

REVISTA AIDIS

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

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS HIDROLÓGICAS EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA RURAL DA AMAZÔNIA

* Rodrigo Silvano Silva Rodrigues¹
Lindemberg Lima Fernandes¹
Francisco Carlos Lira Pessoa¹
Diêgo Lima Crispim¹
Bruna Roberta Pereira Lira¹

ANALYSIS OF HYDROLOGIC TIME SERIES IN A SMALL RURAL AMAZONIAN CATCHMENT

Recibido el 30 de mayo de 2018; Aceptado el 29 de marzo 2019

Abstract

This study verifies the hydrological relationships of homogeneity and tendency of rain, flow and water level, and the climatic variability of these precipitations in a Prata river basin, located in the municipality of Capitão Poço-PA. For precipitations, data from a historical series of 30 years were used. For flow rates and water levels data were used in the period from 1988 to 2005. The behavior of total precipitations, flows and average dimensions was analyzed by the method of the Pettitt homogeneity test and trend and magnitude test provided by Mann-Kendall and Sen's Tests and the correlation between the variables in the period of their simultaneous occurrences. The climatic phenomena El Niño and La Niña influence directly causing anomalies on the rainfall. In the Prata catchment, the flows and coasts simultaneously have the same behavior as a function of time, however, these variables have a weak correlation with precipitation. In general, no significant trends were observed in the behavior of rainfall and flow series. The average levels, in general, are not homogeneous and have positive trends that may be related to the dynamics of land use and land cover. The analysis of trends for rainfall in the basin of the Prata River is compatible with macro analyzes focused on the region.

Keywords: Pettitt, Mann-Kendall, Sen's, climatic phenomena.

¹ Universidade Federal do Pará, Brasil.

* Autor correspondente: Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Correa, 01 – Guamá, Belém, Pará, 66.075-110, Brasil. Email: rssr@ufpa.br

Resumo

Este estudo verifica as relações hidrológicas de homogeneidade e tendência de chuva, vazão e nível d'água, e a variabilidade climática destas precipitações, na bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, localizada no município de Capitão Poço/PA. Para precipitações foram utilizados dados mensais e anuais, no período de 1988 a 2017 (série histórica de 30 anos). Para vazões e níveis d'água foram utilizados dados mensais e anuais, no período de 1988 a 2005. Assim, verificou-se o comportamento de precipitações totais, vazões e cotas médias, por meio do teste de homogeneidade de Pettitt e análise de tendência e a magnitude pelos testes de Mann-Kendall e Sen's respectivamente e a correlação entre as variáveis no período de suas ocorrências simultâneas. Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña influenciam diretamente causando anomalias na precipitação pluviométrica. Na bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, vazões e cotas possuem simultaneamente o mesmo comportamento em função do tempo, porém, estas variáveis têm fraca correlação com a precipitação. De modo geral, não foram verificadas tendências significativas no comportamento das séries de chuvas e vazões. As cotas médias, em geral, não são homogêneas e possuem tendências positivas que podem estar relacionadas à dinâmica de uso e cobertura do solo. A análise de tendências para precipitações na bacia hidrográfica do Igarapé da Prata é compatível com macro análises voltadas para a região.

Palavras chave: Pettitt, Mann-Kendall, Sen's, fenômenos climáticos.

Introdução

A detecção de tendências na qualidade hidrológica, bem como climática, qualidade da água e outras séries temporais, tem sido um tema ativo há mais de três décadas, sobretudo com o extenso trabalho recente no campo da mudança e variabilidade climática, este tema tem recebido ainda maior atenção (Hamed, 2008). Nos últimos anos, vários estudos têm sido feitos para detectar possíveis tendências e mudanças climáticas em todo o mundo, porém, a maioria destes concentra-se apenas nas alterações de temperatura e precipitação (Gocic e Trajkovic, 2013).

Gocic e Trajkovic (2013) enfatizam que a precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes que podem afetar a ocorrência de secas ou inundações, fornecendo informações importantes que podem ser utilizadas para melhorar as estratégias de gestão da água, proteger o meio ambiente, planejar a produção agrícola ou, em geral, impactar o desenvolvimento econômico de determinada região.

Soares et al. (2016) enfatizam que identificar e medir padrões de ocorrência das chuvas traz subsídios imprescindíveis para o planejamento e operação de diversos setores da sociedade, como a agricultura, a pesca, a navegação, o abastecimento d'água, o controle e proteção contra inundações, a conservação dos ecossistemas e demais análises que envolvam o balanço hídrico de bacias hidrográficas e o regime de vazões de rios.

De acordo com Gonçalves et al. (2015), a precipitação na região amazônica é um parâmetro meteorológico que varia bastante no tempo e no espaço e está associada com a influência de diferentes sistemas na mesoescala, escala sinótica e grande escala. As prováveis causas da

variabilidade climática são as fases extremas de Oscilação do Sul, principalmente a fase negativa (fenômeno El Niño) e a fase positiva (fenômeno La Niña).

De acordo com Alves et al. (2013), a análise de tendências em séries temporais de vazão é extremamente importante para a gestão dos recursos hídricos, onde em geral, estes são projetados e operados a partir da hipótese da estacionariedade estatística das séries históricas. O entendimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas depende da disponibilidade de dados, e da manutenção de redes de monitoramento (Melo e Montenegro, 2015).

Mudanças climáticas aliadas ao processo de uso e ocupação dos solos têm sido consideradas como as principais causas de alterações temporais da precipitação e da vazão (Kliment et al., 2011), assim, a suposição da estacionariedade pode ser invalidada (Alves et al., 2013). Rodrigues et al. (2016a), em uma visão geral, apontam que entre 1984 e 2010, houve redução das áreas de matas (-3.57%) e terras cultivadas (-13.71%), e aumento nas áreas de pastagem (17.27%) na microbacia hidrográfica do Igarapé da Prata.

