ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Variabilidade espaço-temporal e identificação de Eventos Extremos de Descargas Atmosféricas no Estado de São Paulo durante o Verão

Ana Paula Paes dos Santos[1], Osmar Pinto Júnior[2], Everaldo Barreiros de Souza[3], Rodrigo Azambuja[4], Sérgio Rodrigo Quadro dos Santos[5].
[1,4,5]Doutorandos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos-SP;
[1]E-mail: ana.santos@inpe.br
[2]Pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos-SP.
[3]Pesquisador Associado no Instituto Tecnológico Vale (ITV) – Belém-PA.

Artigo recebido em 15/02/2016 e aceite em 19/04/2016

R E S U M O

Dada a grande incidência de descargas atmosféricas e aos diversos tipos de danos proporcionados por tal fenômeno no estado de São Paulo, o presente trabalho dedica-se a análise das descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo durante o verão. Com base nos dados da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) para o período de 16 anos (1999 a 2014), foram analisados os padrões espaço-temporais e identificados os eventos extremos das ocorrências de descargas. A tendência da incidência de descargas foi calculada utilizando o método não paramétrico de Mann-Kendall, e os eventos extremos foram determinados usando a técnica dos Percentis. Os resultados da análise da variabilidade espacial mostraram que há uma alta concentração de descargas na região centro-leste do estado. Observou-se que há uma tendência crescente da incidência de descargas, com significância estatística de 90%. Os eventos extremos ocorreram nos anos de 2010, 2013 e 2014, associados a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).
Palavras-chave: Descargas atmosféricas, eventos extremos, São Paulo.

Spatiotemporal variability and identify Extreme Events of Lightning in the State of São Paulo during the Summer

A B S T R A C T

Given the high incidence of lightning and the various types of damage caused by this phenomenon in the state of São Paulo, this work is dedicated to analysis of the lightning cloud-to-ground during the summer. Based on data from the Integrated National Lightning Detection Network (RINDAT) and the Brazilian Lightning Detection Network (BrasilDAT) for the period of 16 years, from 1999 to 2014, the spatiotemporal patterns were analyzed and identified the occurrences of extreme events. The trend in the incidence of lightning was calculated using the non-parametric method of Mann-Kendall and extreme events were determined using the technique of Percentiles. The results of the analysis of the spatial variability showed a high concentration of lightning in the central-eastern part of the state. It was observed an increasing trend in the incidence of lightning with statistical significance of 90%. Extreme events occurred in the years 2010, 2013 and 2014 associated with the performance of South Atlantic Convergence Zone (SACZ).

Keywords: Lightning, extreme events, São Paulo.

Introdução

Nos últimos anos, a comunidade científica têm se dedicado ao estudo da climatologia das descargas atmosféricas nuvem-solo – NS, [e.g. Golfo do México, Flórida, Arquipélago da Indonésia (Christian et al., 2003); Himalaia, Cordilheira dos Andes, norte da Colômbia (Christian et al., 2003); Estados Unidos (Schultz, et al., 2005b); Alasca, Canadá e Estados Unidos (Orville, et al., 2011); Áustria (Schulz el at., 2005a); República do Congo (Collier et al., 2006); Madagascar (Collier et al., 2006 e Bovalo et al., 2012); Brasil (Pinto Jr, et al., 2006); Cárpatos (Antonescu e Burcea, 2010); leste da África (Bovalo et al., 2012); entre outros estudos] pois, embora a maior parte das descargas não tenha contato com a superfície do planeta (Rakov e Uman, 2003), são aquelas que atingem o solo que provocam danos significativos em estruturas construídas pelo homem e fatalidades. Estes danos caracterizam-se por desligamentos das linhas distribuição de energia elétrica, avarias em torres de telecomunicações e edifícios, queima de equipamentos eletrônicos, entre outros, causando prejuízos à sociedade estimados em 500 milhões de dólares por ano (Pinto Jr, 2005; 2009). Além disso, as descargas atmosféricas podem ser fatais quando atingem seres humanos, sendo a segunda maior causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta (Cardoso et al., 2014).

Desta forma, o desenvolvimento de estudos climatológicos de identificação das áreas de maior incidência de descargas e períodos preferenciais de ocorrência torna-se relevante, cujas informações são potencialmente úteis ao planejamento de medidas preventivas, visando a minimização dos impactos.

