

Aplicação da análise de recorrência na precipitação diária para o município de Vitória de Santo Antão/PE

Leika I. T. Santana^{1†}, Mickaelle M. A. Pereira², Jucarlos R. Freitas³, Moacyr Cunha Filho⁴, Tatijana Stosic⁵

¹DEINFO-UFRPE.

²DEINFO-UFRPE. E-mail: mickaellealmeida1@gmail.com.

³DEINFO-UFRPE. E-mail: jucarlos123@hotmail.com.

⁴DEINFO-UFRPE. E-mail: moacyr2006@gmail.com.

⁵DEINFO-UFRPE. E-mail: tastosic@gmail.com.

Resumo: Em épocas de chuvas intensas, o acúmulo das águas provenientes desse fenômeno tem prejudicado diretamente a infraestrutura do município de Vitória de Santo Antão/PE, com sérias consequências socioeconômicas, agrícolas e ambientais. Neste trabalho, o objetivo foi analisar e comparar a similaridade das séries de precipitação diária, através do método de análise de gráfico de recorrência (RP) e quantificação de recorrência (RQA), no período anterior (1995 a 2004) e posterior (2005 a 2015) à enchente de 2005, que foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), no período de janeiro de 1995 a dezembro de 2015. Com base nos resultados obtidos, constata-se que o RP exibiu diversas mudanças nas oscilações para as duas séries e que depois de 2005 a dinâmica da chuva passou para um regime menos previsível e com menor tempo de permanência em estados laminares e menor regularidade. Essa diferença está associada ao acúmulo de águas pluviométricas em 2005, 2010, e 2011.

Palavras-chave: Chuvas; Gráfico de recorrência; Análise de quantificação de recorrência.

Abstract: During the periods of heavy rains, the accumulation of water directly affects the infrastructure of the city of Vitória de Santo Antão/PE, with serious socioeconomic, agricultural and environmental consequences. The objective of this work was to analyze and compare the similarity of the daily precipitation series, using the method of recurrence chart analysis (RP) and recurrence quantification (RQA), for the periods before (1995 to 2004) and after (2005 to 2015) of 2005 flood, which were made available by the Pernambuco Water and Climate Agency (APAC), from January 1995 to December 2015. Based on the results obtained, it was verified the RP exhibited several changes in the oscillations for the two series and that after of 2005 the rainfall dynamics changed to a less predictable regime and with a shorter residence time in laminar states and smaller regularity. This difference is associated with the accumulation of rainwater in 2005, 2010, and 2011.

Keywords: Rainfall; Recurrence plot; Recurrence quantification analysis.

Introdução

A análise das condições climáticas e as mudanças relacionadas a mesma é de suma importância para sociedade, pois ajuda no equilíbrio do ecossistema, na agricultura e, de maneira indireta, no setor produtivo (DE LUCENA; STOSIC; FILHO, 2015). Essas mudanças realizam uma importante influência em relação as atividades humanas modificando a temperatura, a precipitação e a frequência de eventos extremos como a seca ou chuvas intensas (SOUZA; AZEVEDO, 2012). De acordo com Almazroui et al. (2012), a precipitação é uma das variáveis climáticas mais relevantes na descrição das mudanças climáticas de um local.

†Autora correspondente: leikatenorio10@gmail.com.

O Nordeste brasileiro é caracterizado por diferentes sistemas de chuvas, ocasionando uma grande diversidade climática. Para o clima semiárido, presente no interior da região, a precipitação média anual é abaixo de 500 mm, já no clima tropical é acima de 1500 mm, se destacando a costa leste da Região, em que o período com maior índice pluviométrico se concentra nos meses de abril, maio e junho (SANTOS; SANTOS; COUTINHO, 2013). O estado de Pernambuco apresenta uma variabilidade climática bastante notável, nele concentra-se a região do sertão, agreste, zona da mata e litorânea, essas regiões apresentam índices de precipitação bastante diferenciados. Em particular o município de Vitória de Santo Antão situado na zona da mata cerca de 50 km da capital pernambucana é caracterizado por um clima tropical tipo As', conforme a classificação climática de Köppen esse clima é quente e úmido do tipo tropical (SILVA et al., 2010).

