



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências e Matemáticas da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS E TEMPESTADES ELÉTRICAS NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO ENTRE 2001 E 2016**

Tales Bernardes Paulucci

Orientadores:

Prof. Gutemberg Borges França, *PhD*

Profª. Renata Libonati dos Santos, *PhD*

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2017

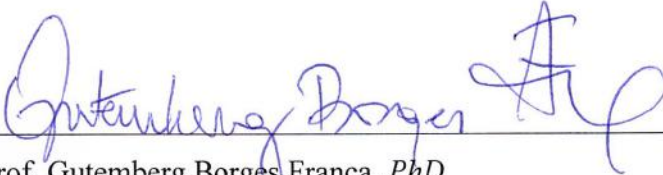
CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E
TEMPESTADES ELÉTRICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO


ENTRE 2001 E 2016


Tales Bernardes Paulucci


Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.


Aprovada por:


Prof. Gutemberg Borges França, *PhD*


Prof. Renata Libonati dos Santos, *PhD*


Prof. Wallace Figueiredo Menezes, *D.Sc*


Prof. Hugo Abi Karam, *D.Sc*


Prof. Manoel Valdonel de Almeida, *D.Sc*

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2017

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e ídolos, Marcelo e Gleide, pela oportunidade da Vida, amor incondicional e apoio constante em todos os caminhos da minha vida, que contribuíram como heróis pra me oferecer a oportunidade de estudar em outra cidade e nas incontáveis portas que se abriram para eu chegasse onde estou.

À toda minha família pelo companheirismo essencial na minha trajetória. Agradeço especialmente aos meus avós, Paula, Antônio e Adelina, pela afetuosa atenção, amor e incontáveis almoços deliciosos de domingo. Aos meus tios e tias, Leonardo, Alexandre, Cláudia e Waldimir pela companhia e palavras de incentivo e ao meu primo Victor, pela presença e amizade em grande parte da minha vida. Agradeço igualmente a todos os meus familiares pela contribuição e presença na minha vida.

Aos meus grandes orientadores, Prof. Gutemberg e Prof^a. Renata, pelas muitas horas que passaram ao meu lado me passando inspiração, me ensinando e orientando nessa longa jornada acadêmica com muita competência, atenção, empolgação e responsabilidade.

Aos membros da Banca Examinadora além dos meus orientadores, professores Wallace, Hugo e Valdonel, que pela experiência e profissionalismo me acompanharam na vida acadêmica e certamente enriqueceram este trabalho.

À todos os(as) professores(as) do Departamento de Meteorologia da UFRJ, em especial aos professores(as) Edílson, Claudine, Mauro e Leonardo por serem grandes exemplos de profissionais e por me oferecerem inspiração na busca de conhecimento sobre a atmosfera.

Aos meus grandes amigos, Caio, Lucas Martinelli, Pedro, Mateus, Vítor, Ítalo, Vinícius, André, Lucas Ohenes, Rafael, Gabriel, Livia, Oséias, Ailton, Elielton, Luizão, Karol e Victão que compartilharam muitos momentos de estudo, diversão, amizade, passeios, conquista, vitória e nervosismo e criaram laços fraternos os quais pretendo manter pelo resto da vida. Um agradecimento aos meus grandes amigos que ficaram em Campinas e em especial à turma de Mec09 do COTUCA, que estão sempre presentes com amizade verdadeira e representam pra mim o mesmo valor que uma família. Agradeço também a todos os meus veteranos e calouros que participaram do meu cotidiano no fundão nesses últimos 4,5 anos.

À empresa FURNAS, que através dos meteorologistas Pedro e Daniela que atenciosamente me ofereceram os dados da RINDAT e contribuíram diretamente para o conteúdo deste trabalho.

Agradeço ainda a todos que contribuíram, de alguma maneira, com boas experiências na minha vida e que com certeza cooperaram para o meu desenvolvimento pessoal.

RESUMO

A ocorrência de descargas elétricas na atmosfera está associada à formação de nuvens *Cumulusnimbus* e conseqüentemente, tempestades responsáveis pela redistribuição de calor e umidade no sistema terrestre. A região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), área foco neste trabalho, é frequentemente impactada por eventos desse tipo, que podem ser acompanhados de chuva intensa, raios, ventos fortes, granizo, enchentes e deslizamentos de terra causando impactos diretos em diversos setores da sociedade e inclusive ameaçando a vida humana. Neste trabalho é realizado um estudo climatológico sobre as características espaço-temporais em que se observou 266.038 raios nuvens-solo distribuídos em 2.186 eventos de tempestade na área delimitada pelas latitudes de 22,7°S e 23,1°S e longitudes 43°W e 44°W, que engloba o município do Rio de Janeiro, Baías de Guanabara e Sepetiba e cidades vizinhas, utilizando dados provenientes da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) no período de abril de 2000 até dezembro de 2016. Ainda, estuda-se as características elétricas dos eventos de tempestade (isto é, polaridade, intensidade da corrente de pico, variações diurnas, mensais e anuais e a distribuição geográfica da densidade de raios) e os casos extremos são detalhadamente analisados. Os resultados mostraram o seguinte: a) As regiões de altos valores de densidade de raios se encontram na porção norte da área de estudo, na proximidade da encosta da Serra do Mar, e possivelmente o efeito orográfico é mecanismo de formação das nuvens convectivas; b) Os raios ocorrem predominantemente no verão com máximo no mês de fevereiro, a média anual é de $3,54 \pm 1,56$ raios.km⁻².ano⁻¹; c) Quanto a polaridade dos raios em todo período, 6,46% são positivos, sendo que este percentual aumenta no inverno; d) 66% dos raios ocorrem entre 15h e 20h (hora local); e) A análise dos eventos de tempestade mostrou que a quantidade de raios por tempestade não varia proporcionalmente ao tempo de duração e os eventos de longa duração não correspondem necessariamente aos eventos grande atividade elétrica; f) A maior parte das tempestades elétricas são compostas por uma pequena quantidade de raios (52,0% dos eventos ocorrem no máximo 7 raios), entretanto, os casos extremos podem produzir cerca de 2000 a 4000 raios por tempestade.

Palavras chaves: Raios, Rio de Janeiro, tempestade, eletricidade atmosférica.

ABSTRACT

The occurrence of electric discharges in the atmosphere is associated with the formation of *Cumulusnimbus* clouds and consequently, storms responsible for the redistribution of heat and moisture in Earth System. The metropolitan region of Rio de Janeiro (RMRJ), the focus area at work, is often impacted by such events, which can be accompanied by heavy rain, lightning, strong winds, hail, floods and landslides causing direct impacts in several sectors of the society and even threatening human life. In this study, 266.038 cloud-to-ground lightning were distributed in 2.186 storm events in the area delimited by the latitudes of 22,7°S and 23,1°S and longitudes 43°W and 44°W, which includes the city of Rio de Janeiro, Guanabara and Sepetiba Bay and neighboring cities, given data from the integrated national network for the detection of atmospheric discharges (RINDAT) from April 2000 to December 2016. The electrical characteristics of storm events (i.e., polarity, peak current intensity, diurnal, monthly and annual variations and geographic distribution of lightning density) and extreme cases are analyzed in detail. The results showed the following: a) The regions of high lightning density were found in the northern portion of the study area, near the Serra do Mar slope, and possibly the orographic effect is a mechanism for the formation of the convective clouds; b) The lightning activity occur predominantly in summer with a maximum in February, an annual average of $3,54 \pm 1,56$ flashes.km⁻².year⁻¹; c) As for the polarity of the lightning throughout the period, 6,46% are positive, and this percentage increases in the winter; d) 66% of lightning activity occur between 3pm and 8pm (local time); e) The analysis of the storm events showed that the number of lightning per event does not vary proportionally to the duration time, and the long duration events do not necessarily correspond to the major electrical activity events; f) Most electrical storms are composed of a small amount of lightning (in 52.0% of events occur at most 7 lightning strikes), however, extreme cases can produce about 2000 to 4000 lightning strikes per storm.

