

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

ESTACIONARIEDADE DA PRECIPITAÇÃO EM CARUARU - PE SEGUNDO MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS

João H. P. de B. Salgueiro^{1}; Leidjane Maria Maciel de Oliveira²; Eber José de Andrade Pinto³;
Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁴ & Bernardo Barbosa da Silva⁵*

RESUMO – Devido as alterações nos regimes pluviométricos e o aumento nas ocorrências de desastres naturais, pesquisas sobre precipitações extremas utilizando séries pluviométricas de longos períodos estão sendo muito exploradas. Este trabalho analisou a estacionariedade das séries de Precipitação Total Anual - PTA e do Período Mais Úmido - PMU, medidas na cidade de Caruaru-PE (Brasil), através da verificação da existência de tendências. A metodologia incluiu os testes estatísticos de *Mann-Kendall* e *Spearman's Rho*, associados à técnica *Bootstrapping* de Reamostragem. Os resultados indicaram com significância estatística, fortes evidências de tendência crescente em ambas as variáveis.

ABSTRACT – Due to changes in rainfall regimes and the increase in occurrences of natural disasters, research on extreme rainfall using long-term rainfall series is being explored. This work analyzed the stationarity of the Total Annual Rainfall series - PTA and of the More Rainy Period - PMU, measured in the city of Caruaru-PE (Brazil), by verifying the existence of trends. The methodology included the statistical tests of Mann-Kendall and Spearman's Rho, associated with the Bootstrapping Resampling technique. The results indicated, with statistical significance, strong evidences of increasing tendency in both variables.

Palavras-Chave – Alteração pluviométrica, Testes estatísticos, Reamostragem *Bootstrapping*

-
- 1) Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Av. Sul, 2291, Afogados, Recife-PE, CEP 50.770-011, Fone: 81-3316.1400, e-mail: joao.salgueiro@cprm.gov.br;
 - 2) Professora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, CEP 50.740-540, Fone: 81-2126.7764, e-mail: leidjaneoliveira@hotmail.com;
 - 3) Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil-CPRM e Professor da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Av. Brasil 1.731, Funcionários, Belo Horizonte - MG, CEP 30.140-002, Fone: 31-3878.0307, e-mail: eber.andrade@cprm.gov.br;
 - 4) Professora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, CEP 50.740-540, Fone: 81-2126.8709, e-mail: suzanam@ufpe.br;
 - 5) Professor do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, Bloco CL Universitário 50.741-530 - Campina Grande, PB – Brasil - Fone: 83-2101.1202, e-mail: bbdasilva.ufpe@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas específicas sobre as precipitações extremas utilizando séries pluviométricas de longos períodos estão sendo muito exploradas em diversas partes do mundo, principalmente em virtude da intensificação da magnitude e frequência dos desastres naturais observados. Salgueiro *et al.* (2014) destacaram que estudos importantes sobre alterações nos regimes de chuvas vêm sendo desenvolvidos em todos os continentes, motivados pelas ocorrências extremas constatadas nas últimas décadas, e suas relações com as modificações dos climas, cujos prejuízos decorrentes são evidentes. Farias e Nóbrega (2010) afirmaram que eventos extremos, como secas severas ou grandes enchentes, podem causar significativos transtornos à população, seja com inundações nos grandes centros urbanos, como também com estiagens prolongadas na zona rural. O aquecimento global e suas diversas consequências, entre elas as mudanças na precipitação, têm atraído atenção dos pesquisadores em diferentes regiões do mundo (Silva *et al.*, 2015).

Segundo Santos *et al.* (2014), o aumento da temperatura observado ao longo dos últimos anos está associado às mudanças dos componentes do ciclo hidrológico e do sistema hidrológico, tais como os padrões de precipitação. O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), observou para o Nordeste Brasileiro - NEB uma intensificação dos contrastes climáticos, sobretudo o aumento de chuvas intensas e secas severas. Os desastres naturais decorrentes desses episódios representam a componente mais preocupante dos estudos, por essa resultar em determinadas vezes, em situações de risco, permitindo a destruição dos patrimônios públicos e privados, e ocorrência de óbitos, agravando cada vez mais os problemas socioeconômicos e ambientais (Salgueiro *et al.*, 2014).