Ao longo das últimas décadas foram explorados os métodos de gráfico de recorrência (RP) e análise de quantificação de recorrência (RQA) para visualizar e analisar a trajetória de um sistema dinâmico no espaço de fase. Segundo a literatura, podemos destacar aplicações nas áreas de Astrofísica (ZOLOTOVA; PONYAVIN, 2006), Biologia (MANETTI et al., 2001), Ciência da terra (MARWAN; THIEL; NOWACZYK, 2002), entre outros.

Em um estudo extensivo, Marwan et al. (2003), aplicaram estes métodos com o objetivo de comparar e analisar o período de escorregamentos recente (dados modernos) com 30.000¹⁴C (Carbono-14) anos atrás (paleo-precipitação) no Noroeste dos Andes Argentinos. Diante desta perspectiva o objetivo do trabalho consiste em aplicar o método de gráfico de recorrência nos dados de precipitação coletados no Posto 26 - IMA, com o intuito de comparar e analisar a similaridade da variabilidade temporal da precipitação antes (1995-2004) e depois (2005-2015) da enchente de 2005, no período de 1995 a 2015. De acordo com Miranda (2015) o município de Vitória de Santo Antão passou por chuvas com os índices de precipitação mais elevadas nos anos de 2005, 2010 e 2011, implicando assim, em enchentes na região.

Metodologia

Caracterização da área

O Município de Vitória de Santo Antão situa-se no estado de Pernambuco, localizado na região Nordeste do país, de coordenadas geográficas 35° 17' 29" longitude Oeste e 8° 6' 50" latitude Sul. A região ocupa uma área de 335,941 km² com população estimada de 137.915 habitantes (disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>. Acessado em 29/04/2019).

Dados

O conjunto de informações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho refere-se aos registros pluviométricos do posto de monitoramento Posto 26 - IMA anterior (1995-2004) e posterior (2005-2015) à enchente de 2005, localizado no município de Vitória de Santo Antão - PE, que foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), no período de janeiro de 1995 a dezembro de 2015. Na base inicial de dados constavam nove postos de monitoramento, em que oito não foram integrados à análise, pois não foi possível ter acesso completo aos dados, inviabilizando a análise. Do posto 26, estávamos interessados em comparar e analisar os registros pluviométricos para o município de Vitória de Santo Antão/PE antes e depois da enchente de 2005. Cada série original de precipitação P^* foi normalizada entre 0 e 1, conforme

$$P^* = \frac{P - \min(P)}{\max(P) - \min(P)} \quad (1)$$

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 114-120, 2019.

64^a Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).

18^o Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica (SEAGRO).

em que P representa as séries, $\min(P)$ e $\max(P)$ são o mínimo e máximo de P . Esta forma de normalização antes de aplicar o método gráfico de recorrência foi recomendada na literatura (BASTOS; CAIADO, 2011). Para as análises de RP e RQA utilizou-se o software R (R Core Team 2018).

Gráfico de recorrência

Eckmann, Kamphorst e Ruelle (1987) introduziram uma ferramenta para facilitar a visualização da trajetória de um sistema dinâmico no espaço de fase denominada Gráfico de Recorrência (RP). A matriz de recorrência $N \times N$ é definida como

$$R_{ij} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \quad i, j = 1, \dots, N \quad (2)$$

onde N é o número de pontos medidos \vec{x}_i , ε é o limiar da vizinhança, $\Theta(\cdot)$ é a função Heaviside e $\|\cdot\|$ é uma norma. Conforme o teorema de Taken (TAKENS, 1981), os vetores do espaço de fase \vec{x}_i e \vec{x}_j da série temporal u_i podem ser reconstruídos, empregado uma dimensão de imersão m e um de atraso de tempo τ ; $\vec{x}_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau})$, obtendo os parâmetros m e τ pelos métodos de vizinhos falsos mais próximos e informação mútua, respectivamente (KANTZ; SCHREIBER, 2004). Note que, se $\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \leftrightarrow R_{ij} = 1$ obter-se pontos pretos no RP, caso contrário, $\vec{x}_i \not\approx \vec{x}_j \leftrightarrow R_{ij} = 0$ (pontos brancos). Os RPs são divididos em várias estruturas: sistemas periódicos são sistemas oscilantes que apresentam diagonais paralelas a diagonal principal, sistemas estacionários apresentam gráficos homogêneos, *drift* é um gráfico que apresenta uma ausência de pontos recorrentes tanto no canto superior esquerdo quanto no inferior direito, por causa dos parâmetros que variam lentamente, o gráfico descontínuo é causado por mudanças repentinas na dinâmica, ocorrendo o surgimento de faixas brancas. Assim os RPs fornecem muitas informações sobre o sistema dinâmico (MARWAN et al., 2007).