Keywords: Lightning, Rio de Janeiro, storms, atmospheric electricity.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade. (Fonte: Iribarne e Cho, 1980, p. 137).
- Figura 2.2: Representação esquemática ilustrando o processo de colisão indutivo de separação de cargas, em escala microfísica. (Fonte: Iribarne e Cho, 1980, p.138).
- Figura 2.3: Ilustração do processo de transporte de carga segundo a teoria gravitacional ou de precipitação. (Fonte: Williams, 1988, p.50).
- Figura 2.4: Comparação das nuvens de tempestade de inverno e verão (Fonte: Magono, 1980, p. 209).
- Figura 2.5: Desenho esquemático e simplificado dos tipos de relâmpagos que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo. (Fonte: Naccarato, 2001).
- Figura 4.1: Mapa de localização dos sensores ativos do sistema RINDAT identificados por tipo. (Fonte: <http://www.rindat.com.br/>).
- Figura 4.2: Mapa da região de estudo. O quadrilátero formado entre as latitudes 22,7°S e 23,1°S e longitudes 43°W e 44°W representa a área em que foram filtrados os dados da RINDAT.
- Figura 5.1: Porcentagem de descargas elétricas nuvem-solo negativas e positivas detectadas no período de 16 anos (2001 - 2016) na RMRJ.
- Figura 5.2: Distribuição da corrente de pico de raios positivos e negativos para o período de 20/04/2000 a 31/12/2016.
- Figura 5.3: Variação sazonal de descargas elétricas nuvem-solo para a RMRJ no período de 21/12/2000 – 21/12/2016.
- Figura 5.4: Variação interanual da porcentagem de raios positivos referente ao período 2001 - 2016.
- Figura 5.5: Variação interanual do número total de raios detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016. A linha vermelha representa a média e os círculos pequenos e grandes representam, respectivamente, anos normais e anos que apresentaram valores fora do desvio padrão.
- Figura 5.6: Variação interanual do número de raios nuvem-solo positivos e negativos detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016.
- Figura 5.7: Variação anual de valores médios da corrente de pico de raios nuvem-solo positivos e negativos detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016.

- Figura 5.8: Variação mensal do número médio de descargas elétricas nuvem-solo para o período 2001-2016 na RMRJ.
- Figura 5.9: Variação mensal da corrente de pico média de descargas elétricas nuvem-solo positivas e negativas para o período 2001-2016 na RMRJ.
- Figura 5.10: Variação mensal da porcentagem de raios positivos referente ao período 2001 – 2016 na RMRJ.
- Figura 5.11: Comportamento da distribuição mensal (abscissa) e interanual (ordenada) da taxa diária de raios, em potência de base 10, para período de 2001 a 2016.
- Figura 5.12: Variação diária das descargas elétricas nuvem-solo para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.
- Figura 5.13: Variação diária das descargas elétricas nuvem-solo positivas e negativas para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.
- Figura 5.14: Variação diurna das descargas atmosféricas nuvem-solo separado pelo semestre com maior e menor atividade elétrica (novembro-abril e maio-outubro, respectivamente) do ano para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.
- Figura 5.15: Variação diurna da corrente de pico (valores médios) de descargas atmosféricas nuvem-solo separadas por polaridade positiva e negativa para o período 2001 a 2016 sobre a RMRJ.
- Figura 5.16: Comportamento da distribuição mensal (ordenada) e diária (abscissa) da taxa horária de raios, em potência de base 10, para período de 2001 a 2016.
- Figura 5.17: Mapa topográfico do Gráben da Guanabara. (Fonte: Ferrari, 2001).
- Figura 5.18: Perfil esquemático transversal às estruturas geológicas da região entre o Oceano Atlântico e o Vale do Paraíba, no estado do Rio de Janeiro. A região correspondente ao Gráben da Guanabara encontra-se-se indicada. Escala vertical logarítmica. (Fonte: modificado de Ruellan, 1944).
- Figura 5.19: Mapa de densidade espacial do total de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo (raios.km⁻² .ano⁻¹).
- Figura 5.20: Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para as estações de primavera e verão, nesta ordem (raios.km⁻² .ano⁻¹).
- Figura 5.21: Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para as estações de primavera e verão, nesta ordem (raios.km⁻².ano⁻¹).

- Figura 5.22: Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para raios negativos e positivos, nesta ordem (raios.km⁻² .ano⁻¹).
- Figura 5.23: Histograma de duração dos 2186 eventos de tempestade que ocorreram no período de 20/04/2000 – 31/12/2016.
- Figura 5.24: Número de raios de cada tempestade, apresentadas em ordem crescente e as linhas verticais representam os percentis da série no período de 20/04/2000 a 31/12/2016.
- Figura 5.25: Gráfico de dispersão entre o número de raios por tempestade e o tempo de duração da atividade elétrica. Os pontos em vermelho representam os 22 casos que estão acima do percentil 99 (1746 raios por tempestade), correspondendo aos eventos mais extremos em termos de atividade elétrica.
- Figura 5.26: Distribuição mensal dos 22 eventos que atingiram quantidades de raios acima de 1746 (percentil 99).
- Figura 5.27: Boxplots representando a distribuição das características dos eventos de tempestade apresentados na Tabela 5.3. As bordas superior e inferior do retângulo representam o percentil 75 e 25 da série, respectivamente, as extremidades da linha vertical indicam os valores máximo e mínimo excluindo os outliers, a linha horizontal central representa a mediana, o “X” mostra o valor médio e os pontos representam os outliers da série.
- Figura 5.28: Variação temporal da frequência de descargas elétricas de uma amostra de 12 das 22 tempestades que apresentaram mais do que 1746 raios por tempestade (percentil 99). O valor de cada ponto representa a quantidade de raios detectados na área de estudo no período de 15 minutos antecedentes ao horário correspondente no eixo das abcissas.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 5.1: Porcentagem de raios positivos em relação ao total para cada estação do ano referente ao período de 21/12/2000 até 21/12/2016.
- Tabela 5.2: Quantidade de eventos de tempestade classificados de acordo com o nível de atividade elétrica.
- Tabela 5.3: Lista dos 22 eventos de tempestade elétrica em que foram detectados as maiores quantidades de descargas elétricas com suas características. As linhas destacadas em azul são os eventos que tiveram sua sequência de descargas representadas temporalmente na Figura 5.28. A linha destacada em laranja representa o evento com a maior quantidade de raios e maior frequência média.

LISTA DE SIGLAS

ALDIS – *Austrian Lightning Detection Information System*

BLM – *Bureau of Land Management*

BrasilDAT – *Brazilian Lightning Detection Network*

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica

EM – Ondas Eletromagnéticas

EUA – Estados Unidos da América

HL – Hora Local

HN – Hemisfério Norte

HS – Hemisfério Sul

IN – Intranuvem

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IOS – Índice de Oscilação Sul

LPATS – *Lightning Positioning and Tracking System*

LPCCG – *Large Peak Current Cloud-to-Ground*

NCN – Núcleos de Condensação de Nuvens

NN – Nuvem-Nuvem

NS – Nuvem-Solo

RINDAT – Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

SCM – Sistema Convectivo de Mesoescala

SDLR – Sistema de Detecção e Localização de Raios

SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná

SN – Solo-Nuvem

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

T_{ic} – Temperatura de Inversão de Carga

TOGA-COARE – *Tropical Ocean - Global Atmosphere Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment*)

UTC – *Universal Time Coordinated*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
SUMÁRIO.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO TEÓRICA	17
2.1 Estrutura elétrica das nuvens de tempestade	18
2.2 Classificação dos relâmpagos.....	21
2.3 Relâmpagos Nuvem-Solo.....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4. DADOS E MÉTODO.....	30
4.1 Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT)	30
4.2 Área de estudo	31
4.3 Métodos e considerações.....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1 Características das descargas atmosféricas.....	35
5.1.1 Características gerais	35
5.1.2 Variação interanual.....	38
5.1.3 Variação intraanual.....	41
5.1.4 Variação diurna.....	45
5.2 Distribuição geográfica	49
5.2.1 Descrição do relevo	49
5.2.2 Distribuição espacial da densidade de raios	51
5.3 Análise de eventos.....	55
5.3.1 Estatísticas dos eventos	56
5.3.2 Análise dos eventos extremos	59
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