O Brasil, devido a sua grande extensão territorial, apresenta uma grande variabilidade espaço-temporal da ocorrência de descargas, em escala regional e sub-regional. A ampla diversidade da densidade de descargas que caracteriza o sudeste do País é resultado de vários fatores que atuam isoladamente ou em conjunto, determinando os padrões climáticos da região.

Estudos já mostraram que nesta região existem faixas preferencias com alta concentração de descargas no centro-sul do Estado de Minas Gerais, centro-leste de São Paulo e no Rio de Janeiro, com densidade máxima ocorrendo entre a região metropolitana de São Paulo, centro-sul do Rio de Janeiro e sudeste de Minas Gerais (Naccarato, 2005).

Pinto Jr. et al. (2013) analisando as tendências do número de trovoadas que ocorreram desde o século XIX até o presente nesta região, observaram que, para as cidades de São Paulo e Campinas houve um aumento significativo na atividade de tempestades durante o período, simultaneamente a um aumento da temperatura em superfície, bem correlacionada com o crescimento da população das cidades. Já para a cidade do Rio de Janeiro, não foi observada uma tendência positiva significativa, apesar de um aumento da temperatura da superfície, o que sugere que variações observadas são mais provavelmente decorrentes de uma conjugação complexa de características locais e de grande escala.

Diante do exposto, o presente estudo faz uma análise da variabilidade espaço-temporal, das tendências e dos eventos extremos de descargas atmosféricas no Estado de São Paulo, compreendendo o período de 1999-2014, com o objetivo de identificar padrões climatológicos e ocorrência de eventos extremos de descargas para este Estado.

A importância do desenvolvimento deste tipo de estudo para São Paulo é reforçada pelo Estado apresentar os maiores índices de urbanização e grande importância no cenário econômico e social do País. Os resultados obtidos poderão servir de embasamento para a construção e aperfeiçoamento de sistemas de alerta, em curto e longo prazo, para o planejamento de medidas preventivas visando minimizar os impactos causados por este fenômeno.

Material e métodos

Os dados de descargas atmosféricas do tipo NS utilizados neste trabalho são provenientes da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) para o Estado de São Paulo, no Sudeste do Brasil.

Foram considerados 16 anos de dados, correspondentes ao período de 1999-2014, dos quais, os dados de 1999-2010 são da rede RINDAT e os dados de 2011-2014 são da rede BrasilDAT. A série temporal foi analisada com o objetivo de identificar padrões climatológicos de densidade de descargas, em uma resolução espacial de 5 km de latitude x 5 km de longitude, tendências observadas da atividade elétrica sobre este Estado e a identificação de eventos extremos.

Para análise da tendência dos dados observados, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall. Este método foi utilizado devido o mesmo não necessitar que a

série de dados apresente uma distribuição normal (gaussiana) a qual, é uma característica dos dados de descargas atmosféricas, e devido também ao seu resultado ser menos influenciado por valores *outliers*, visto que seu cálculo é baseado no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores da variável.

Originalmente criado por Mann (1945) e reformulado por Kendall (1948), o teste consiste em comparar cada valor da série de dados com os valores seguintes, calculando o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado. O teste não paramétrico é usado para analisar a existência de uma tendência monotônica crescente ou decrescente e é o método mais apropriado para analisar alterações climáticas em séries de dados climatológicos (Goossens e Berger, 1986). O teste estatístico de Mann-Kendall é determinado da seguinte forma:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{VAR\,(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{VAR\,(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

(Eq.1)

em que,

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sign(x_j - x_k)$$

(Eq.2)

Em que x_j e x_k são valores (anuais/sazonais/mensais) nos anos j e k (para $j > k$), respectivamente; n é o tamanho da série de dados; e a função *sign* é a variância de S, denotada por [VAR(S)], assume o valor de 1 quando $x_j - x_k > 0$; 0 quando $x_j - x_k = 0$; e -1 quando $x_j - x_k < 0$, e é definida por:

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

(Eq.3)

E quando há repetições de dados, a variância assume a expressão:

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{g} t_p\,(t_p - 1)(2t_p + 5)\right]$$

(Eq.4)

onde g é o número de grupos com dados repetidos e t_p é o número de dados no p-ésimo grupo. Para análise da tendência utiliza-se o valor de Z, no qual, o valor positivo (Z > 0) refere-se a uma tendência crescente e o valor negativo (Z < 0) refere-se a uma tendência decrescente.