Análise de quantificação de recorrência

A análise de quantificação de recorrência (RQA) foi inicialmente desenvolvida por (ZBILUT; WEBBER JR, 1992) e aprimorada por (MARWAN et al., 2002). As medidas quantitativas são: densidade dos pontos de recorrência (taxa de recorrência - RR), percentual de pontos recorrentes formando a estrutura diagonal (determinismo - DET), o tempo médio de previsão, que é fornecido pela medida do comprimento médio das linhas diagonais (L), o comprimento máximo das linhas diagonais (L_{max}), Entropia de Shannon (ENTR), medida da complexidade do RP em relação a estrutura diagonal, laminaridade (LAM) relacionando as estruturas verticais e horizontais e medida do tempo médio onde o sistema permanece em um estado específico, conhecido como tempo de permanência (TT).

Resultados

Na Figura 1, são analisadas as precipitações diárias do Posto 26 antes e depois à enchente de 2005 para o Município de Vitória de Santo Antão. De acordo com o posto analisado, identificou-se que o início das chuvas mais intensas ocorreu no início de Maio até final de Setembro. Dentre os nove anos analisados, para o período de Janeiro a Dezembro dos anos de 2010 a 2012, foram observados os maiores quantitativos de chuva na região. Em 2010 Figura 1, pode-se destacar que ocorreram precipitações significativamente acima da média, principalmente em Junho com acúmulo de 378,7mm, resultado também corroborado pelo trabalho de Miranda (2015), que afirma que o município de Vitória de Santo Antão passou por chuvas com os índices de precipitação mais elevadas nos anos de 2005, 2010 e 2011, implicando assim, em enchentes na região.

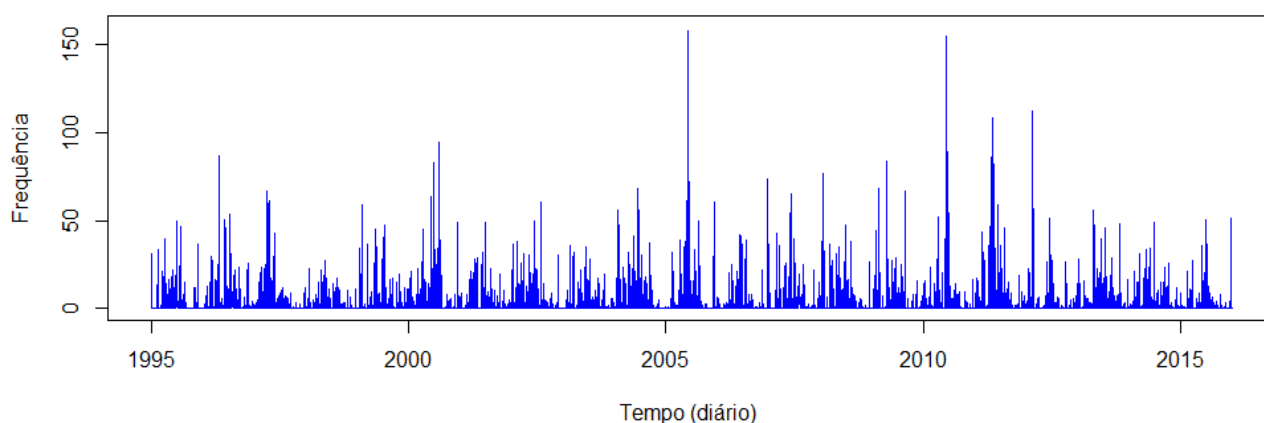


Figura 1: Precipitação diária (mm) do Posto 26 no período de Janeiro de 1995 a Dezembro de 2015, em Vitória do Santo Antão - PE.