As descargas elétricas atmosféricas, popularmente conhecidas como raios ou relâmpagos, são fenômenos meteorológicos recorrentes na região tropical. Tais fenômenos são dependentes das complexas interações físicas do sistema terrestre (principalmente atmosfera, hidrosfera e litosfera), o que resulta em uma ampla gama de diferentes características de distribuições espaciais e variações temporais ao longo dos dias, meses e anos em toda superfície do planeta. Os raios são resultados de processos que transportam enormes quantidades de elétrons a cerca de um terço da velocidade da luz em frações de segundo. Isto produz correntes elétricas muito maiores do que ocorrem nas atividades humanas cotidianas. Essas correntes aquecem o ar abruptamente a temperaturas de 15 a 30 mil graus Celsius (UMAN, 1964), emitindo ondas eletromagnéticas que podem ser detectadas por sensores a bordo de satélites a milhares de quilômetros de altura, enquanto a expansão instantânea do ar em torno do canal ionizado provoca ondas sonoras características do trovão, que podem ser audíveis a dezenas de quilômetros.

Os raios normalmente ocorrem durante tempestades com chuvas e ventos intensos em nuvens denominadas de *Cumululonimbus*, mas também podem ocorrer em tempestades de neve, areia, erupções vulcânicas ou mesmo em nuvens que não sejam de tempestade, embora esses casos sejam de intensidades bem menores. Portanto, regiões com maior ocorrência de tempestades são as com grande atividade elétrica. Estudar as características dos raios em uma certa região é uma forma de entender o estado convectivo das nuvens de tempestade, sua estrutura elétrica e as suas interações físicas com as características geográficas e climáticas locais e circunstâncias sazonais.

Existem diversas técnicas que são utilizadas para detectar os raios na natureza. Algumas se baseiam em analisar detalhes das variações dos campos eletromagnéticos da luminosidade e da corrente do canal por sistemas de aquisição de alta velocidade. São exemplos dessas técnicas: a medição dos campos eletromagnéticos que são emitidos pelas descargas através de sensores capacitivos ou indutivos (Rakov e Uman, 2003), os quais permitem mensurar a informação da corrente que passa pelo canal; a medição da luminosidade do canal a partir de sensores ópticos (Chowdhuri et al. 2005); filmagem mediante a câmeras de alta velocidade que permitem observar todas as etapas do fenômeno (Ballarotti. 2005; Saba et al. 2003, 2004b) e medidas diretas da corrente do canal por meio de raios induzidos artificialmente. Porém, essas técnicas são restritas às regiões onde as medidas são realizadas devido ao seu caráter pontual. Outras

técnicas detectam raios em escalas mais amplas, como por exemplo, os sensores ópticos instalados em satélites que permitem estimar a frequência e o local de ocorrência em uma escala global (Boccippio et al. 1998; Christian et al. 1999, 2003) e os sistemas de detecção e localização de raios (SDLR) em solo, capazes de registrar com maior precisão a ocorrência e localização das descargas atmosféricas em escala continental (Naccarato, 2005).

Os dados fornecidos por um SDLR são importantes pois podem fornecer informações detalhadas sobre a distribuição geográfica e variações temporais da ocorrência de raios em regiões específicas, pois mostram com precisão o instante e local onde o raio toca o solo, além de informar a polaridade e corrente de pico da descarga. Isso permite a comparação das características espaciais da incidência de raios com o clima, condições atmosféricas e características geográficas como uso e ocupação do solo, orografia, vegetação e urbanização, além possibilitar o estudo das variações anuais, mensais e até mesmo horárias. Além disso, a ocorrência de raios está associada à formação de nuvens *Cumulusnimbus* (Rakov e Uman, 2003) e conseqüentemente, tempestades responsáveis pela redistribuição de calor e umidade na atmosfera (Chaudhuri et al., 2013), e ‘que afetam diretamente diversas atividades humanas. Desta forma, a análise destes dados permite entender melhor os fatores naturais e antrópicos que podem afetar as características dos raios.

Um SDLR consiste em um conjunto de vários sensores em solo que utilizam técnicas de localização por radiofrequência eletromagnética em diferentes gamas de frequências de VLF (*very low frequency*) até VHF (*very high frequency*). Desta forma é possível determinar o ângulo do local onde o raio toca o solo até a localização do sensor e registrar o horário preciso do evento, juntamente com uma unidade de processamento que calcula características do raio como localização, horário de ocorrência, corrente de pico, polaridade entre outros (Rakov e Uman, 2003; Pinto et al., 2006). Os SDLR coletam um grande número de dados, os quais podem ser utilizados em muitas aplicações como serviços de meteorologia, aviação, pesquisas geofísicas, serviços de transmissão de energia entre outros. Por décadas, diversos SDLR estão em operação ao redor do planeta fornecendo dados que vários autores utilizaram para caracterizar as descargas elétricas em diferentes países, como Estados Unidos da América (EUA) [Lopez e Holle, 1986; Orville, 1991; Watson et al., 1994; Reap, 1994; Hodanish et al., 1997; Lyons et al., 1998; Huffines e Orville, 1999], Japão [Hojo et al., 1989], Papua Nova-Guiné [Orville et al., 1997], Canadá [Burrows et al., 2002], China [Chen et al., 2004], Áustria [Diendorfer et al., 1998; Schulz et al., 2005], Espanha [Soriano et al., 2005], Colômbia [Younes et al., 2004], Portugal [Rodrigues et al., 2010], Brasil [Pinto et al., 1993; Pinto et al., 1996; Gin, 1996; Rocha et al., 1997; Pinto et al., 1999; Naccarato et al., 2001; Pinto et al., 2003; Reis,

2005; Fernandes, 2005; Pinto et al., 2009; Bourscheidt et al., 2009; Cardoso, 2011] entre muitos outros.

Devido a sua grande extensão territorial e por ser localizado predominantemente na região tropical do globo, o Brasil é um dos países com maior ocorrência de raios do mundo com cerca de 100 milhões de descargas nuvem-solo por ano (Pinto Jr e Pinto, 2000). Em decorrência do avanço tecnológico do país, a incidência de raios no Brasil passou a causar grandes danos em diversos setores da sociedade como explosões em refinarias, colapsos na rede elétrica, queima de equipamentos industriais e no controle de tráfego aéreo, além de causar a morte de, em média, 132 brasileiros por ano entre 2000 e 2009 (Cardoso, 2011). Por outro lado, as pesquisas científicas sobre o assunto no país conquistaram destaque mundial pelo fato de ter a maioria das comissões mundiais sobre o fenômeno ao sediar a XIV Conferência Internacional de Eletricidade Atmosférica, realizada em agosto de 2011 no Rio de Janeiro.

No Brasil, as pesquisas sobre raios se iniciaram em meados do século XIX na cidade do Rio de Janeiro junto com outras áreas da ciência, quando o imperador Dom Pedro II consolidou o Observatório Imperial do Rio de Janeiro em 15 de outubro de 1827 no Morro do Castelo, local ocupado hoje pelo aeroporto Santos Dumont. Neste observatório que, a partir da década de 1850, foram feitas as primeiras observações meteorológicas do país, baseadas na análise de tempestades e registros de raios. Entretanto, nas décadas seguintes poucos estudos avançaram em decorrência de conflitos militares internos e externos nos quais o país esteve envolvido. Em virtude da prevenção de acidentes devido a causas meteorológicas pouco antes da proclamação da república em 1889, aumentou-se o interesse por observações de tempestades e raios na antiga capital brasileira, quando o jovem estudante de engenharia Henrique Morize registrou a primeira foto de um raio no país no mesmo observatório e hoje é considerado um dos primeiros pesquisadores em eletricidade atmosférica do Brasil (Pinto Jr. e Cardoso, 2015).