Por meio da plataforma Hidroweb da ANA, no ano de 2017, foram contabilizadas 1774 estações fluviométricas na Amazônia Legal, onde a densidade mínima recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para a região é de 1875 km²/estação. No entanto, se considerarmos a área da Amazônia Legal, a região possui uma média de 2830 km² por estação, ou seja, indica que a densidade de estações instaladas é inadequada, com o agravante de unidades desativadas e com muitos erros e descontinuidades, dificultando estudos de séries históricas.

Quanto ao monitoramento pluviométrico, Ishihara (2013) alerta que a Amazônia não tem uma rede de monitoramento adequada, pois a cobertura de estações pluviométricas para o monitoramento ainda é baixa, com uma média de 3343.91 km² por estação, enquanto que a densidade mínima recomendada pela OMM para a região é de 575 km²/estação, enfatizando que as estações não estão distribuídas homoganeamente na região, principalmente quando se leva em consideração a sua temporalidade, o que torna um complicador para o monitoramento de uma das regiões tão importante para o Brasil como para o mundo.

Na Amazônia apenas as grandes bacias são monitoradas. Esta exclusão de inúmeras pequenas bacias limita o planejamento e gestão dos recursos hídricos na região. Assim, as pequenas comunidades da Amazônia não têm meios de utilização dos recursos hídricos de forma sustentável, o que dificulta o desenvolvimento socioeconômico da região (Blanco et al., 2008). Na região não foram verificadas tendências significativas nas chuvas ou vazões, ainda que o desmatamento tenha aumentado significativamente nos últimos 20 anos (Marengo e Valverde, 2007).

As variáveis chuva, vazão e escoamento superficial são correlacionadas em diversos estudos sob óticas e metodologias diferentes (Alencar et al., 2006; Belhassan, 2011; Silveira e Souza, 2012). Blanco et al. (2013) informa que a bacia hidrográfica do igarapé da Prata é a única bacia hidrográfica na região que tem longa série de dados de fluxo, no entanto, não possui em sua área dados de precipitação.

Compreendendo a importância de se obter informações a respeito das áreas na Amazônia Legal, este artigo se propõe a analisar homogeneidade e tendências na distribuição temporal de variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica do igarapé da Prata, município de Capitão Poço, nordeste do Estado do Pará, utilizando de séries históricas de 30 anos de dados para precipitações pluviométricas e de 18 anos de dados para vazões e níveis d'água. Propõe-se, também, compreender as interações entre as variáveis hidrológicas e verificar anomalias nas precipitações por decorrência do El Niño e La Niña.

Metodologia

A pesquisa foi realizada na bacia hidrográfica do igarapé da Prata, área rural localizada no município de Capitão Poço no Estado do Pará, situada entre as coordenadas de latitude 01°33'34"S, de longitude 47°07'55"W e de latitude 01°43'40"S, de longitude 47°06'09"W, no sentido Norte-Sul.

O município está inserido na mesorregião do Nordeste Paraense e microrregião do Guamá. A bacia hidrográfica está localizada a 154 km a leste da capital do Estado, Belém, sua descarga é junto ao rio Guamá, com seu exutório localizado nas coordenadas de latitude 01° 33'53.8"S e de longitude 47° 8' 21.5"W. Na Figura 1 apresenta-se o mapa de localização do município, contendo a área de estudo e as estações meteorológicas adjacentes. O clima da região, enquadra-se no tipo climáticos Am da classificação de Köppen, sendo úmido com pequena estação seca entre setembro e novembro (Santos et al., 2015).

No município de Capitão Poço, a temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que se caracteriza por apresentar pequena variação térmica durante o ano, tendo como temperatura média anual valores oscilando em torno de 26 °C. As temperaturas máximas médias anuais oscilam entre 32 °C e 33.7 °C, enquanto que, as mínimas médias anuais, variam de 21.1 °C a 22.4 °C (Pacheco e Bastos, 2001).

Santos et al. (2015) mostram que a precipitação pluviométrica média anual no município de Capitão Poço é de 2400 mm, com os meses mais chuvosos entre fevereiro e abril, com o pico em março.