Estimou-se também a inclinação e magnitude da tendência dos dados observados das descargas atmosféricas, utilizando o método não paramétrico de Sen (Sen, 1968; Sneyers, 1975). O método utiliza um modelo linear para estimar a inclinação da tendência e da variância dos resíduos, sendo constante no tempo. O teste foi utilizado por ser insensível aos valores de *outliers*, provendo uma medida mais realística das tendências em uma série temporal de dados, o que o torna mais rigoroso que a usual regressão linear. O método é determinado por:

$$f(t) = Qt - B$$

(Eq.5)

onde Q é o valor referente a inclinação da reta e B é uma constante.

Para obter a estimativa de inclinação Q, primeiro calculam-se as inclinações de todos os pares de dados, definidos por:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

(Eq.6)

para $j > k$.

Caso a série temporal seja composta por n valores x_j, obtêm-se $N=n(n-1)/2$ estimativas de

inclinação *Qi*. Deste modo, a inclinação estimada pelo método Sen é a mediana dos valores *N* de *Qi*, os quais são classificados em ordem crescente e a estimativa Sen é dada por:

$$Q = Q_{[(N+1)/2]}$$

se N for ímpar, e

$$Q = \frac{1}{2}(Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]})$$

se N for par.

(Eq.7)

Para obter uma estimativa de B na Eq. 5, são considerados *n* valores da diferença x_i-Q_{ti}. Outros trabalhos que também utilizaram os métodos de Mann-Kendall e da estimativa de inclinação Sen foram Fan e Wang (2011), Oliveira (2011), Silva e Derecznski (2014).

Na classificação dos casos extremos, realizada com o objetivo de caracterizar os eventos com maior ocorrência de descargas, foi utilizada a técnica dos percentis (quantis) proposta por Pinkayan (1966). Amplamente utilizada por Xavier (2001), esta técnica baseia-se na distribuição da frequência acumulada, sendo que a aproximação da função densidade de probabilidade que descreve o fenômeno é tanto melhor quanto maior é o número de observações disponíveis. Os intervalos de cada percentil representam as probabilidades ou frequências esperadas para cada um dos eventos que podem ocorrer na sequência da série temporal de uma variável *x*. Esta metodologia consiste estritamente na distribuição em ordenamento crescente de uma série amostral contínua. Neste trabalho a série está constituída pelos totais de descargas NS (anuais, sazonais e mensais), sendo atribuída uma probabilidade *p* univocamente a cada valor amostral (Xavier, 1999; Xavier et al., 2002). Assim, a série temporal pode ser distribuída sob a forma {*x1*, *x2*, *x3*, ..., *xn*}, na qual *x1* representa o menor valor e *xn* o maior valor da série. O índice *n*, portanto, representa o tamanho da amostra. Por fim, são calculados os quantis sendo que, neste caso em particular, percentis, visto que a divisão considera cem partes. A seguir, são obtidas as ordens quantílicas e a classificação em grupos propriamente dita (Lopes et al., 2013). Este trabalho utilizou a ordem quantílica Q0,98 para estabelecer a classe "extrema" em relação aos valores observados (*xi*) de descargas NS.

O método dos percentis permite selecionar de forma objetiva e rápida os eventos climáticos anômalos e de interesse para estudo em um determinado período. Ressalta-se que, no cálculo do trimestre DJF do primeiro ano em estudo, 1999, foram considerados apenas os meses de janeiro, fevereiro, uma vez que os dados de descargas registrado em dezembro de 1998 não constava na base de dados. Na análise dos resultados ficou evidente que o uso de dois meses apenas, não alterou o resultado da classe para este trimestre, já que para 1999 o número de descargas desse trimestre ficou bem próximo daquele observado nos anos seguintes.