Após um período de estagnação nas pesquisas sobre raios no Brasil, a partir da década de 1970 os impactos das descargas atmosféricas sobre as redes elétricas motivaram as empresas de energia a impulsionar os estudos, principalmente em regiões de grande incidência de raios. Foi então criado o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e as pesquisas de raios no Brasil ganhou grande visibilidade e apoio principalmente com a implantação de diversas tecnologias de observação.

Existem diversos SDLR em atuação no Brasil. Entre eles, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), fonte de dados deste trabalho, que engloba toda a região sudeste do país além dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e Santa

Catarina. Os dados abrangem um período maior que 16 anos (01/04/2000 até 31/12/2016) na cidade pioneira na pesquisa sobre raios no Brasil: o Rio de Janeiro.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo climatológico da distribuição espaço-temporal das características das descargas elétricas atmosféricas (isto é, polaridade, intensidade da corrente de pico, variações diurnas, mensais e anuais e a distribuição geográfica da densidade de raios), analisar estatísticas das tempestades elétricas e por fim estudar as tempestades extremas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) no período de abril de 2000 a dezembro de 2016.

2. REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica simplificada dos conceitos teóricos fundamentais do relâmpago, tais como sua formação, estrutura elétrica das tempestades e dos tipos de descargas.

O raio é uma corrente elétrica muito intensa que ocorre na atmosfera com duração típica de meio segundo. O fenômeno é uma consequência do rápido movimento de elétrons entre duas regiões com desequilíbrio de cargas. O movimento dos elétrons causa um aumento da temperatura do ar tão brusco que o ar ao redor do canal ionizado se ilumina resultando em um clarão, e a expansão instantânea do ar gera o som do trovão. O raio pode ser denominado ascendente, quando inicia do solo e sobe em direção à tempestade, ou descendente, quando parte da tempestade e se movimenta em direção ao solo (Gin, 1996). O canal ionizado, na maioria das vezes é dotado de diversas ramificações, que se estende por vários quilômetros tanto na vertical como na horizontal. Este canal atua como uma efetiva antena de irradiação de ondas eletromagnéticas (EM) em um amplo espectro de frequências, denominadas *sferics*, as quais se propagam ao redor do planeta através da atmosfera, gerando vários fenômenos não só próximos ao local de sua ocorrência, como também a grandes distâncias, desde a superfície até as camadas atmosféricas mais altas (Pinto Jr. e Pinto. 2000; Rakov e Uman. 2003). Como exemplo, tem-se observado nos últimos anos, através de câmeras de alta velocidade, diferentes tipos de emissões luminosas de baixa intensidade (muitas vezes invisíveis ao olho humano) no topo da troposfera (podendo se estender até a mesosfera) denominadas *sprites*, jatos azuis ou *elves*, as quais têm apresentado estreita relação com a atividade de relâmpagos nuvem-solo com polaridade positiva (Sabbas et al. 2003; Pinto Jr. et al. 2004).

O primeiro a classificar os raios como um fenômeno de natureza elétrica no meio científico foi o político e cientista americano Benjamin Franklin (1706-1790) em 1752 através de seu experimento com um papagaio. Franklin também foi o primeiro a sugerir uma técnica para proteger as edificações contra os raios, conhecida como para-raios. Cerca de 100 raios atingem o solo a cada segundo no mundo (Uman, 1986), sendo que aproximadamente apenas 5% destes ocorrem sobre os oceanos (Volland, 1982). Isso está relacionado com o fato dos continentes variarem muito mais a temperatura com a absorção da radiação solar do que os oceanos, fazendo com que a área continental do globo seja uma eficiente fornecedora de energia para a atmosfera, que reage redistribuindo-a através de movimentos de convecção e evaporação/condensação da água formando mais nuvens de tempestades, e conseqüentemente, maior atividade elétrica sobre o solo do que sobre o oceano.

2.1 Estrutura elétrica das nuvens de tempestade

Nuvens de tempestade ou *Cumulusnimbus* são nuvens com movimento convectivo de grande extensão vertical e a principal fonte de descargas elétricas. O ciclo de vida dessas nuvens é dividido em 3 estágios denominados formação, maturação e dissipação, determinados em função do sentido do movimento vertical predominante das correntes de ar no seu interior. O ciclo de vida de uma nuvem de tempestade é em geral de uma a duas horas. A primeira estrutura elétrica sugerida para uma nuvem de tempestade, do ponto de vista de um observador externo, foi a estrutura dipolar representada por dois principais centros de carga elétrica, um positivo e um negativo (Gin, 1996).

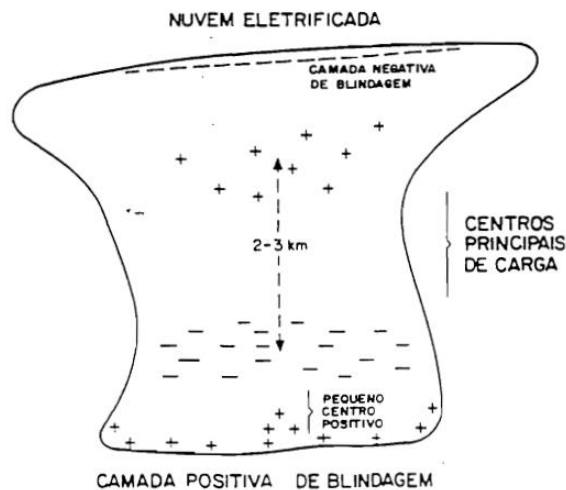


Figura 2.1 - Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade. (Fonte: Iribarne e Cho, 1980, p. 137).

A Figura 2.1 apresenta um modelo básico da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade como um dipolo vertical com polaridade positiva. O centro de carga positivo situa-se a uma altura que depende do nível de desenvolvimento vertical das nuvens, em geral a aproximadamente um quilômetro abaixo do topo das nuvens (Magono, 1980). Já o centro de carga negativo, com extensão de algumas centenas de metros, situa-se em uma altura associada à temperatura em torno de -10 e -15 °C (Iribarne e Cho, 1980; Breed e Dye, 1989; Williams, 1989; Gin, 1996). Em geral nas nuvens de tempestade os centros de carga têm mesma magnitude (Iribarne e Cho, 1980, Magono, 1980, Volland, 2013, Williams, 1989), embora há casos em que a carga negativa é maior do que a positiva sendo explicados com base na teoria de continuidade de corrente dentro da nuvem (Pinto et al., 1989). Nesta estrutura dipolar existem camadas de blindagem, negativa no topo e positiva na base da nuvem. Esta blindagem

deve-se à captura de íons atmosféricos por gotículas ou cristais de gelo, que devido à presença do campo elétrico existente dirigem-se para os principais centros de carga da nuvem (Iribarne e Cho, 1980). Além dos dois principais centros de carga, positivo e negativo, ainda existe um pequeno centro de carga positivo na base da nuvem. No passado, acreditava-se que este centro estaria associado à corrente corona originada no solo (Gin, 1996). Existe outras representações possíveis da estrutura elétrica das nuvens de tempestade que não serão abordadas nesta revisão.

Dentro das nuvens, cargas intensas desenvolvem-se a partir da colisão entre diferentes tipos de partículas como cristais de gelo e granizo, atingindo em alguns casos a carga elétrica total de até centenas de Coulombs. Este é o processo de geração de cargas atualmente mais aceito (Gin, 1996).