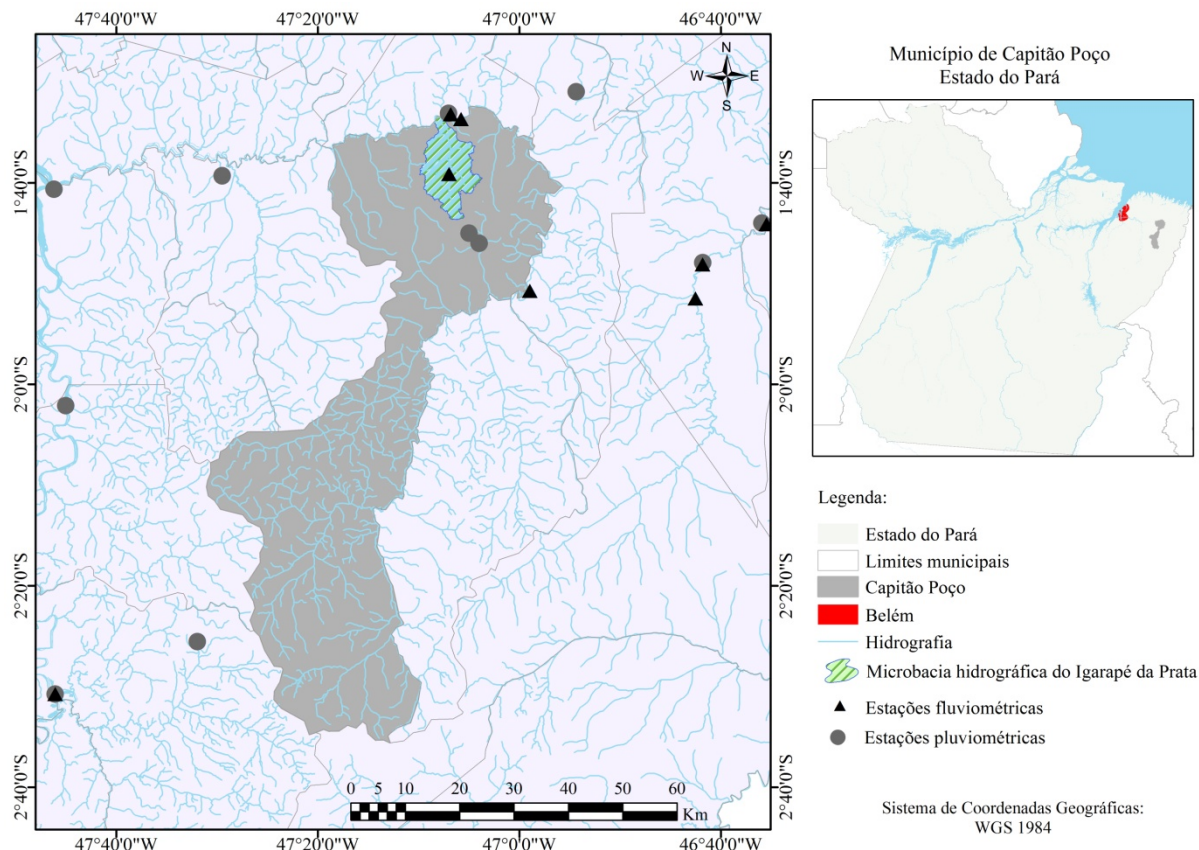


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.

O município de Capitão Poço está localizado em uma região sujeita a índices pluviométricos elevados e, conseqüentemente, a valores elevados de umidade relativa, tendo como médias anuais de umidade relativa valores variando de 70% a 85%. Os maiores índices de umidade relativa do ar ocorrem no período chuvoso (janeiro a maio), enquanto que os menores índices de umidade relativa acontecem no período menos chuvoso (outubro e novembro) (Pacheco e Bastos, 2001).

Sobre a hidrografia do município de Capitão Poço: O rio Guamá é o de maior importância no município, servindo de limite entre Capitão Poço e o município de Ourém, em toda sua porção norte e leste. Para o rio Guamá, converge toda a trama de pequenos rios e igarapés que se inserem no município; uns, em direção sul-norte, outros, em direção sudoeste-nordeste e outros, ainda, em direção, norte-sul (FAPESPA, 2016).

Sobre a vegetação do município de Capitão Poço: A vegetação é caracterizada pela cobertura de Floresta Densa Latifolhada de platô, terraços e vegetação aluvial. Estando a área inserida na

condição de frente pioneira, há incidência muito grande de desmatamentos e, conseqüentemente, áreas de capoeira. Atualmente, existe uma grande área com o cultivo de citrus (laranja), com fins industriais (FAPESPA, 2016).

No trecho da bacia estudada predominam os Latossolos Amarelos distróficos e Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos, com 84 e 14 % do total, respectivamente, ambos são solos profundos, homogêneos e quimicamente pobres (Santos et al., 2015).

Em relação ao aspecto geológico do município de Capitão Poço: A área do município é constituída, geologicamente, por sedimentos do Terciário Barreira e do Quaternário; possui, ainda, áreas com rochas cristalinas do Grupo Gurupi na curva do rio Guamá, no limite com o Município de Ourém. Também ocorrem restos de sedimentos do Cretáceo. O relevo acompanha a geologia, apresentando áreas de tabuleiros, terraços, várzeas e colinas baixas do Cristalino. Insere-se no Planalto Rebaixado da Zona Bragantina (FAPESPA, 2016).

Rodrigues et al. (2016b) realizaram a análise espacial da microbacia hidrográfica do igarapé da Prata com a obtenção de um Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e processamento dos dados digitais de elevação e drenagem, gerados através do sistema de informações geográficas utilizando softwares de geoprocessamento para obtenção da delimitação da microbacia, e posterior definição das características físicas, como: área da bacia (115.28 km²), perímetro (70.15 km), coeficiente de compacidade (1.829), fator de forma (0.356), índice de circularidade (0.294), declividade média (7.27%), altitude média (75.37 m), padrão de drenagem (dendrítica) densidade de drenagem (0.049 km/km²), ordem dos cursos d'água (3ª), comprimento total dos cursos d'água (60,47 km), comprimento do curso d'água principal (16,94 km) e sua declividade média (0,0034 km/km), além do tempo de concentração (470 minutos).

De acordo com as características morfométricas, Rodrigues et al. (2016b), afirma que a microbacia hidrográfica do igarapé da Prata mostra-se pouco suscetível a enchentes em condições normais de precipitação, ou seja, excluindo-se eventos de intensidades anormais.

A estação pluviométrica Ourém (código 00147016) localizada na latitude 1°33'02''S e longitude 47°07'01''W, conforme recomendado por Blanco et al. (2013) foi utilizada como referência para estimativa da precipitação na área de estudo. Para esta variável obteve-se uma série temporal de 30 anos no período de 1988 a 2017. Segundo a WMO (1994), para a análise de tendência de precipitações pluviométricas recomenda-se a utilização de pelo menos 30 anos de série temporal. As cotas e vazões foram definidas com base nos dados da estação fluviométrica Marambaia (código 31600000) da ANA, com área de drenagem de 32.7 km² no igarapé da Prata, ou seja, inserida na bacia em estudo. As séries históricas compõem o banco de dados da Agência Nacional de Água (ANA), disponíveis no sistema de informações hidrológicas Hidroweb, com dados entre os anos de 1965 e 2016, incluindo muitos períodos sem leituras ou com falhas. Para estas

variáveis, devido à carência de dados nesta estação meteorológica foi definido que os dados observacionais utilizados nas análises compreendem o período de 1988 a 2005, totalizando 18 anos de dados simultâneos.

Os dados de chuva representam valores totais, em que os 30 anos observados (1988-2017) contêm 360 valores mensais de entrada. Os dados de vazão e cota representam valores médios, em que os 18 anos observados (1988-2005) contêm 216 valores mensais para cada variável (vazão média e cota média), totalizando 432 dados de entrada. Estes dados podem ser visualizados, também, pela distribuição anual e mensal.

Na busca de se compreender a influência de fenômenos climáticos e sobre variáveis climatológicas, foi realizada uma análise da variabilidade interanual das precipitações pluviométricas, que podem ser explicadas pela ocorrência e intensidade dos eventos dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña.