Souza e Azevedo (2012) afirmaram que muitos estudos de variabilidade e mudanças do clima consideram as variações de precipitação pluvial como sendo um índice importante para detecção de mudanças climáticas. Segundo Obregón e Marengo (2007), as séries temporais longas, contínuas e homogêneas proporcionam grandes vantagens, em razão de fornecerem estatísticas representativas que caracterizam o fenômeno climático.

Haylock *et al.* (2006) realizaram um estudo da precipitação sobre a América do Sul e observaram tendência de aumento do total anual sobre o NEB. Em Pernambuco, Farias e Nóbrega (2010) apontaram tendência de aumento da precipitação em quase todo o Estado. Entretanto, Santos *et al.* (2014) identificaram redução da precipitação na bacia do Una em Pernambuco. A mesma redução foi observada também nas bacias dos rios Brígida e Pajeú, localizadas no Sertão, e na bacia

do rio Capibaribe, no Agreste, segundo Assis *et al.* (2012) e Assis e Sobral (2012), respectivamente. Em Recife, Souza e Azevedo (2012) detectaram aumento das chuvas intensas.

Este trabalho analisou a estacionariedade da precipitação na cidade de Caruaru - PE, investigando a existência de tendência em séries pluviométricas de longo período, medidas no local. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para a intensificação da pesquisa científica em Caruaru, além de colaborar com os planejamentos urbanos multidisciplinares, principalmente no tocante aos recursos hídricos, como o armazenamento do excesso para suprir as estiagens, como também a mitigação dos seus impactos sociais, econômicos e ambientais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Localizada no NEB, a sede municipal de Caruaru fica a 131 km de Recife, capital do estado de Pernambuco, no cruzamento das rodovias BR 232 e 104. Holanda *et al.* (2017) afirmam que sua posição central é georreferenciada pelas coordenadas geográficas (latitude $-08^{\circ}16'58''S$ e longitude $-35^{\circ}58'33''W$) em uma altitude de 533,54 m. Caruaru tem como limites os municípios de Toritama, Vertentes e Taquaritinga do Norte ao norte; Altinho e Agrestina ao sul; Bezerros Frei Miguelinho e Riacho das Almas ao leste; e Brejo da Madre de Deus e São Caitano a oeste.

Para o ano de 2017, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018) estimou uma população de 356.128 habitantes residente sobre um espaço territorial de 920,61 km². A densidade demográfica resultante coloca Caruaru na quarta posição no estado de Pernambuco, perdendo apenas para Recife, Jaboatão dos Guararapes e Olinda. Conforme o Atlas de Desenvolvimento Humano (2013), Caruaru pertence à Microrregião do Vale do Ipojuca, a qual fica contida na Mesorregião do Agreste Pernambucano, onde o Índice de Desenvolvimento Humano Médio é 0,677, situado na faixa entre 0,600 e 0,699. Segundo CPRM (2005), o município está inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, com predominância de superfícies suaves onduladas, onduladas, e vales de rios e riachos.

Segundo Holanda *et al.* (2017), o clima semiárido de Caruaru (Bsh) caracteriza verões quentes e secos e invernos amenos e chuvosos segundo a classificação de Köppen-Geiger. Os sistemas meteorológicos mais atuantes são a Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis - VCAS, os quais provocam chuvas de moderadas a fortes, além de formações de linhas de instabilidade. Constatam-se também contribuições pluviais de efeitos orográficos por influência do Planalto da Borborema.

Analisando as séries pluviométricas medidas fornecidas Pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC (2018), observou-se que as chuvas precipitadas no período de 1943 a 2017 indicaram precipitações totais anuais com máxima de 1082,0 mm, mínima de 140,0 mm e média de 601,0 mm. Quanto às precipitações mensais, os meses de março a julho caracterizaram o período chuvoso dessa cidade, mostrando que 67% das chuvas precipitadas anualmente ocorrem nesse período. Destacam Holanda *et al.* (2017), que a evapotranspiração real é maior que a precipitação em praticamente todos os meses do ano, a exceção se faz para os meses de junho e julho. Acrescenta ainda que os meses mais secos são outubro, novembro e dezembro. A Figura 2 mostra a distribuição anual das médias mensais de precipitação em Caruaru para o período de 1943 a 2017.