Os RPs foram explorados repetidas vezes até o valor de RR entre 2-5% (COCO; DALE, 2014), sendo encontrado $\varepsilon = 0,014$ para antes e $\varepsilon = 0,002$ para depois, os outros parâmetros encontrados são $m = 6$ para antes e $m = 4$ para depois e o tempo de atraso foi de $\tau = 1$ para ambas as séries. De acordo com a Figura 2, pode-se observar em ambos os sistemas o gráfico de recorrência apresentou mudanças repentinas, bem como eventos extremos, ou seja, surgimentos de faixas brancas, indicando assim, que a precipitação antes e depois são não estacionárias. Observamos faixas brancas que se destacam na Figura 2(a) no período de 1996 a 1997 e no período de 1999 a 2000, na Figura 2(b) no período de 2007 a 2008 e no período de 2013 a 2014, onde podemos observar na Figura 1 as oscilações de chuvas. Vale ressaltar que, os RPs não possuem linhas diagonais longas, implicando em um comportamento estocástico das séries analisadas. Além disso, apresenta linhas verticais e horizontais indicando um comportamento típico do estado laminar (intermitentes), onde o estado não muda, ou muda lentamente no decorrer do tempo, esse resultado está associado à variabilidade dos dados (Figura 1). Um estudo extensivo realizado por Andreoli e Kayano (2007) e Marques da Silva et al. (2010), afirmaram que essas alterações ao longo dos anos podem ser examinadas pela mudança climatológica como sendo relacionados aos eventos El Niño e La Niña, que influenciam no aquecimento ou esfriamento do mar.

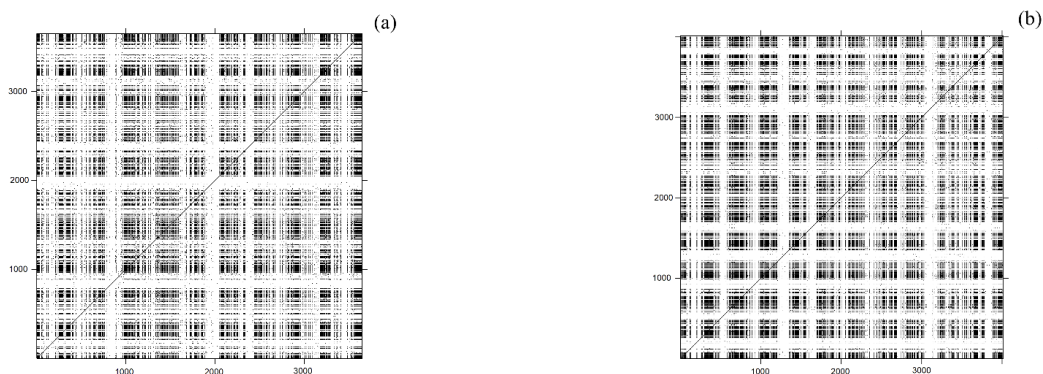


Figura 2: Gráficos de Recorrência de precipitação para períodos 1995-2004(a) e 2005-2015(b)

A partir da Tabela 1 podemos observar os resultados de análise de quantificação de recorrência. Ambos os sistemas possuem baixa densidade nos pontos de recorrência, o percentual de pontos recorrentes na estrutura diagonal em ambos foi relativamente alto, com tempo médio de previsão baixo e o comprimento máximo da linha diagonal foi baixo, assim, as trajetórias divergiram rápido. A complexidade das séries foi baixa, indicando ruído não correlacionados, a ocorrência de estados laminares em ambas as séries foi alta, como pode-se verificar na Figura 2, os RPs são formados por estruturas verticais (horizontais) e não por pontos únicos, o tempo médio de permanência dos sistemas em um estado específico foi relativamente baixo. Comparando os valores de RQA para duas séries, podemos observar que depois de enchente em 2005, a precipitação mudou o comportamento dinâmico para menos recorrente (menor RR), menos previsível (menor DET), menos complexo (menor ENTR), com menor tempo de permanência em estados laminares (menor TT) e com trajetórias que divergem mais rápido em espaço de fase (menor LMAX).

Tabela 1. Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) de precipitação para períodos (1995-2004) e (2005-2015).