No período estudado, de acordo com INPE/CPTEC (2018), o El Niño ocorreu com intensidade fraca nos períodos de 1992 a 1993; com intensidade moderada nos períodos de 2002 a 2003, 2006 a 2007 e 2009 a 2010; e com intensidade forte nos períodos de 1987 a 1988, 1991 a 1992, 1997 a 1998 e 2015 a 2016. As ocorrências de La Niña se deram com intensidade fraca no período de 1998 a 1999; intensidade moderada no período de 1988 a 1989, 1999 a 2000, 2007 a 2008, 2010 a 2011 e 2017 a 2018; e sem registros de intensidade forte, no período estudado.

Para a determinação das anomalias da precipitação pluvial, conforme Monteiro (1976) utilizou-se a Equação (1).

$$\text{anom}_{i,j} = (X_{i,j} - \bar{X}_i) \quad \text{Equação (1)}$$

Em que $\text{anom}_{i,j}$ é a anomalia da precipitação no ano i da estação pluviométrica j ; $X_{i,j}$ é o valor da precipitação pluvial anual i da estação pluviométrica j e \bar{X}_i é a média da precipitação pluvial.

A análise da influência destes fenômenos foi realizada por meio do distanciamento da precipitação anual em relação à média da série analisada, com base nos seus períodos de ocorrência e intensidades. Outro fator relevante é a análise da precipitação anual em função da faixa de desvio padrão (positivo e negativo) em relação à série de dados, conforme análise realizada por Monteiro (1976). Assim, precipitações anuais inferiores ao desvio padrão negativo podem apontar fenômenos climáticos de forte intensidade, atenuando períodos muito secos. Precipitações anuais superiores ao desvio padrão positivo podem apontar fenômenos climáticos de forte intensidade, atenuando períodos muito úmidos.

Foi realizada distribuição da estatística descritiva, através da avaliação de medidas de tendência central e dispersão apresentadas em box plots. A análise da correlação entre os dados de vazão média mensal, chuva total mensal média e cota média mensal, observados no período de 1988 a 2005, foi realizada por meio do coeficiente correlação de Pearson e do coeficiente de determinação “ r^2 ”.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, porém, inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é normalmente representado pela letra “ r ”, conforme a Equação (2).

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que \bar{x} = valores observados médio, \bar{y} = valores simulados médio e x_i, y_i = valores observados e previstos no momento i .

O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ou simplesmente “ r^2 ”. É uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra, numa faixa de 0 a 1 (0 a 100%). Os resultados da simulação são considerados bons para valores maiores ou iguais a 0.75, satisfatórios para valores entre 0.75 a 0.36 e insatisfatórios para valores abaixo de 0.36 (Van Liew e Garbrecht, 2003).

As séries de dados foram submetidas ao teste de homogeneidade de Pettitt. O teste verifica se duas amostras Y_1, \dots, Y_x e Y_{x+1}, \dots, Y_n pertencem à mesma população. O teste não-paramétrico de Pettitt é um teste estatístico utilizado para identificar o ponto de descontinuidade em uma série temporal (Yu et al., 2006). O teste tem, como hipótese nula (H_0), a não existência de mudança brusca na série, enquanto na hipótese alternativa (H_1), ela existe.

Nesse teste a série foi ordenada de 1 a n e classificada em ordens (O_i) de acordo com sua posição de observação X_i . Para cada ponto da série k calculou-se a soma das classes, em que o valor máximo de k determina o ponto de descontinuidade, Equações (3) e (4). A hipótese nula (H_0) será rejeitada se o valor de K_a calculado exceder a um valor crítico determinado, em determinado nível de significância α , conforme a Equação (5). Para este teste foi adotado nível de significância de 0,05 (5%).

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k O_i - k(n+1) \quad k=1, 2, \dots, n-1 \quad \text{Equação (3)}$$

$$K(t) = \text{Max}_{1 \leq k \leq n} |U_k| \quad \text{Equação (4)}$$

$$K_a = \sqrt{\frac{-\ln(a) \cdot (n^3 + n^2)}{6}} \quad \text{Equação (5)}$$

Em que U_k = estatística de Pettitt; K_a = probabilidade da significância associada á rejeição de H_0 ; n = número de dados; O_i = ordem da i -ésima observação, quando os valores de X_1, X_2, \dots, X_n são ordenados em ordem crescente.

Para análise de tendência das séries mensais e anuais de precipitação, vazão e cota, as técnicas estatísticas utilizadas são o teste de Mann-Kendall e a magnitude de Sen's.

O teste de tendência de Mann-Kendall é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a de qualidade da água, vazões, temperatura e precipitação (Hamed, 2009), usual e consolidado entre diversos autores, como Luiz; Cardoso; Ribeiro (2012), Pinheiro; Graciano; Severo (2013), Golçalves e Back (2018), Oliveira et al. (2018) e Silva et al. (2018). O teste de Mann-Kendall, também conhecido por Kendall's tau (Kahya e Kalayci, 2004) é uma análise estatística não-paramétrica que considera a hipótese de estabilidade de uma série temporal cuja sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples), como é o caso das séries históricas naturais.

Alves et al. (2013), bem como Gocic e Trajkovic (2013) descrevem o teste de tendência de Mann-Kendall. O teste baseia-se na correlação entre as fileiras de uma série temporal e sua ordem temporal. Para uma série temporal $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, a estatística de teste é dada pelas Equações (6) e (7).

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} \quad \text{Equação (6)}$$

$$a_{ij} = \text{sinal}(Y_j - Y_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } (Y_j - Y_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (Y_j - Y_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (Y_j - Y_i) < 0 \end{cases} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que Y_i e Y_j são as fileiras das observações x_i e x_j das séries temporais, respectivamente. Sinal é a função sinal.