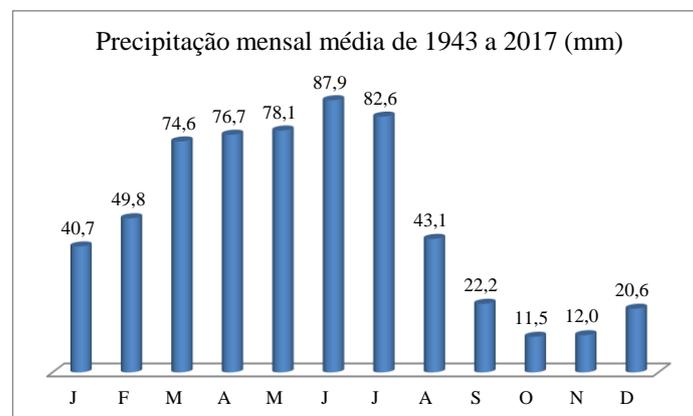


Figura 2 - Precipitação mensal média em Caruaru-PE no período de 1943 a 2017

O período de observação selecionado para pesquisa foi estabelecido em 75 anos, começando de janeiro de 1943 a dezembro de 2017. Por conta das variabilidades climáticas, para pesquisas de análise de tendência, Robson *et al.* (2000) sugeriram que pelo menos 50 anos de registros sejam utilizados e não mais os 30 de uma normal climatológica.

Inicialmente, a série diária foi transformada em séries mensais e totais anuais, sendo os meses e os anos faltosos respectivamente preenchidos e os dados duvidosos analisados. Em ambos os casos foi aplicado o Método de Regressão Linear Múltipla para consistência dos dados através do *software Hidroplu* (Holanda e Oliveira, 1979). Esta metodologia é utilizada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM em parceria com a Agência Nacional de Águas – ANA, para atender ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH.

A análise exploratória dos dados teve início com uma análise estatística (tendências centrais e dispersivas) e detecção de *outliers* (pontos atípicos). Para verificação dos *outlier* utilizou-se o critério da Amplitude Inter-quartis (AIQ). Em seguida, foi usado o método do Histograma para a análise da distribuição de frequência. Em seguida, elaborou-se um gráfico cartesiano contendo a variabilidade interanual e a respectiva tendência linear da série.

Com as séries mensais e anuais preenchidas e homogeneizadas foi possível compor as duas variáveis hidrológicas previstas nesta metodologia, ou seja, “Precipitação Total Anual - PTA” e o “Período Mais Úmido - PMU”, este último se referindo aos meses de março a julho. Em seguida, os testes estatísticos de *Mann-Kendall e Spearman's Rho* propostos para detecção de tendência, foram aplicados às variáveis hidrológicas. Detalhes sobre esses testes estatísticos podem ser encontrados em Robson *et al.* (2000) e Chiew e Siriwardena (2005).

Segundo Chiew e Siriwardena (2005) os testes estatísticos empregados na detecção de tendências consistem em definir uma hipótese nula “ h_0 ” que pressupõe a não existência de tendência na série de dados, e uma hipótese alternativa “ h_1 ”, para a existência de tendência crescente ou decrescente. A estatística de teste é designada por um valor numérico calculado a partir da série de dados que está sendo testada. Se o valor da estatística de teste é maior do que o valor crítico, “ h_0 ” é rejeitada. Nesse processo, poderão ocorrer dois tipos de erros: O erro tipo I, quando “ h_0 ” é incorretamente rejeitado, e tipo II, quando “ h_0 ” é aceita sendo “ h_1 ” verdadeira.

