosa da microrregião. O teste de Mann-Kendall mostra que, na primeira década, houve um cruzamento das linhas $u(t)$ e $u'(t)$ indicando o início de uma tendência decrescente, que iniciou no ano de 1998 e tornou-se significativa a 90% entre os anos de 2001 e 2002 e a 95% no ano de 2004. Na segunda metade, porém, ainda que iniciada no ano de 2009, a tendência

crecente observada não se torna significativa. O teste da estatística $k(t)$ revela que no ano de 2001 houve uma mudança brusca na média da série, entretanto os valores máximos alcançados no teste de Pettitt não ultrapassam os limites de significância estatística.

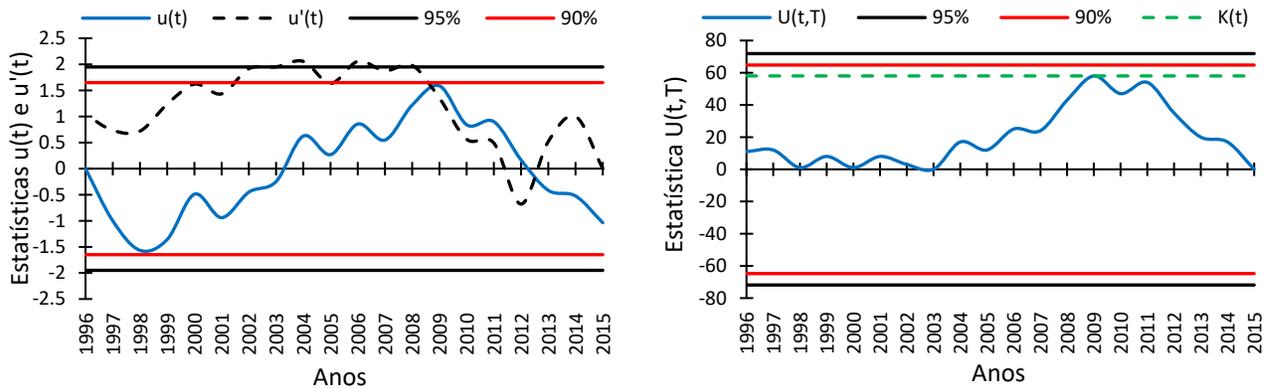


Figura 8. Estatísticas $u(t)$ e $u'(t)$ do teste de Mann-Kendall (à esquerda) e a estatística $K(t)$ do teste de Pettit (à direita) para a precipitação durante o período chuvoso. Fonte: Elaboração própria.

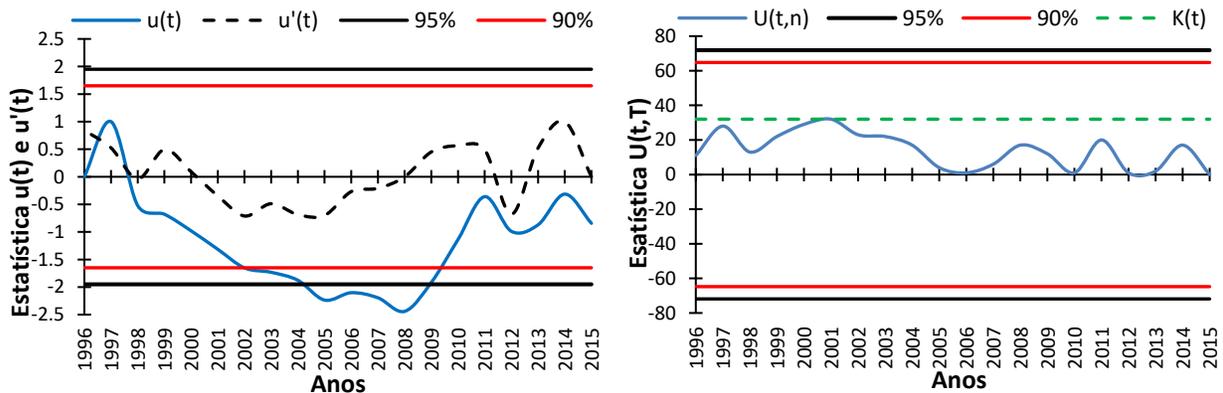


Figura 9. Estatísticas $u(t)$ e $u'(t)$ do teste de Mann-Kendall (à esquerda) e a estatística $K(t)$ do teste de Pettit (à direita) para a precipitação durante o período seco. Fonte: Elaboração própria.