Resultados e discussão

A Figura 1a apresenta a densidade média da ocorrência de descargas NS para o Estado de São Paulo durante o verão. Observa-se que há um padrão de maior densidade de descargas ocorrendo no centro-leste do Estado, e máximos sobre a capital e região metropolitana de São Paulo, superior a 5,5 decargas.km^{-2}.ano^{-1}. A maior densidade de descargas observada no centro-leste de São Paulo está associada à topografia do Estado, composta por maior elevação nesta região, favorecendo o desenvolvimento de convecção orográfica. Já o máximo observado sobre a capital e região metropolitana está associado ao efeito de ilha de calor urbana, conforme relatado por Farias et. al., (2012). A Figura 1b apresenta a variabilidade espacial das descargas de polaridade positiva, onde se pode observar que o máximo de densidade em torno de 0,4 decargas.km^{-2}.ano^{-1} ocorre no sul do Estado, provavelmente devido ao maior número de sistemas convectivos de larga escala vindos do sul do continente que atingem esta região. Estes sistemas tendem a apresentar maior percentual de descargas de polaridade positiva. O percentual destes sistemas que atingem uma dada latitude diminui com a diminuição da latitude. Já a variabilidade espacial das descargas de polaridade negativa (Figura 1c) apresenta um padrão semelhante ao de total de descargas, observado na Figura 1a.

A Figura 2a apresenta a distribuição temporal dos totais de descargas NS durante o verão. Observa-se uma tendência crescente, com magnitude de +6700 descargas/ano com significância estatística de 90%. Os eventos que ultrapassaram o limiar do percentil 85,

identificados como eventos extremos, ocorreram nos anos de 2010, 2013, e 2014. A distribuição temporal das descargas durante os meses do verão é apresentada na Figura 2b, com destaque (hachurado em vermelho) para os eventos extremos. Verifica-se que durante os casos extremos, nem todos os eventos apresentaram os três meses da estação com incidência de descargas elevadas. Em 2010, apesar do mês de dezembro ter um número expressivo de descargas, janeiro foi mais significativo dentre os três meses. Em 2013, os meses de dezembro e fevereiro apresentaram grande incidência de descargas, representando os valores máximos de toda a série. Já em 2014, os meses de dezembro e fevereiro apresentaram baixa incidência de descargas, no entanto, o máximo observado em janeiro fez com que o total sazonal fosse classificado com evento extremo.