O meio de medir se a estatística de testes é muito diferente dos valores que normalmente ocorreriam sob “ h_0 ”, é o nível de significância estatística (α). É, portanto, a probabilidade de que o valor crítico ultrapasse a estatística de teste em (α) assumindo que não há tendência na série. Logo, o nível de significância é a probabilidade de um teste detectar uma tendência (rejeitar “ h_0 ”) quando na realidade não existe tendência (erro tipo I) (Chiew e Siriwardena, 2005). Conforme Robson *et al.* (2000), uma possível interpretação do nível de significância pode ser:

- $\alpha > 0,10$ significa pouca evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”;
- $0,05 < \alpha < 0,10$ significa possível evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”;
- $0,01 < \alpha < 0,05$ significa forte evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”;
- $\alpha < 0,01$ significa muito forte evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”.

Para os casos em que os pressupostos dos testes possam ser violados, foi empregado um recurso confiável para determinação do nível de significância e dos valores críticos, conhecido como “Reamostragem” ou *Resampling*. Quando a reamostragem é realizada pelo Método *Bootstrapping*, a série temporal original é reamostrada com reposição para fornecer muitas séries temporais de igual comprimento a dos dados originais. Os dados de cada série temporal reamostrada é obtida por meio de uma seleção aleatória dos valores da série temporal original até que a série reamostrada tenha comprimento de igual ao da série original. Chiew e Siriwardena (2005) recomendaram a geração de 1000 séries reamostradas. O valor do teste estatístico obtido com os dados da série temporal original pode então ser comparado com os valores dos testes estatísticos obtidos a partir das séries reamostradas para estimar o nível de significância. Assim, se

o valor do teste estatístico calculado com os dados originais é superior ao 950^o, maior valor dos testes estatísticos de 1000 séries reamostradas, a hipótese nula, “h₀”, é rejeitada ao nível de significância de 5%.

Kundzewicz e Robson (2004) afirmaram que os pressupostos de que se refere à violação, correspondem à condição de normalidade, homogeneidade e independência, atribuídas aos dados da série. Considerando que as violações às hipóteses nulas “h₀” frequentemente ocorrem quando se trata de séries pluviométricas, decidiu-se, portanto, utilizar a opção da técnica de reamostragem *Bootstrapping*, sugerida por Chiew e Siriwardena (2005). Por ser reconhecido como um método robusto, a aplicação desse recurso tem sido muito utilizada como forma de adequação às características peculiares às séries temporais de chuva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise exploratória dos dados da série anual, tanto as estatísticas descritivas de tendências centrais como as dispersivas, apresentaram-se compatíveis. O critério da Amplitude Inter-quartis (AIQ) não detectou *outlier*. O sumário das estatísticas descritivas e pontos atípicos estão representados na Tabela 1.

Tabelas 1 - Estatísticas descritivas e pontos atípicos da série anual

Sumário estatístico e detecção de <i>outlier</i>			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Média	597,2 mm	Mínimo	140,0 mm
Mediana	622,0 mm	1º quartil	456,5 mm
Desvio padrão	222,2 mm	3º Quartil	726,5 mm
Coef. de curtose	-0,41	Amplitude (AIQ)	270,0 mm
Coef. de assimetria	-0,34	Limite superior	1131,5 mm
Coef. de variação	37%	Limite inferior	51,5 mm
Variância (mm ²)	49382,6	<i>Outlier</i> inferior	Não existe
Máximo	1082,0	<i>Outlier</i> superior	Não existe

Na análise da distribuição de frequência o histograma mostrou-se tendente à normalidade. Quanto à linha de tendência, o gráfico denotou uma reta com coeficiente positivo, sinalizando a possibilidade de detecção de tendência crescente. As Figuras 3 e 4 mostram individualmente os gráficos que serviram à análise exploratória dos dados.