A estatística de teste depende apenas das fileiras das observações, em vez de seus valores reais, resultando em uma estatística de teste livre de distribuição. Isso é verdade porque se os dados fossem transformados em qualquer distribuição, as fileiras das observações permaneceriam as

mesmas. Os testes livres de distribuição têm a vantagem de que seu poder e significado não são afetados pela distribuição real dos dados. Isto contrasta com os testes de tendência paramétrica, como o teste de coeficiente de regressão, que supõe que os dados seguem a distribuição Normal e cuja potência pode ser grandemente reduzida no caso de dados distorcidos (Yue et al., 2002).

Para séries com grande número de termos (n), sob a hipótese nula (H_0) e ausência de tendência na população, S apresenta uma distribuição normal com média zero e variância definida pela Equação (8). Testando a significância estatística de S para a hipótese alternativa (H_1) e se usando um teste bilateral a H_1 , esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística Z , Equação (9).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1) \cdot (2n+5)}{18} \quad \text{Equação (8)}$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad \text{Equação (9)}$$

Em que n é o número de observações.

Valores positivos de Z indicam tendências crescentes enquanto valores negativos de Z mostram tendências decrescentes. As tendências de teste são feitas no nível de significância α específico. Quando $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, a hipótese nula é rejeitada e existe uma tendência significativa na série temporal. $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido a partir da tabela de distribuição normal padrão. Neste estudo, foram utilizados os níveis de significância $\alpha = 0.05$. No nível de significância de 5%, a hipótese nula de ausência de tendência é rejeitada se $|Z| > 1.96$.

Diversos estudos utilizam o estimador não-paramétrico de inclinação de Sen para estimar a magnitude da variação por unidade de tempo em uma tendência linear em séries temporais. Desenvolveu-se o procedimento para estimar a inclinação da tendência na amostra de N pares de dados, conforme Equação (10). (Fonte)

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{para } i=1, \dots, N, \quad \text{Equação (10)}$$

Onde x_j e x_k são os valores de dados às vezes j e k ($j > k$), respectivamente.

Se houver apenas um dado em cada período de tempo, então $N = n(n-1)/2$, onde n é o número de períodos de tempo. Se houver observações múltiplas em um ou mais períodos de tempo, então $N < n(n-1)/2$, onde n é o número total de observações.

Os valores de N de Q_i são classificados de menor para maior e a mediana de inclinação ou estimador de declive de Sen é calculada conforme Equação (11).

$$Q_{\text{méd}} \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & \text{se N for ímpar} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}}{2} & \text{se N for par} \end{cases} \quad \text{Equação (11)}$$

O sinal $Q_{\text{méd}}$ reflete reflexão de tendência de dados, enquanto seu valor indica a inclinação da tendência. Para determinar se a inclinação mediana é estatisticamente diferente de zero, deve-se obter o intervalo de confiança de Q_{med} à probabilidade específica.

O intervalo de confiança sobre a inclinação temporal (Hollander e Wolfe, 1973; Gilbert, 1987) pode ser calculado pela Equação (12).

$$C_{\alpha} = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(S)} \quad \text{Equação (12)}$$

Em que $\text{Var}(S)$ é definido na Equação (8) e $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido a partir da tabela de distribuição normal padrão. Neste estudo, o intervalo de confiança foi calculado em para o nível de significância de $\alpha = 0.05$.

Então, $M1=N-C_{\alpha}/2$ e $M2=N+C_{\alpha}/2$ são computados. Os limites inferior e superior do intervalo de confiança, $Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{máx}}$, são $M1$ o maior e $(M2 + 1)$ maior das N estimativas de inclinação ordenada (Gilbert, 1987). A inclinação $Q_{\text{méd}}$ é estatisticamente diferente de zero se os dois limites ($Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{máx}}$) tiverem um sinal semelhante.

Resultados e discussão

Por meio da normal climatológica, verificou-se uma diferença entre o período com maior e menor pluviosidade, tendo em vista que os dados pluviométricos indicam que o regime de precipitação regional é caracterizado por uma estação chuvosa de janeiro a junho, onde março é o mês com maior precipitação, e uma estação menos chuvosa de julho a dezembro, em que outubro é o mês com a menor pluviosidade. Os três meses mais chuvosos para o período 1988-2017, são fevereiro, março e abril, com precipitação média de 292, 375 e 341 mm, respectivamente. E os três meses com menor pluviosidade corresponderam a setembro, outubro e novembro, com as respectivas precipitações médias de 67, 51 e 45 mm.

Na análise dos dados (Figura 2) demonstram-se as anomalias anuais de precipitação pluviométrica. Os anos de 1992, 1997 e 2015 apresentaram acentuadas variabilidades negativas, ou seja, nestes anos o El Niño apresentou fortes influências, aferindo a diminuição no regime de chuvas para a região. A maior variabilidade positiva ocorreu no ano de 1989, demonstrando a forte influência da La Niña 1988/1989 elevando o regime de chuvas para a região.

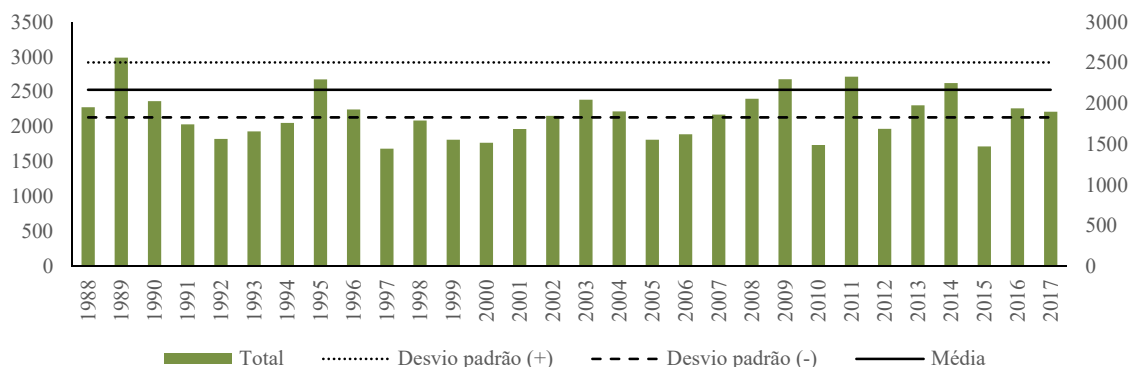


Figura 2. Anomalias Anuais de Precipitação Pluviométrica para a estação pluviométrica Ourém no período de 1988 a 2017.