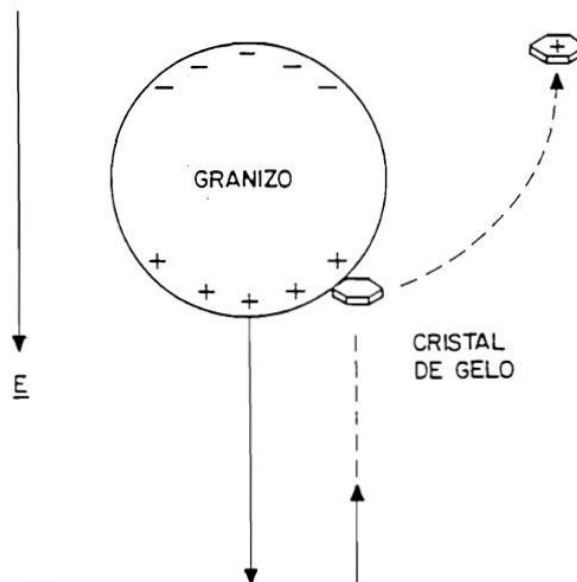


Figura 2.2 - Representação esquemática ilustrando o processo de colisão indutiva de separação de cargas, em escala microfísica. (Fonte: Iribarne e Cho, 1980, p.138).

Existem duas variações para este processo denominadas de processo indutivo e processo termoelétrico. O processo indutivo consiste na polarização de partículas grandes como o granizo, devido a presença de um campo elétrico externo (Figura 2.2). Sendo este campo descendente e havendo colisão na parte inferior do granizo com partículas menores, como o cristal de gelo, o granizo transfere para o cristal cargas positivas em excesso, tornando-se negativamente carregado. Entretanto, experimentos de laboratório têm apresentado que os processos indutivos tornam-se importantes na presença de campos elétricos da ordem de 10 kV/m (Volland, 2013). O processo termoelétrico consiste na transferência de carga associado a temperatura onde ocorre a colisão. Esta transferência de carga dá-se entre o granizo e o cristal de gelo dependendo da temperatura limite denominada de temperatura de inversão de carga

(T_{ic}). A T_{ic} é estimada em torno de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, a qual coincide com a temperatura do centro de carga negativa (Williams, 1988). Se a colisão ocorrer a uma temperatura inferior a T_{ic} , o granizo transfere carga positiva e torna-se negativamente carregado. Se a colisão ocorrer a uma temperatura superior a T_{ic} , o granizo transfere carga negativa tornando-se positivamente carregado. Este processo termoelétrico têm sido verificado em laboratório, apesar de não se compreender totalmente seus detalhes (Gin, 1996).

Após geradas, as cargas sofrem a ação de processos microfísicos de transporte dentro da nuvem. Dois tipos de processos de transporte são conhecidos: o gravitacional (ou de precipitação) e o convectivo. No processo gravitacional as partículas maiores e mais pesadas, como o granizo, associam-se a cargas negativas e/ou positivas, dependendo da temperatura, distribuindo-se na parte inferior da nuvem. Já as partículas menores e mais leves, como os cristais de gelo, associam-se a cargas positivas distribuindo-se na parte superior da nuvem, como apresenta a Figura 2.3. No processo convectivo, segundo Williams (1988), as cargas positivas são liberadas da superfície da Terra por correntes de ar aquecido e as cargas negativas são produzidas pela interação dos raios cósmicos com a atmosfera associadas às partículas já existentes na nuvem. Desta forma as cargas negativas formam a camada de blindagem da nuvem. Através de movimentos ascendentes dentro da nuvem, as cargas positivas são levadas para a parte superior da nuvem. Já os movimentos descendentes levam as cargas negativas da camada de blindagem, agora atraídas pelas cargas positivas, para a parte inferior da nuvem (Williams, 1989).

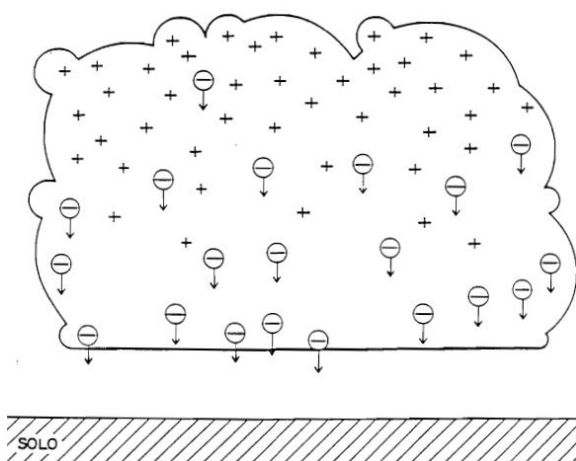


Figura 2.3 - Ilustração do processo de transporte de carga segundo a teoria gravitacional ou de precipitação. (Fonte: Williams, 1988, p.50).

As nuvens de tempestade podem variar a disposição dos seus centros de carga em função da estação do ano. Em geral as nuvens de tempestade de inverno são mais baixas e mais inclinadas do que as do verão, como indica a Figura 2.4. Esta distribuição de carga pode ser

fortemente deslocada da vertical devido à presença de um gradiente vertical da velocidade do vento horizontal (Beasley, 1985). Muitos autores utilizam este modelo denominado Modelo do Dipolo Inclinado para explicar a grande frequência de relâmpagos NS positivos (Hojo et al., 1989; Takagi et al., 1986; Orville et al., 1987).

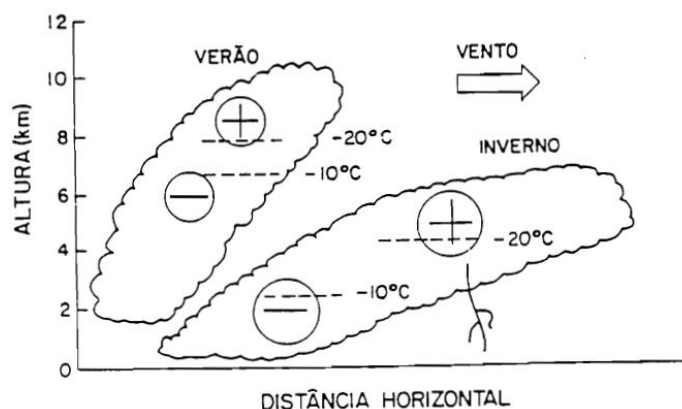


Figura 2.4 - Comparação das nuvens de tempestade de inverno e verão. (Fonte: Magono, 1980, p. 209).

2.2 Classificação dos relâmpagos

Considera-se um relâmpago, em termos de nomenclatura, um fenômeno físico completo, desde seu início na nuvem até a sua extinção. O termo descarga elétrica atmosférica tem sido frequentemente empregado de forma equivalente a relâmpago. Existem dois tipos fundamentais de relâmpagos: (1) no céu e (2) que atingem o solo (Naccarato, 2005).

Três tipos de relâmpagos que podem ser identificados no céu: (1) relâmpagos intranuvem (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; (2) relâmpagos nuvem-nuvem (NN), que ocorrem entre nuvens diferentes e (3) relâmpagos no ar (AR), que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo. Bolsões de carga que se formam na atmosfera em torno das nuvens de tempestade seriam responsáveis por esse tipo de relâmpago (Ogawa, 1995). Os relâmpagos que atingem o solo, também conhecidos simplesmente como raios, são classificados em dois tipos básicos: (1) relâmpagos nuvem-solo (NS), caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra; (2) relâmpagos solo-nuvem (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem. Os relâmpagos NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos relâmpagos positivos (transferência de cargas positivas) e negativos (transferência de cargas

negativas), conforme ilustrado na Figura 2.5. Os aspectos físicos gerais desses tipos de relâmpagos são melhor detalhados no trabalho de Naccarato, 2005.