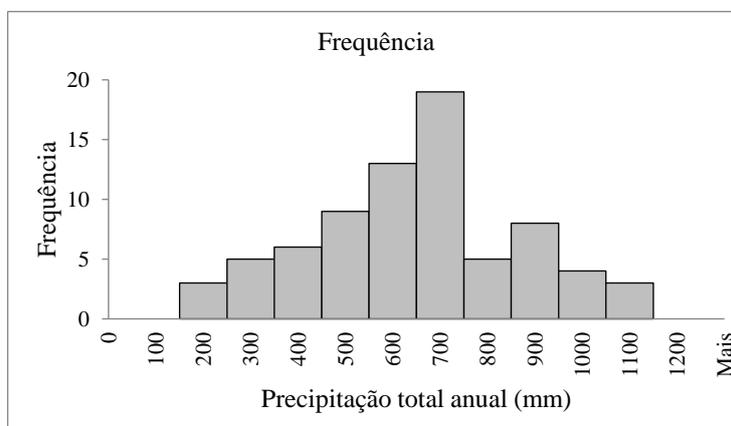


Figura 3 – Análise da distribuição de Frequência

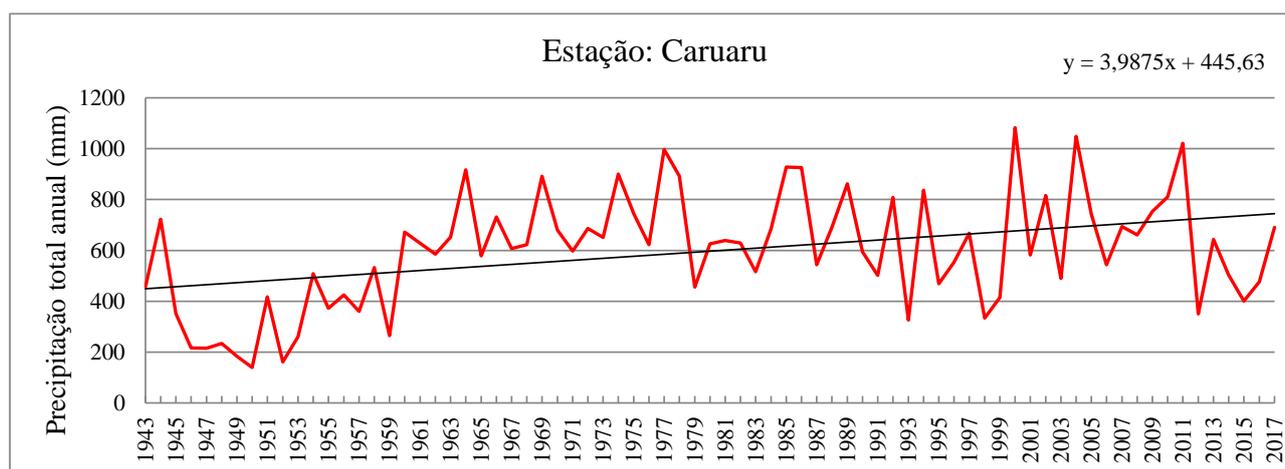


Figura 4 – Análise da variabilidade interanual e linha de tendência da série

Os resultados dos testes estatísticos indicaram tendências positivas para as duas variáveis analisadas, tanto no método *Mann-Kendall* como no *Spearman's Rho*. Entretanto, a PTA identificou significância estatística com “muito forte” evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”, quando $\alpha < 0,01$. Já o PMU, apresentou “forte” evidência contra a hipótese nula “ h_0 ”, quando $\alpha < 0,05$.

Tais condições permitem que se considerem a existência de tendências crescentes na precipitação de Caruaru. Tal revelação mostrou-se de acordo com os resultados obtidos por Haylock *et al.* (2006), Farias e Nóbrega (2010) e Souza e Azevedo (2012), embora contrarie algumas projeções do IPCC (2013), principalmente no que diz respeito ao aumento das secas severas no NEB. As Tabelas 2 e 3 resumem os resultados dos testes aqui realizados.

Tabela 2 – Resultados dos testes estatísticos aplicados à PTA

Métodos	Variável hidrológica	Estatística de teste	Valores críticos (Reamostragem)			Resultado
			$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
			Mann-Kendall	PTA	2,576	
Spearmann-Rho	2,576	1,653	1,930		2,449	Positivo $\alpha<0,01$

Tabela 3 – Resultados dos testes estatísticos aplicados ao PMU

Métodos	Variável hidrológica	Estatística de teste	Valores críticos (Reamostragem)			Resultado
			$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
			Mann-Kendall	PMU	2,576	
Spearmann-Rho	2,576	1,589	1,888		2,586	Positivo $\alpha<0,05$

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos testes estatísticos indicaram tendências crescentes da precipitação na cidade pernambucana de Caruaru. A partir daí, o planejamento dos recursos hídricos da cidade deverá intensificar investimentos referentes ao armazenamento do excesso hídrico, já que se trata de clima semiárido.