O comportamento das anomalias é condizente com a ocorrência dos fenômenos climáticos analisados, considerando seus períodos de transição, ocorrência simultânea e a maior significância sobre a série de dados anuais. O ano de 1989 apresentou precipitações maiores que o desvio padrão positivo, caracterizando um ano muito chuvoso, enfatizando a influência da La Niña. Segundo a National Aeronautics and Space Administration (NASA), nos anos de 1997 e 2015 foram registrados os El Niños mais intensos desde que o fenômeno passou a ser estudado. Neste ano a precipitação foi menor que o desvio padrão negativo, caracterizando um ano pouco chuvoso, enfatizando a influência do El Niño na Amazônia.

A distribuição mensal das chuvas no período estudado apresenta observações outliers nos meses de abril, junho, outubro e novembro. Quanto a ocorrência de outliers, inicialmente pensava-se que a melhor forma de lidar com este tipo de observações seria através da sua eliminação da análise, principalmente quando a série de dados é utilizada para projeções e estimativas. No entanto, as observações podem contribuir com igual peso para o resultado final, desde que suas causas possam ser justificadas nas séries de dados observados.

O mês de abril compõe o período dos meses mais chuvosos. O mês de julho corresponde à transição entre as estações chuvosa e menos chuvosa. Os meses de outubro e novembro compõe o período dos meses mais secos. A observação outliers em abril corresponde ao ano de 1989 e podem ser justificadas devido à ocorrência de La Niña de forte intensidade. Em julho, as observações correspondem aos anos de 1990 e 2003, podendo estar associadas à transição entre a ocorrência dos fenômenos climáticos e suas intensidades. Em outubro, as observações correspondem ao ano de 1989 e 1999, podendo ser justificadas devido à ocorrência de La Niña de forte intensidade e à transição entre a ocorrência dos fenômenos climáticos e suas

intensidades, respectivamente. No mês de novembro, a observação é correspondente ao ano de 1995, no qual houve a transição de um El Niño (moderado) e La Niña (fraco).

A análise de correlação com base nas distribuições mensais por meio do coeficiente de correlação de Pearson apresentou valores de 0.431 para Vazão média (m^3/s) e Chuva total (mm); de 0.996 para Vazão média (m^3/s) e Cota média (cm); e de 0.373 para Cota média (cm) e Chuva total (mm), considerando o período em que as séries históricas ocorrem simultaneamente (1988 a 2005). Neste período, a correlação entre vazão média mensal (Y) e chuva total mensal (X) apresenta r^2 no valor de 0.186, significando que somente 18.6% da variabilidade da variável dependente foi explicada pela variável explicativa. Neste período, a correlação entre vazão média mensal (Y) e cota média mensal (X) apresenta r^2 no valor de 0.991, significa dizer que somente 99.1% da variabilidade da variável dependente foi explicada pela variável explicativa.

A análise de correlações fracas pode se dá pelo fato de as variáveis não trazerem informações significativas para o modelo, devendo ser interpretada de diferentes maneiras: a variável não contribui para o modelo ou algumas variáveis que poderiam ajudar na explicação estão faltando. Deste modo, entende-se a importância da utilização de outras variáveis do balanço hídrico, quando disponíveis. Assim, variáveis como evapotranspiração (interceptação, transpiração e evaporação), armazenamento de água no solo, infiltração e escoamento subterrâneo, são necessárias para compreender o processo dinâmico desse retardo de resposta.

A correlação entre vazão média mensal (Y) e cota média mensal (X) apresenta r^2 com forte correlação. Assim, a informação trazida pelas variáveis explicativas foi significativamente melhor do que uma média básica traria. Esta forte correlação é comum entre estas variáveis, pois as medições são realizadas nos mesmos pontos, com perfis transversais definidos, entende-se que 100% da variabilidade deveria ser explicada, porém, a escala das medições visuais pode propiciar pequenos erros, além de falta de manutenção e calibração de equipamentos de medição.

A característica mais acentuada apresentada na visualização dos valores de precipitação e vazão no período de 1988 a 2005 na bacia do igarapé da Prata é o retardo de aproximadamente dois meses entre o pico de chuva e o pico de vazão e nível do curso d'água.

Com base na série de dados observacionais (diários), por meio do coeficiente de correlação de Pearson, a análise de correlação apresentou valores de 0.25 para Vazão média (m^3/s) e Chuva total (mm); de 0.676 para Vazão média (m^3/s) e Cota média (cm); e de 0.149 para Cota média (cm) e Chuva total (mm). Significa dizer estatisticamente pelo r^2 que somente 6.2% dos valores de vazão média são explicados pelos valores de chuva total (classificado como insatisfatório); que 45.8% dos valores de vazão média são explicados pelos valores de cota média (classificado como satisfatório); e somente 2.2% dos valores de cota média são explicados pelos valores de chuva total (classificado como insatisfatório).

Rankeando os dados de vazão verificou-se, por exemplo, que uma vazão média de 0.69 m³/s em nov/1990 corresponde a uma cota média de 52 cm; em mar/1993, a uma cota média de 54 cm; em maio/1998, a uma cota média de 58 cm; e em set/2005, a uma cota média de 65 cm. Do mesmo modo, rankeando os valores de cota média, observou-se que em jan/1991 uma cota média de 70 cm corresponde a uma vazão média de 2.33 m³/s. A mesma cota média em set/2004 corresponde a uma vazão média de 1.01 m³/s. Este ranqueamento mostra que com o passar dos anos os valores de cota média aumentaram para manter valores de vazão média. Bem como, com o passar dos anos os valores de cota média iguais correspondem a menores valores de vazão média.