Conclusão

A partir dos resultados e discussões observa-se que a microrregião do Alto Sertão Paraibano apresenta alta variabilidade de índices pluviométricos no período de 1996 a 2015, com média de 851.6 mm. Sua quadra chuvosa é composta pelos meses de fevereiro a maio, e é responsável por 74.2% do total de precipitação anual para a região, apresentando, portanto, um comportamento gráfico condizente com o da precipitação anual.

As análises para a série de precipitação anual e para o período chuvoso, ainda que com indícios de tendências crescentes ou decrescentes, aplicando os testes de Mann-Kendall e dos mínimos quadrados, não apresentaram tendências estatisticamente significantes e nenhuma mudança brusca na série. Já para a estação não-chuvosa (agosto a novembro) foi observado o surgimento de uma tendência significativa negativa na primeira década (1996 a 2006), constatada pelo teste de Mann-Kendall a 90 e 95% de confiança, porém não confirmada pelo teste de Pettitt.

Referências bibliográficas

- Alves, J. J. A., Souza E. N., Nascimento, S. S. (2009) Núcleos de desertificação no estado da Paraíba. *Revista RA'EGA*, **17**, 139-152.
- Alves, L. R. A (2016) *O impacto do El Niño sobre as precipitações de municípios do sertão paraibano*, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 46 pp.
- Back, A. J. (2001) Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **36**(5), 717-726.
- Back, A. J., Vieira, H. J. (2009) Alterações nas séries de dados de temperatura de Urussanga, *Simpósio Internacional de Climatologia*, **3**, Gramado, Rio Grande do Sul/Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Bayazit, M., Önöz, B. (2007) To prewhiten or not prewhiten in trend analysis? *Hydrological Science Journal*, Wallingford, **52**(4), 611-624.
- Becker, C. T, Melo, M. M. M. S, Costa, M. N. M, Ribeiro, R. E. P. (2011) Caracterização climática das regiões pluviométricamente homogêneas do Estado da Paraíba, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **4**(2), 286-299.
- Francisco, P. R. M, Medeiros, R. M, Santos, D. (2015) Oscilações pluviométricas dentre os regimes diferenciados de precipitação no Estado da Paraíba, *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, **9**(6), 360-371.
- Francisco, P. R. M, Santos, D, Lima, E. R. V, Brandão, Z. N, Neto, J. M. M. (2016) Potencial pedoclimático do Estado da Paraíba para a cultura do algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum*), *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], **9**(6), 2089-2013.
- Gitay, H, Suárez, A, Watson, R. T, Dokken, D. J. (2002) Climate change and biodiversity. [S.l.]: Intergovernment Panel on Climate Change, 86p. Acesso em 20 maio 2007, disponível em: <http://www.ipcc.ch/pub/tpbiodiv.pdf>
- Goossens, C.; Berger, A. (1986) Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae, Berlin*, **4**(B4), 385-400.
- Haylock, M. R, Peterson, T. C, Alves, L. M, Ambrizzi, T, Anunciação, Y. M. T, Baez, J., Barros, V. R, Berlato, M. A, Bidegain, M, Coronel, G, Garcia, V. J, Grimm, A. M, Karoly, D, Marengo, J. A, Marino, M. B, Moncunill, D. F, Nechet, D, Quintana, J, Rebello, E, Rusticucci, M, Santos, J. L, Trebejo, I, Vincent, L. A. (2006) Trends in total and extreme South American rainfall 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* **19**, 1490–1512.
- Köppen, W, Geiger, R. (1982) *Klimate der Erde. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes. n.p. 1928.*
- Ometto, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres Ltda., 413 pp.