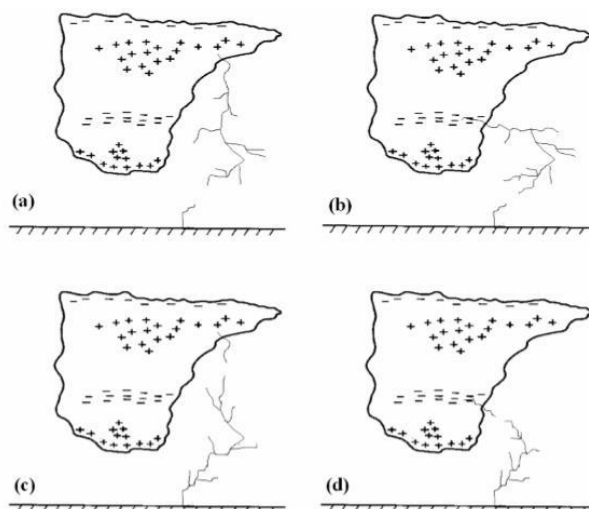


Figura 2.5 - Desenho esquemático e simplificado dos tipos de relâmpagos que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo. (Fonte: Naccarato, 2001).

2.3 Relâmpagos Nuvem-Solo

Em geral, um relâmpago NS negativo transporta para a Terra dezenas de Coulombs de cargas negativas, sendo constituído por vários pulsos de corrente denominados *strokes* ou descargas de retorno. O número de *strokes* que compõe um relâmpago é chamado de multiplicidade, porém, esta característica não será apresentada neste trabalho. Os relâmpagos NS de polaridade negativa representam em média 90 % do seu total. A frequência dos relâmpagos NS com polaridade positiva, entretanto, parece ser bastante variável, sendo em alguns casos até superior à dos negativos (Orville e Huffines. 2001; Rakov e Uman. 2003; Carey et al. 2003; Naccarato et al. 2003c). Cinco fatores básicos parecem afetar o percentual de relâmpagos com polaridade positiva, em relação ao número total de eventos (Naccarato, 2005):

- 1) Regiões estratiformes de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) tendem a produzir maior quantidade de relâmpagos com polaridade positiva devido à redução significativa da profundidade das nuvens. Por outro lado, as regiões com intensa convecção, que conseqüentemente levam a nuvens de grande profundidade, produziram maior quantidade de relâmpagos com polaridade negativa (Rakov e Uman. 2003);
- 2) O gradiente vertical dos ventos com a altura está diretamente relacionado com as condições meteorológicas e com a estação do ano. Quanto maior este gradiente com a altura, maior o deslocamento das cargas positivas em relação às negativas

(cisalhamento da nuvem), expondo assim o centro de cargas positivo à superfície. Isso facilitaria os relâmpagos positivos alcançarem o solo. Este comportamento foi frequentemente observado em tempestades de inverno no Japão. (MacGorman e Rust. 1998; Rakov e Uman. 2003);

- 3) A dissipação da nuvem de tempestade. À medida que a chuva elimina os centros de carga negativa na base da nuvem, restam apenas os centros positivos nas partes mais altas. Sem a blindagem dos centros de carga negativa, aumentaria a possibilidade de ocorrerem relâmpagos positivos em direção ao solo (MacGorman e Rust. 1998);
- 4) Alterações na altura e profundidade do centro de carga negativo e do pequeno centro de cargas positivo próximo à base da nuvem. Essas variações seriam causadas por altas concentrações de aerossóis na atmosfera (os chamados núcleos de condensação de nuvens ou CCN) que afetariam a relação entre relâmpagos positivos e negativos (Lyons et al. 1998; Murray et al. 2000; Orville et al. 2001; Naccarato et al. 2003c). Este efeito seria mais comum em regiões com elevados índices de poluição atmosférica na forma de material particulado, como os grandes centros urbanos, e áreas de queimadas;
- 5) As tempestades severas, as quais são caracterizadas por fortes correntes verticais (convecção intensa), produção de granizo, altas taxas de ocorrência de relâmpagos, ventos fortes na superfície (e, eventualmente, produção de tornados), tendem a apresentar uma maior proporção de relâmpagos positivos (Rakov e Uman. 2003).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão de alguns dos principais trabalhos da literatura científica que foram conduzidos ao longo do tempo que utilizaram diferentes SDLR para apresentar as características regionais da distribuição espacial e variação temporal das descargas elétricas atmosféricas de diferentes locais do mundo.

Lopez e Holle (1986) utilizaram dados de localização de raios do nordeste do Colorado e região central da Flórida, nos EUA para os meses de verão de 1983 onde detectaram os padrões de convecção induzidos pela topografia.

Hojo et al. (1989) estudaram raios nuvem-solo (NS) de ambas as polaridades na região costeira do Mar do Japão para verão e inverno de 1984 e 1985, o que permitiu investigar a variação sazonal dos raios.

Orville (1991) utilizou a rede de detecção *National Lightning Detection Network* para localizar 13,4 milhões de raios NS no ano de 1989 em toda a cobertura do território dos EUA, o que resultou em um produto de densidade de raios com resolução de 50 km na direção zonal e 30 km na direção meridional permitindo uma análise de regiões de máxima e mínima ocorrência.

Watson et al. (1993) coletaram informações da variabilidade diurna dos raios NS de um SDLR chamado *Bureau of Land Management (BLM)* no estado do Arizona/EUA para o período de 1985 até 1990 durante a monção de sudoeste, onde detectaram que a disponibilidade de umidade, localização do eixo da crista subtropical, cavados transitórios e umidade de baixos níveis originados pelo Golfo da Califórnia podem afetar a ocorrência de tempestades.

Reap (1994) analisou a distribuição espacial e temporal da atividade elétrica associada com regimes sinóticos específicos do fluxo de vento em baixos níveis, desenvolvido para aprimorar as previsões estatísticas de tempestades para a Florida/EUA, utilizando dados de raios para as estações quentes do período 1987-1990, revelando que a organização costeira de máxima ocorrência de descargas elétricas estão relacionados com zonas de convergência de brisa marítima-terrestre, que se formam em resposta direta ao fluxo de ventos em baixos níveis.

Hodanish et al., (1997) calcularam valores médios de densidade de raios NS para a Flórida/EUA para o período de 10 anos 1986-95, em que foram construídos um mapa anual médio e mapas mensais médios de uma base de dados que excede 25 milhões de raios representando uma climatologia da distribuição geográfica para promover uma visão na distribuição de tempestades na Flórida. Foi observado também que na estação fria (novembro

a fevereiro) as maiores densidades estão associadas à sistemas de escala sinótica em latitudes médias.

Orville et al. (1997) apresentaram uma análise dos raios NS detectados na região onde foi realizado o projeto TOGA-COARE (*Tropical Ocean – Global Atmosphere Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment*) próximo à costa de Papua Nova Guiné no ano de 1993. Foi observado que de todos os raios detectados naquele ano, 5,6% eram de polaridade positiva. Observou-se que os meses de janeiro e fevereiro apresentaram 40% da atividade elétrica anual, o que se assemelha com comportamento encontrado na maioria dos estudos da região tropical do hemisfério Sul (HS) que possuem um verão chuvoso, como o Brasil por exemplo. Foi possível notar dois picos de altos valores distribuição diurna da atividade elétrica na região, um as 05:00 UTC (15:00 HL) e outro as 16:00 UTC (02:00 HL), indicando um comportamento peculiar causado pelo efeito da convergência da brisa terrestre noturna ao longo da costa de Nova Bretanha. A média mensal da corrente de pico dos raios negativos são tipicamente entre 20 e 30 kA enquanto os negativos ficam próximos de 30 kA com exceção do mês de junho que tem o valor de 60 kA.

Lyons et al. (1998) utilizaram dados provenientes do *U.S. National Lightning Detection Network* para realizar uma climatologia de raios com alta corrente de pico nuvem-solo (LPCCG – *Large Peak Current Cloud-to-Ground*, arbitrariamente definidos como raios NS com corrente de pico acima de 75 kA) para 14 meses de verão (1991-1995) sobre o território dos EUA. Os resultados revelaram diferenças geográficas distintas na distribuição desse tipo de raio com polaridades positivas e negativas, grande concentração de raios LPCCG positivos na região das altas planícies da região centro-oeste e de raios LPCCG negativos sobre águas costeiras do Golfo do México e sudeste dos EUA, além de que dos 1,46 milhões de raios LPCCG analisados, 13,7% são positivos.