A distribuição da precipitação total mensal mostrou-se homogênea, sendo detectado ponto de descontinuidade no mês de abril. A distribuição da vazão média mensal mostrou-se homogênea, não sendo detectado ponto de descontinuidade na série. Além da homogeneidade observada na distribuição da vazão média mensal não foi verificada a existência de tendência estaticamente significativa na distribuição (Tabela 1).

A distribuição da cota média mensal mostrou-se não homogênea, sendo detectado ponto de descontinuidade nos períodos de janeiro a abril e de agosto a dezembro. Além da não homogeneidade observada na distribuição da cota média mensal foi verificada a existência de tendência estaticamente significativa na distribuição, exceto nos meses de maio e junho.

A análise das variáveis mostrou-se homogênea e sem tendência para chuva total anual e vazão média anual. A variável cota média anual mostrou-se não homogênea, com tendência positiva e aumento de 0.56 cm/ano.

Vazões e cotas, apesar de possuírem forte correlação por tendências centrais e correlação satisfatória, não possuem comportamento semelhantes quanto à homogeneidade e tendências, conforme também observado pelo ranqueamento dos dados observacionais. Um indicativo desta analogia pode estar relacionado ao uso e cobertura do solo, por se tratar de uma área estritamente rural, com estradas de terras e atividades agropecuárias, com impactos provenientes das atividades de extração de seixo e areia, acentuando o transporte de sedimentos e assoreamento dos cursos d'água (Figura 3). Rodrigues et al. (2016a), apontam que entre 1990 e 2006 houve um aumento de 6.39% em áreas de florestas e 10.81% em áreas de pastagens, e redução de 17.20% nas áreas de terras cultivadas.

Buarque, Clarke e Mendes (2010), por meio de análise geoestatística em registros de precipitações na Amazônia, verificaram que em média na região da Amazônia brasileira as tendências nas precipitações máximas anuais foram ligeiramente negativas, a tendência no período menos chuvoso foi ligeiramente positiva e a tendência no número de dias úmidos no ano foi levemente negativa.

Tabela 1. Testes estatísticos aplicados às variáveis estudadas.

	Chuva total (mm) ^a				Vazão média (m ³ /s) ^b				Cota média (cm) ^b			
	THP	Z	SEN (mm/ano)		THP	Z	SEN (m ³ /s.ano)		THP	Z	SEN (cm/ano)	
Jan	S	-0.23	Nula	-3.52	S	1.15	Nula	0.002	N	2.53	Pos.	0.625
Fev	S	-0.12	Nula	-1.71	S	0.23	Nula	0.003	N	2.68	Pos.	0.6
Mar	S	0.07	Nula	1.46	S	0.72	Nula	0.014	N	3.11	Pos.	0.75
Abr	N	0.25	Nula	3.83	S	0.53	Nula	0.008	N	2.8	Pos.	0.5
Mai	S	0.10	Nula	1.43	S	-1.35	Nula	-0.031	S	1.29	Nula	0.333
Jun	S	0.02	Nula	0.33	S	-1.17	Nula	-0.036	S	1.71	Nula	0.5
Jul	S	0.06	Nula	0.46	S	-0.87	Nula	-0.02	S	2.02	Pos.	0.5
Ago	S	-0.09	Nula	-0.51	S	-0.68	Nula	-0.01	N	2.17	Pos.	0.6
Set	S	0.05	Nula	0.51	S	-0.34	Nula	-0.004	N	2.6	Pos.	0.636
Out	S	0.16	Nula	0.88	S	0.34	Nula	0.007	N	3.68	Pos.	0.75
Nov	S	-0.24	Nula	-1.02	S	0.65	Nula	0.007	N	3.71	Pos.	0.77
Dez	S	-0.16	Nula	-2.08	S	-0.15	Nula	-0.003	N	3.08	Pos.	0.625
Anual	S	0.03	Nula	1.94	S	-1.02	Nula	-0.016	N	2.89	Pos.	0.56

Nota: ^a período de 1988 a 2017; ^b período de 1988 a 2005; THP (Teste de homogeneidade de Pettitt); N = série não homogênea; S = série homogênea; Z (Mann-Kendall); Nula = sem tendência; Neg. = tendência negativa; Pos. = tendência positiva; e SEN (estimador de inclinação de Sen).



Figura 3. Extração de seixo e areia, e assoreamento do curso d'água na bacia hidrográfica do igarapé da Prata.

Salviano, Groppo e Pellegrino (2016), utilizando séries mensais entre os anos de 1961 e 2011, realizaram análise espacial de tendências de precipitações no Brasil, onde constataram que a região nordeste paraense, em geral não apresenta tendências, exceto nos meses de abril, outubro e dezembro que apresentaram tendências positivas em áreas próximas.

Nos resultados obtidos para a bacia hidrográfica do igarapé da Prata, averigua-se que, em uma análise mensal para o período estudado, as precipitações pluviométricas não apresentam tendências, onde em termos de magnitudes, alguns meses apresentam reduções, porém, ao analisar a série histórica pela chuva acumulada anual aponta-se um acréscimo com o passar dos anos.

Conclusão

O estado do Pará possui 388 estações pluviométricas, porém, 102 estão sem dados disponíveis nas plataformas associadas. A maior dificuldade se dá por conta de a maioria apresentar poucos dados, onde somente 99 dispõe de pelo menos 30 anos (incluindo estações desativadas). Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña possuem influência causando anomalias na precipitação pluviométrica anual, sobretudo em período com ocorrência de maiores intensidades.

Na bacia hidrográfica do igarapé da Prata, vazões e cotas possuem simultaneamente o mesmo comportamento em função do tempo, porém, estas variáveis têm fraca correlação com a precipitação, sendo caracterizado um retardo de aproximadamente dois meses entre o pico de chuva e os picos de vazão e nível do curso d'água.

A análise por ranqueamento mostrou que com o passar dos anos as cotas médias estão aumentando em decorrência de vazões médias iguais, esta variabilidade pode ser relacionada diretamente com a dinâmica de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica, intensificadas pelo assoreamento do curso d'água.