	RR	DET	L	LMAX	ENTR	LAM	TT
1995-2004	0,096	0,955	5,536	55	2,354	0,946	9,314
2005-2015	0,089	0,889	4,366	38	2,027	0,938	7,177

Conclusão

Conclui-se que ambos os sistemas tiveram mudanças repentinas nos RPs, devido as oscilações dos índices de chuva ao longo do tempo, acarretou no surgimento de áreas brancas, indicando que os dados são não estacionários. As séries antes e depois da enchente tem um comportamento estocástico, e apresentam as diferenças em evolução no espaço de fase. Depois de 2005, a probabilidade de recorrência, previsibilidade e tempo de permanência nos estados laminares diminuíram, indicando mudanças na variabilidade temporal da chuva.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia – CNPq.

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 114-120, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).

18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica (SEAGRO).

Referências Bibliográficas

- ALMAZROUI, M.; ISLAM, M. N.; JONES, P. D.; ATHAR, H.; RAHMAN, M. A. Recent climate change in the Arabian Peninsula: seasonal rainfall and temperature climatology of Saudi Arabia for 1979–2009. *Atmospheric Research*, v. 111, p. 29-45, 2012.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, n. 1, p. 63-74, 2007.
- BASTOS, J. A.; CAIADO, J. Recurrence quantification analysis of global stock markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 390, n. 7, p. 1315-1325, 2011.
- COCO, M. I.; DALE, R. Cross-recurrence quantification analysis of categorical and continuous time series: an R package. *Frontiers in psychology*, v. 5, p. 510, 2014.
- DE LUCENA, L. R. R.; STOSIC, T.; FILHO, M. C. Avaliação da precipitação diária do estado de Sergipe utilizando análise de lacunaridade. *Rev. Bras. Biom*, v. 33, n. 2, p. 268-276, 2015.
- ECKMANN, J. P.; KAMPHORST, S. O.; RUELLE, D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. *EPL (Europhysics Letters)*, v. 4, n. 9, p. 973-977, 1987.
- KANTZ, H.; SCHREIBER, T. *Nonlinear time series analysis*. Cambridge university press, 2004.
- MANETTI, C.; GIULIANI, A.; CERUSO, M. A.; WEBBER JR, C. L.; ZBILUT, J. P. Recurrence analysis of hydration effects on nonlinear protein dynamics: multiplicative scaling and additive processes. *Physics Letters A*, v. 281, n. 5-6, p. 317-323, 2001.
- MARWAN, N.; THIEL, M.; NOWACZYK, N. R. Cross recurrence plot based synchronization of time series. *arXiv preprint physics/0201062*, 2002.
- MARWAN, N.; TRAUTH, M. H.; VUILLE, M.; KURTHS, J. Comparing modern and Pleistocene ENSO-like influences in NW Argentina using nonlinear time series analysis methods. *Climate Dynamics*, v. 21, n. 3-4, p. 317-326, 2003.
- MARWAN, N.; ROMANO, M. C.; THIEL, M.; KURTHS, J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics reports*, v. 438, n. 5-6, p. 237-329, 2007.
- MARWAN, N.; WESSEL, N.; MEYERFELDT, U.; SCHIRDEWAN, A.; KURTHS, J. Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. *Physical review E*, v. 66, n. 2, p. 026702, 2002.
- MIRANDA, M. R. B. D. *Análise da vulnerabilidade a inundações no médio curso do Rio Tapacurá Cidade de Vitória de Santo Antão-PE*. Dissertações de Mestrado - Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2015.

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 114-120, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).

18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. 2019. URL <http://www.R-project.org/>.

SANTOS, P. V. dos; SANTOS, R. dos; COUTINHO, M. D. L. Detecção de mudanças climáticas através de índices pluviométricos diários no Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 4, p. 713-731, 2013.

SILVA, R. M. de; SILVA, L. P. e; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n. 2, 2010.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE (Detection Indexes Derived from Climate Change Rainfall and Temperatures in Recife-PE). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, n. 1, p. 143-159, 2012.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. p. 366-381.

ZBILUT, J. P.; WEBBER JR, C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics letters A*, v. 171, n. 3-4, p. 199-203, 1992.

ZOLOTOVA, N. V.; PONYAVIN, D. I. Phase asynchrony of the north-south sunspot activity. *Astronomy&Astrophysics*, v. 449, n. 1, p. L1-L4, 2006.

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 114-120, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).