Em todos estes meses de elevada incidência de descargas, havia um padrão de

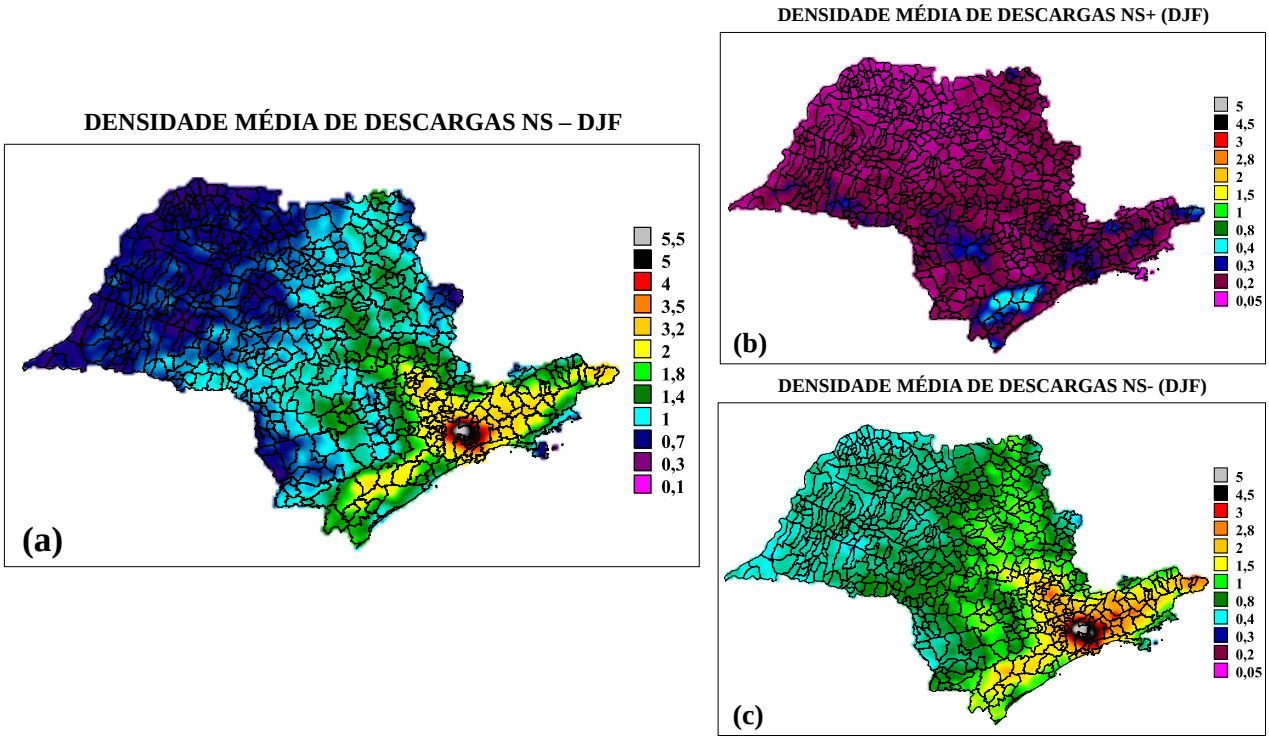

Figura 1. Densidade média de descargas atmosféricas NS no trimestre de DJF (verão) para o Estado de São Paulo, durante o período de 1999-2014, considerando: (a) total de descargas; (b) descargas com polaridade positiva; (b) descargas com polaridade negativa.

nebulosidade, orientada no sentido noroeste-sudeste do Brasil, que para este período do ano associou-se a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) - figuras não mostradas.

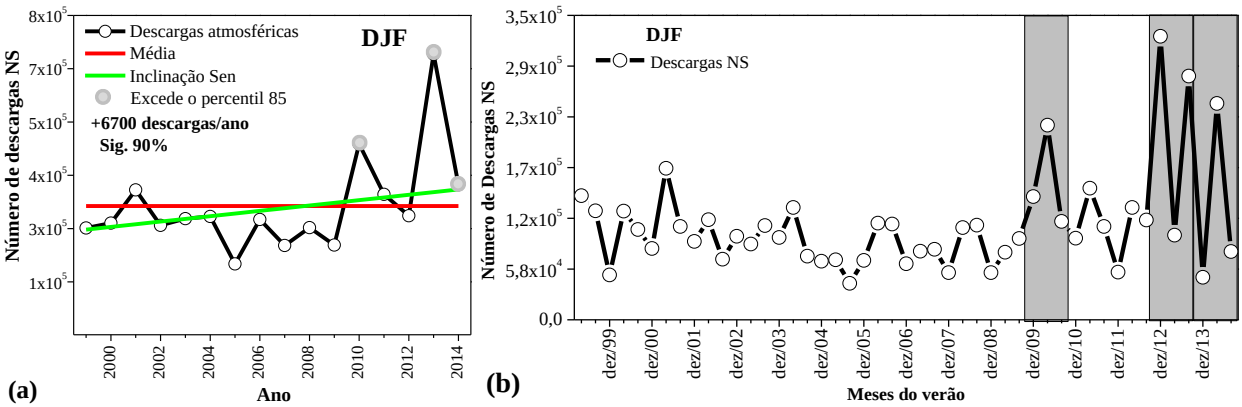

Figura 2. Variabilidade temporal das descargas atmosféricas NS no trimestre de DJF (verão) para o Estado de São Paulo, durante o período de 1999-2014, considerando: (a) total do trimestre DJF; (b) total mensal.

Conclusões

O presente trabalho abordou o estudo das descargas NS no verão sobre o estado de São Paulo, tendo por base a série de dados de descargas compreendendo o período de 1999–2014. Foram feitas análises da variabilidade espaço-temporal, e identificado tendências e eventos extremos utilizando os métodos de Mann-Kendall/Inclinação Sen e Percentil, respectivamente.

Os resultados mostraram que a maior concentração de descargas ocorreu no centro-leste de São Paulo, associadas à topografia do Estado, e máxima densidade sobre a capital e região metropolitana, associado ao efeito de ilhas de calor urbana. Na distribuição espacial da polaridade das descargas, observou-se que as descargas positivas ocorrem em maior concentração sobre o sul do estado e as negativas apresentam um padrão semelhante ao de total de descargas, com maior densidade sobre o centro-leste do estado.

Na variabilidade temporal, observou-se uma tendência crescente de incidência de descargas com significância estatística de 90%.

Os eventos extremos ocorreram nos anos de 2010, 2013 e 2014, associados a atuação da ZCAS.

Os resultados obtidos neste trabalho podem servir de embasamento para estudos relacionados a esta área, bem como subsídios para o conhecimento das ocorrências de eventos extremos de descargas NS em São Paulo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE) e ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

Antonescu, B., Burcea, S., 2010. A cloud-to-ground lightning climatology for Romania. Mon. Weather Rev 138, 579–591.