Nas áreas urbanas os órgãos competentes deverão reavaliar os projetos de micro e macrodrenagem, com vista à predominância de maiores escoamentos superficiais no futuro. Em casos de chuvas intensas, a Secretaria de Urbanismo e Obras e a Defesa Civil do município deverão alertar para os alagamentos e deslizamento de massas consequentes desses eventos hidrológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC pela disponibilidade da série pluviométrica; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas PQ e pelo financiamento dos projetos MCTI/CNPq N° 14/2014 e MCTI/CNPq/ANA N° 23/201.

REFERÊNCIAS

- Atlas de Desenvolvimento Humano (2013). Disponível em: <http://atlasbrasil.org.br/2013/>. Acessado em 22/06/2018.
- APAC (2018). Agência Pernambucana de Águas e Clima. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>. Acessado em: 21/06/2018
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. G. M. (2012). Análise de Detecção de Tendências no Padrão Pluviométrico na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.2, p.320-331.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; SOUZA, W. M. (2012). Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas do Sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.3, p. 630-645.
- CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. (2005). Trend/Change Detection Software - User Guide. *CRC for Catchment Hydrology*. Austrália.
- CPRM (2005). Diagnóstico do Município de Caruaru - Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado de Pernambuco. Serviço Geológico do Brasil – SGB. CPRM/PRODEEM, Rio de Janeiro-RJ.
- FARIAS, R. F. L.; NÓBREGA, R. S. (2010). Tendência Espacial e Temporal da Precipitação Pluviométrica em Pernambuco. In *Mudanças climáticas e Impactos ambientais*. Org. Galvêncio, J. D. Ed. Universitária, UFPE, Recife-PE, Capítulo 15, p. 251-264.
- HAYLOC, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIACÃO Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; CORONEL, G.; GRACIA, VJ.; 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. *International Journal of Climate*. v.19, p. 1490-1512.
- HOLANDA, C. V. M.; OLIVEIRA, E. (1979). *Programa para Homogeneização de Dados - PROHD*. In *Anais do Simpósio de Hidrologia*, Brasília-DF, p.810-845.
- HOLANDA, R. M.; MEDEIROS, R. M.; LORENA, E. M. G.; KOZMHINSKY.; SILVA, V. P.; MORAIS, A. S. (2017). Flutuabilidade da Evapotranspiração e Evaporação do Município de

Caruaru – PE, Brasil. III Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro, Campina Grande-PB.

IBGE (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>. Acessado em 22/ 06/2018.

IPCC. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. *The Working Group I contribution to the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5)*, Cambridge Univ. Press. Cambridge.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. (2004). Change detection in Hydrological Records - a Review of the Methodology / Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, v.49, p. 7-19.

OBREGÓN, G.; MARENGO, J. A. (2007). Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: *Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas*. Relatório N. 2 do Ministério do Meio Ambiente.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; PINTO, E. J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. M e SOUZA, W. M. (2014). Tendência de Índices Pluviométricos na Bacia do rio Capibaribe-pe e sua Influência na Gestão dos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, vol.07, n.05, p1002-1014.

ROBSON, A.; BÁRDOSSY, A.; JONES, D.; KUNDZEWICZ, Z. W. (2000). Métodos Estatísticos para Testes de Mudanças, Detecting Trend and other Change Hydrological Data. *World Climate Program - Water*, Cap. 5, WCDMP-45, WMO, Genebra, Suíça.

SANTOS, S. M. S.; ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M. (2014). Tendência de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.7, pp. 243-257.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MOREIRA, M.; REAL, J. C.; BARBOSA, R. C. (2015). Rainfall trends over 40 years in the Cobres river basin, Portugal: *variability and impacts*. *Hydrological Sciences and Water Security: Past, Present and Future* (Proceedings of the 11th Kovacs Colloquium, Paris, France, June 2014). IAHS Publ. 366P.

SOUZA, W. M. & AZEVEDO, P. V. (2012) Índice de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.2, p. 320-331.