Na bacia hidrográfica do igarapé da Prata as precipitações pluviométricas são homogêneas, assim como a distribuição temporal mensal e anual de vazões média. As cotas médias anuais e mensais, em geral, não são homogêneas. As precipitações pluviométricas e vazões não apresentam tendências, diferente do nível d'água que apresenta tendências positivas.

Referências Bibliográficas

- Alencar, D. B. S., Silva, C. L., Oliveira, C. A. S. (2016) Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. *Engenharia agrícola*, **26**(1), 103-112.
- Alves, B. C. C., Souza Filho, F. A., Silveira, C. S. (2013) Análise de Tendências e Padrões de Variação das Séries Históricas de Vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS) RBRH – *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **18**(4), 19-34.

- Belhassan, K. (2011) Relationship between River Flow, Rainfall and Groundwater pumpage in Mikkes Basin (Morocco) *Iranian Journal of Earth Sciences*, **3**, 134-152.
- Blanco, C. J. C., Santos, S. S. M., Quintas, M. C., Vinagre, M. A., Mesquita, A. L. A. (2013) Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall-runoff models to simulate flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, **58**(7), 1423-1433.
- Blanco, C. J. C., Secretan, Y., Mesquita, A. L. A. (2008) Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. *Energy for Sustainable Development*, **12**(3), 25-33.
- Buarque, D. C.; Clarke, R. T.; Mendes, C. A. B. (2010) Spatial correlation in precipitation trends in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research*, **115**, 1-14.
- FAPESPA. Estatísticas Municipais Paraenses: Capitão Poço. Governo do Estado do Pará. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação. Belém, 2016.
- Gilbert, R. O. (1987) Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. John Wiley & Sons, New York.
- Gocic, M., Trajkovic, S. (2013) Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, **100**, 172-182.
- Gonçalves, F. N.; Back, A. J. (2018) Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, **41**(3), Lisboa, 592-602.
- Gonçalves, M. F., Blanco, C. J. C., Santos, C. dos., Santos, L. L. dos. (2015) Regiões homogêneas de precipitação pluvial no estado do Pará, considerando a ocorrência de El Niño e La Niña. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico. 21. , 2015. Brasília. Anais... Brasília: ABRH.
- Hamed, K. H. (2009) Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data. *Journal of Hydrology*, **365**(1-2) 86-94.
- Hamed, K. H. (2008) Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, **349**, 350- 363.
- Hollander, M., Wolfe, D. A. (1973) Nonparametric Statistical Methods. John Wiley & Sons, New York.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niña. Disponível em: < <http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: outubro de 2018.
- Ishihara, J. H., Fernandes, L. L., Duarte, A. A. A. M., Loureiro, G. E. (2013) Avaliação do monitoramento pluviométrico da Amazônia Legal. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, **10**(3), 132-144.
- Kahya, E., Kalayci, E. (2004) Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology*, **289**(1-4), 128-144.
- Kliment, Z., Matoušková, M., Ledvinka, O., Královec, (2011) Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **59**(1), 36-50.
- Luiz, G. C.; Cardoso, H. C.; Ribeiro, L. L. (2012) Aplicação do teste sazonal de Mann Kendall na análise de tendência da temperatura e umidade relativa do ar – Goiânia-GO: série histórica 1961 a 2008. *Revista Geonorte*, Edição Especial 2, **1**(5), 414-427.
- Marengo, J. A., Valverde, M. C. (2007) Caracterização do clima no século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, **(8)**, 5-28.
- Melo, R. O., Montenegro, A. A. A. (2015) Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **20**(2), 430-441.
- Monteiro, C. A. F. (1976) O clima e a organização do espaço no Estado de São Paulo: problemas e perspectivas. Série Teses e Monografias, nº28, São Paulo: USP/IGEOG, 54 pp.
- Oliveira, A. S.; Pereira, G. A.; Rodrigues, A. F.; Melo Neto, J. O. (2018) Tendências em índices extremos de precipitação e temperatura do ar na cidade de Uberaba, MG. *Sustentare*, **2**(1), 118-134.
- Pacheco, N. A., Bastos, T. X. (2001) Caracterização climática do Município de Capitão Poço-PA. Embrapa Amazônia Oriental, Documentos, 79, 20p. Belém, Pará, Brasil.
- Pinheiro, A.; Graciano, R. L. G.; Severo, D. L. (2013) Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **28**(3), 281-290.

- Rodrigues, R. S. S., Fernandes, L. L., Nascimento, T., Pessoa, F. C. L., Cruz, J. S. (2016a) Evolução do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Igarapé da Prata (1984-2010), Capitão Poço, Pará, Brasil. *X Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*. Porto Alegre/RS, Brasil.
- Rodrigues, R. S. S., Fernandes, L. L., Crispim, D. L., Vieira, A. S. A, Pessoa, F. C. L. (2016b) Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, Capitão Poço – Pará – Brasil. *Revista Verde*, **11**(3), 143-150.
- Santos, D. B. O., Blanco, C. J. C., Pessoa, F. C. L. (2015) RUSLE para Determinação da Tolerância de Perda de Solo. *Biota Amazônia*, **5**(4), 78-83.
- Salviano, M. F.; Groppo, J. D.; Pellegrino, G. Q. (2016) Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **31**(1), 64-73.
- Silva, E. R. A. C.; Galvíncio, J. D.; Nascimento, K. R. P.; Santana, S. H. C.; Souza, W. M.; Costa, S. O. (2018) Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica interanual e intra-anual no semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Climatologia*, **22**, 76-98.
- Silveira, C. S., Souza, K. (2012) Relações hidrológicas entre a pluviosidade e a vazão em uma série temporal (2007-2009) de uma bacia de drenagem de uso misto – Teresópolis, RJ, Brasil. *Geociências*, **31**(3), 395-410.
- Soares, A. S. D., Paz, A. R., Picilli, D. G. A. (2016) Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **21**(2), 288-299.
- Van Liew, M. W., Garbrecht, J. (2003) Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, **39**, 413-426.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002) The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, **16**, 1807-1829.
- WMO. World Meteorological Organization. (1994) Guide to hydrological Practices. Data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications. 5th Edition, nº 158, Genebra-Suíça, 735 pp.