Bovalo, C., Barthe, C., Bègue, N. 2012. A lightning climatology of the South-West Indian Ocean. Natural Hazards and Earth System Science 12, 2659-2670.

Cardoso, I., Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A., 2014 Holle, R. Lightning casualty demographics in Brazil and its implications to safety rules. Atmospheric Research 135-136, 374-379.

Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L.,Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M.,Koshak, W. J., Mach, D. M., and Stewart, M. F. , 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, J. Geophys. Res 108, 4005, doi:10.1029/2002JD002347.

Collier, A. B., Hughes, A. R. W., Lichtenberger, J., and Steinbach, P., 2006. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over Southern Africa and correlation with European whistler observations, Ann. Geophys 24, doi:10.5194/angeo-V.24, 529-542.

Fan, X. H; Wang, M.B. Change trends of air temperature and precipitation over Shanxi Province, China., 2011. Theoretical and applied climatology 103, 519-531.

Farias, W. R. G. Pinto, O., Naccarato, K. P., & Pinto, I. R. C. A., 2009.Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. Atmospheric Research 91, 485-490.

Goossens, C.; Berger, A., 1986. Annual and seasonal climatic variations over the orthern hemisphere and Europe during the last century. Annales Geophysicae, Berlin 4, 385-400.

Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods. 4 ed. London: Charles Griffin.

Lopes, M. N. G., De Souza, E. B., Ferreira, D. B. S., 2013. Climatologia Regional da Precipitação no Estado do Pará. Revista Brasileira de Climatologia 12.

Luiz Silva, W.; Dereczynski, C. P., 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências 37, 123-138.

Mann, H.B., 1945. Non-parametric tests against trend. Econometrica, 245-259.

Naccarato, K.P., 2005. Análise das Características dos Relâmpagos na Região Sudeste do Brasil. Tese (Doutorado). São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Oliveira, R.A.J., 2011. Análise das Tendências da Precipitação sobre o Brasil e Impactos do Desmatamento no Regime de Chuvas na Amazônia Legal. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Orville, R. E., Huffines, G. R., Burrows, W. R., Cummins, K. L., 2011. The North American lightning detection network (NALDN)-Analysis of flash data: 2001-09. Monthly Weather Review 139, 1305-1322.

Pinkayan, S. 1966. Conditional Probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. Hydrology Papers. Colorado State University.

Pinto Jr, O., 2005 A Arte da guerra Contra os Raios. Ed. Oficina de Textos. São Paulo.

Pinto, Jr., O., Naccarato, K. P., Pinto, I. R. C. A., Fernandes, W. A., & Neto, O. P., 2006. Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location systems. Geophysical research letters 33.

Pinto Jr, O.; Pinto, I. R. C. A.; Ferro, M.A.S., 2013. A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118, 1–16, doi:10.1029/2012JD018763.

Pinto Jr., O. 2009. Lightning in the tropics, Ed. Nova Publishers, New York.

Rakov, V. A.; Uman, M. A., 2003. Lightning: physics and effects. Cambridge: Cambridge University, 687 p. ISBN 0-521-58327-6.

Schulz, W., Cummins, K., Diendorfer, G., & Dorninger, M., 2005a. Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 110.

Schultz, M. D.; Underwood, S. J.; Radhakrishnan, P., 2005b. A method to identify the optimal areal unit for NLDN cloud-to-ground lightning flash data analysis. Journal of Applied Meteorology 44, 739-744.

Sen, Pranab Kumar., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association 63, 1379-1389.

Silva, W.L., Derecznski, C.P., 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências 37,123-138.

Sneyers, R. 1975. Sur L'analyse Statistique des Series Dóbservations.Gênevè: Organisation Méteorologique Mon.

Xavier, T. M. B. S., 1999. Caracterização de Períodos secos ou excessivamente chuvosos no Estado do Ceará através da Técnica dos Quantis: 1964-1998. Revista Brasileira de Meteorologia 14, 63-78.

Xavier, T.M.B.S., 2001. Tempo de Chuva – Estudos Climáticos e de Previão para o Ceará e Nordeste Setentrional. ABC Editora. Fortaleza.

Xavier, T. M. B. S., 2002. A técnica dos quantis e suas aplicações em meteorologia, climatologia e hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras. Thesaurus. Brasília.