Huffines e Orville (1999) calcularam a frequência e densidade de 121,7 milhões de raios NS e a duração de tempestades na área continental dos EUA para o período 1989-96. As análises apresentaram que a relação entre a duração das tempestades e a densidade de raios foi próximo ao esperado e a duração das tempestades na Flórida excedem 120 h/ano e 105 h/ano no Novo México, Arizona e Costa do Golfo.

Burrows et al. (2002) estudaram aproximadamente 21 milhões de raios NS e nuvem-nuvem (NN) de fevereiro de 1998 até dezembro de 2000 para o Canadá e região adjacente dos EUA. Foram analisados os principais padrões de dias de ocorrência de raios, densidade espacial de raios, fração de raios NN, fração de raios noturnos/matutinos, duração, razão de raios NS positivos/negativos, corrente de pico e multiplicidade média, revelando dependências sazonais,

diurnas e regionais, além da influência das características da elevação do terreno e o contato continente/oceano. Os resultados também foram comparados com estudos anteriores da região do norte dos EUA.

Schulz et al. (2005) apresentaram um artigo com estatísticas de mais de 3 milhões de raios NS localizados durante o período de 10 anos (1992-2001) na Áustria pelo SDLR chamado ALDIS (*Austrian Lightning Detection Information System*). Como a maioria dos SDLR que operam mundialmente, o ALDIS sofreu mudanças nas suas configurações ao longo do tempo obter uma melhora contínua no seu desempenho, o que pode afetar a estatística dos dados produzidos. Por isso os autores destacaram a variação dos parâmetros individuais de detecção de raios durante o período de operação para as mudanças de configuração e performance do ALDIS. As densidades de descargas na Áustria variam de 0,5 a 4 raios/km² por ano, dependendo do terreno. Em contraste ao comportamento tipicamente encontrado em regiões do HS, a maior parte da atividade elétrica ocorre nos meses de maio a agosto, o que corresponde ao verão do hemisfério norte (HN). Aproximadamente 17 % das descargas detectadas são positivas sendo que essa porcentagem tende a aumentar no inverno, comportamento no qual também foi encontrado nos EUA por Orville e Huffines (2001), na Colômbia por Younes et al. (2004), no Brasil por Pinto et al. (2006), na Espanha por Soriano et al. (2005) e muitos outros. A variação diurna dos raios na Áustria possui um máximo encontrado às 16:00 HL, resultado comum em diversas regiões devido à maior frequência de tempestades do período da tarde.

Soriano et al. (2005) fizeram uma climatologia de 10 anos das características das descargas atmosféricas NS na Península Ibérica para o período 1992-2001, que corresponde à primeira década de medições realizadas pelo SDLR Espanhol. Foram levantadas estatísticas sobre o ciclo anual e diurno, polaridade, multiplicidade, e corrente de pico do primeiro stroke. O ciclo diurno médio mostrou valores máximos às 17:00 HL e mínimos às 10:00 HL. A densidade média encontrada é 2,1 raios/km²/ano, as regiões de maior atividade estão relacionadas com áreas montanhosas e pode ser visto o efeito do Mar Mediterrâneo. A porcentagem de raios positivos e a corrente de pico média para raios negativos são maiores em áreas sobre o oceano do que sobre o continente. A porcentagem de raios positivos é de 9% porém foi detectado o aumento desse valor no inverno de 6,5% em junho para 22,6% em janeiro, como esperado. As variações médias mensais apresentaram o máximo de atividade elétrica entre maio e setembro, enquanto os mínimos são observados em janeiro e fevereiro, períodos correspondentes às estações de verão e inverno do HN, respectivamente. A corrente de pico média encontrada foi de 27,3 kA para raios negativos e 47,1 kA para positivos e para ambas as polaridades foram encontrados valores de corrente de pico maiores no inverno do que no verão.

Pinto et al. (1996) utilizaram o *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) pela primeira vez para as características dos raios NS na região sudeste do Brasil durante a estação de verão de 1992-1993 em que foram apresentadas informações em termos de polaridade, multiplicidade, corrente de pico e hora local da ocorrência, comparando com os resultados obtidos por diversos autores de outras partes do planeta. Entre os resultados encontrados, foi verificado que na região sudeste: há uma porcentagem de raios positivos maior do que a encontrada em outros estudos similares (35%), porém não foi dada uma explicação para isso e que, os raios positivos são, em média, menos intensos do que os negativos e a porcentagem dos positivos de alta intensidade (>80 kA) também são menores do que os negativos.

Gin (1996) estudou as características dos relâmpagos nuvem-solo no estado de Minas Gerais no verão de 1993, incluindo informações sobre a polaridade, multiplicidade, intensidade de corrente e as suas distribuições espaciais e temporais. Foram analisados cerca de 300.000 raios medidos pelo sistema de detecção LPATS e os fenômenos foram associados aos sistemas convectivos de mesoescala (SCM) identificados pelo satélite europeu METEOSAT-3. Alguns resultados foram similares aos encontrados pelo trabalho de Pinto et al. (1996), citado anteriormente, em que são discutidos as razões da alta porcentagem peculiar de raios positivos encontrada na região.

Rocha et al. (1997) estudaram as características dos raios na região sudeste do Brasil através de dados provenientes do LPATS durante a estação de inverno de 1993 em termos de polaridade, multiplicidade, e corrente de pico do primeiro *stroke* e compararam com dados da mesma região na estação de verão segundo a publicação de Pinto et al. (1996) e Gin (1996), citados anteriormente. Entre os resultados apresentados, o trabalho conclui que a distribuição dos raios em termos de polaridade é quase a mesma em ambas as estações, a porcentagem de raios “single stroke” no inverno é maior do que no verão e os valores de corrente de pico médio dos raios positivos e negativos no inverno são menores do que os obtidos no verão, principalmente no caso dos negativos.

Pinto et al. (1999.1, 1999.2) apresentaram em seus dois artigos informações sobre cerca de 1,1 milhão de raios NS detectados pelo LPATS no sudeste do Brasil no ano de 1993. Foi o primeiro estudo no país que levantou dados de um ano completo. No primeiro artigo foi apresentado a distribuição geográfica da densidade total de raios, porcentagem de positivos e negativos e corrente de pico de raios positivos e negativos, enquanto no segundo os dados foram analisados em termos das suas variações mensais, sazonais (verão/inverno) e diurnas (HL). Foi investigada a dependência da densidade de raios e corrente de pico com a latitude, altitude e

resistividade do solo. Foi encontrado que a corrente de pico de raios negativos é inversamente correlacionada com a latitude mas não houve outras relações significantes com outros parâmetros. As densidades máximas encontradas para raios totais, negativos e positivos foi 15,5, 9,1 e 7,7 raios/km² por ano, respectivamente. A porcentagem média de raios positivos é de 36,5 %. As médias geométricas da corrente de pico foram 30,9 e 17,8 kA. A variação sazonal indica que a maioria dos raios ocorrem nas estações de primavera e verão e menos de 25 % ocorrem nas estações de outono/inverno. Foi observado que a corrente de pico costuma ser mais alta no verão do que no inverno, em contraste com resultados encontrados em outras partes do mundo. A variação diurna mostrou que as estações de verão e inverno possuem o mesmo comportamento para raios negativos, com o máximo por volta de 15 - 18 HL, associado com o máximo de atividade convectiva no período da tarde.

Pinto et al. (2006) apresentaram uma comparação entre as distribuições médias mensais da frequência de raios, porcentagem de positivos, e corrente de pico de positivos e negativos de raios NS obtidos no Brasil para o período de 1999 a 2004 com as mesmas distribuições observadas por SDLR similares em outros países. Foi encontrado que a distribuição média mensal da incidência de raios no Brasil, um país tropical, é similar aos países de regiões temperadas, apesar de que no Brasil o período do ano com atividade elétrica significativa é maior do que nesses países. As distribuições médias mensais da porcentagem e corrente de pico de raios NS positivos é muito similar, enquanto a distribuição média mensal da corrente de pico de raios NS negativos difere de outros países. As diferenças podem estar relacionadas com a injeção de grandes quantidades de fumaça proveniente de queimadas na atmosfera nos meses secos do ano, resultando numa correlação significativa entre a distribuição mensal do número de fogos e a corrente de pico negativa.