- Levine, D. M, Berenson, M. L, Stephan, D. (2000) Estatística: teoria e aplicações (usando Microsoft Excel em português). Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos Editora S.A.
- Lopes, J. R. F, Silva, D. F. (2013) Aplicação do teste de mann-kendall para análise de tendência pluviométrica no estado do Ceará. *Revista de Geografia (UFPE)*, **30**(3), 192-208.
- Marengo, J. A, Cunha A. P. M. A, Alves, L. M. (2016) A Seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico, *Climanálise*, **3**(1), 1-6.
- Marengo, J. A. (2008) Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, **22**, 83-96.
- Meals D. W, Spooner J, Dressing S. A, Harcum J. B. (2011) Statistical analysis for monotonic trends, Tech Notes 6, November. U.S. Environmental Protection Agency, Tetra Tech, Inc., Fairfax, VA, 23 pp.
- Moraes, J. M., Pellegrino, G, Ballester, M. V, Martinelli, L. A, Victoria, R. L. (1995) Estudo preliminar da evolução temporal dos componentes do ciclo hidrológico da bacia do Rio Piracicaba, *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **11.**, *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, **2.**, Recife, Pernambuco, Brasil.
- Mortatti, J, Bortoletto Júnior, M. J, Milde, L. C. E. (2004) Probst, J-L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia, *Revista de Ciência & Tecnologia*, **12**(23), 55-67.
- Önöz, B, Bayazit, M. C. (2003) The Power of statistical teste for trend detection. *Turkish. J. Eng. Env. Sci.*, **27**, 247-251.
- Penereiro, J. C, Ferreira, D. H. L, Garcia, V. F. V. (2012) Caracterização Estatística de Tendências Climáticas em Séries Anuais de Temperatura Média e Precipitação para as Capitais Estaduais do Brasil, *Revista GEINTEC*, **3**(4), 01-15.
- Penereiro, J. C, Orlando, D. V. (2013) Análises de tendências em séries temporárias anuais de dados climáticos e hidrológicos na Bacia do Rio Paraíba entre os estados do Maranhão e Piauí/Brasil., *Revista Geográfica Acadêmica* **7**(2), 05-21.
- Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the changepoint problem. *Applied Statistics*, London, **28**(2), 126-135.
- Santos, D. N. (2008) *Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)*, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 84 pp.
- Santos, S. R. Q, Cunha, A. P. M. A, Ribeiro-Neto, G.G (2019) Avaliação de Dados de Precipitação para o Monitoramento do Padrão Espaço-Temporal da Seca no Nordeste do Brasil, *Revista Brasileira de Climatologia*, **15**(25), 80-100.
- Santos, V. O. (2015) Identificação e Análise de Tendências em Séries Históricas de Precipitação no Município de Uberlândia, Minas Gerais, *Xi - Encontro Nacional Da Anpege: A Diversidade da Geografia Brasileira: Escalas e Dimensões da Análise e da Ação de 9 A 12 de Outubro*. Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.
- Santos, V. O. (2016) *Identificação e Análise de Tendências das Variáveis Hidrológicas e Mudanças no Uso e Ocupação das Terras no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Uberaba, em Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, 129 pp.
- Sena, J. P. O, Lucena, D. B. (2013) Identificação de Tendência da Precipitação na Microrregião do Cariri Paraibano, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **6**, 1400-1416.
- Silva, G. B, Azevedo, P. V. (2008) Índices de tendências de mudanças climáticas no estado da Bahia. *Engenharia Ambiental Espírito Santo do Pinhal*, **5**(3), 141-151.
- Silva, J. B, Llopart, M. P, Boiaski, N. (2005) Temperatura máxima do ar em Pelotas, RS – Tabelas de probabilidade em escalas de tempo pentadal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, **20**, 267-276.
- Silva, V. P. R, Correia, A. A, Coelho, M. S. (1998) Análise de tendência das séries de precipitação pluvial do Nordeste do Brasil, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **2**(1), 111-114.
- Silva, V. P. R, Pereira, E. R. R, Azevedo, P. V, Sousa, F. A. S, Sousa, I. F. (2011) Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **15**(2), 131-138.
- Silva, V.C, Lucena, D.B. (2015) Análise da variabilidade e da influência de eventos climáticos sobre a precipitação no alto sertão da Paraíba, *XII Congresso de Iniciação Científica da UFCG*, Campina Grande, Paraíba, Brasil.



- Sousa, B. I. (2009) *Cariri Paraibano: do silêncio do lugar à desertificação*, Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198 pp.
- Tavares, A. N. (2015) *Avaliação da Aplicação dos Principais Testes de Detecção de Tendência em Dados Climatológicos nos Últimos Anos*, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Em Estatística), Fundação Universidade Federal De Rondônia, 29 pp.
- Triola, M. F. (2005) *Introdução a Estatística. 9ª Edição. Editora LTC*, Rio de Janeiro, **9**, 656 pp.
- Walpole, R. E, Myers, R. H, Myers, S. L, Ye, K. (2010) *Probabilidade & Estatística para engenharia e ciências. 8ª Edição. Editora Pearson*, São Paulo, 491 pp.