Bourscheidt et al. (2009) fizeram uma análise comparativa entre a densidade espacial de raios NS e parâmetros do terreno como altitude e inclinação do terreno na região sul do Brasil a partir de dados obtidos pelo *Brazilian Lightning Detection Network* (BrasilDAT) de junho de 2005 a maio de 2007 e pelo modelo de elevação digital *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Foi utilizado um modelo de detecção de eficiência para corrigir os dados de raios. Os resultados apresentaram que como a região é caracterizada por uma topografia contrastante, a densidade de raios NS é mais correlacionada com a inclinação do terreno do que com a altitude, sugerindo que a declividade do terreno exerce maior influência na ocorrência de tempestades e na atividade elétrica. Além disso, a análise temporal indica que em regiões de maiores altitudes a amplitude de variação diurna da atividade elétrica é maior, e o pico ocorre 1 h antes do que as regiões de baixas altitudes.

Pinto et al. (2009) apresentaram a primeira climatologia de raios LPCCG da região sudeste do Brasil em termos de densidade de raios, porcentagem de LPCCG positivos, corrente de pico e distribuição diurna com base em dados provenientes do BrasilDAT de 1999 a 2006, considerados apenas descargas detectadas nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março (aproximadamente verão do HS) e comparados com os resultados obtidos por Lyons et al. (1998), já descritos anteriormente. Os raios LPCCG representam apenas 3 % de todos as descargas obtidas neste período. As densidades de raios LPCCG positivos e negativos são diferentes das densidades de todos os raios, o que sugere que a distribuição da densidade de raios é dependente da corrente de pico. Foi observado também que a distribuição espacial de raios LPCCG positivos e da porcentagem de raios LPCCG positivos estão relacionadas com a ocorrência de SCMs.

Já se sabe que algumas variações espaciais e temporais estão relacionadas com aspectos climáticos e orográficos do local. A variabilidade horária de descargas elétricas sobre o continente é conhecida por ter um grande pico associado com o máximo de convecção no período da tarde, enquanto a variabilidade sazonal entre as estações de verão e inverno são bem documentadas, sendo que há um máximo de atividade no verão e mínimo no inverno. Na maior parte dos estudos foi encontrado porcentagem de raios positivos menores do que 10%, entretanto em alguns lugares há alguma significativa variação sazonal da polaridade do raio. A variabilidade interanual da atividade elétrica é pouco estudada devido à falta de estudos com um grande período de dados. Entretanto, Pinto Jr. et al. (2003) já tentou encontrar uma relação com o número anual de sistemas frontais, eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e com o Índice de Oscilação Sul (IOS), indicando que análises mais específicas são necessárias para entender as variações anuais.

4. DADOS E MÉTODO

Nesta seção, descreve-se sobre a fonte de dados, área de estudo e os passos metodológicos utilizados para atingir o objetivo descrito.

4.1 Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT)

A RINDAT é um SCLR brasileiro que consiste em um conjunto de sensores especializados (denominados LPATS III/IV, IMPACT, LS700x e LS8000) e centrais de processamento que possuem administração conjunta com duas instituições de pesquisa e duas empresas do setor energético: o instituto tecnológico SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a empresa FURNAS. A rede cobre cerca de um terço do território brasileiro, correspondendo aos estados de Goiás, Minas Gerais, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina (Figura 4.1) e permite detectar, em tempo real, a localização e horário de incidência das descargas atmosféricas NS, isto é, a maior parte dos raios que atingem essa região. Seus produtos são destinados a aplicações na previsão de tempo, na análise e manutenção dos sistemas elétricos de transmissão, de distribuição, na emissão de laudos de análise de tempo severo para seguradoras e empresas de engenharia e seus dados históricos foram e estão sendo utilizados para pesquisa científica.

A rede utiliza as tecnologias denominadas "Tempo de Chegada" ("Time of Arrival" - TOA) e "Localização da Direção Magnética" ("Magnetic Direction Finder" - MDF). A precisão das informações de localização de raios do sistema é, em média, de 500 metros dentro do perímetro definido pela posição das estações remotas de recepção. O sistema opera através do Sistema de Posicionamento Global ("Global Positioning System" - GPS), o qual proporciona informações de temporização de raios com resoluções de até 300 nanossegundos (<http://www.rindat.com.br/>).

Entre os produtos de visualização gerados pelo sistema se destacam: localização geográfica e temporal de descargas atmosféricas NS; localização de temporais; determinação de características de descargas como: valor estimado do pico da corrente de retorno, polaridade e número de componentes (multiplicidade) se a descarga for de natureza múltipla (<http://www.rindat.com.br/>). As informações sobre multiplicidade não foram utilizadas neste trabalho

Com base nas tecnologias atualmente disponíveis, a RINDAT apresenta as seguintes características principais: eficiência de detecção entre 70% e 90%, precisão de localização média entre 0,5 km e 2 km, precisão média da estimativa da corrente de pico das descargas de 20% a 50% e capacidade de discriminação entre as descargas NS e NN de cerca de 80% a 90%, sendo que estes valores variam regionalmente. (<http://www.rindat.com.br/>).

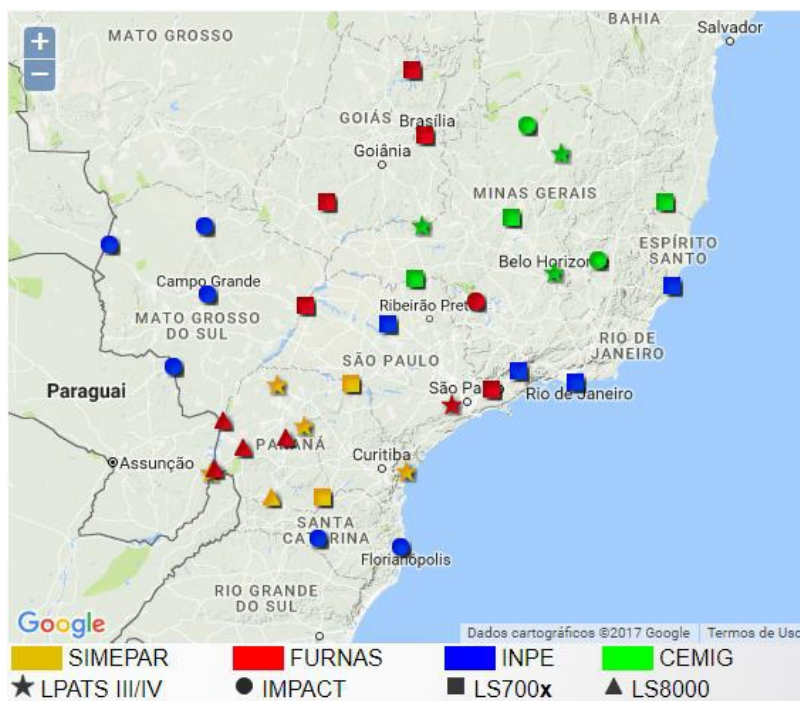


Figura 4.1 - Mapa de localização dos sensores ativos do sistema RINDAT identificados por tipo. (Fonte: <http://www.rindat.com.br/>).

4.2 Área de estudo

A RMRJ foi a região escolhida para a realização deste estudo devido a sua grande importância econômica, política e cultural. Segundo o IBGE (2017), o Rio de Janeiro é a segunda cidade mais populosa do país com população estimada em 6.498.837, alta densidade demográfica (5.265,82 habitantes/km²), área aproximada de 1200 km², segundo maior PIB e o maior destino turístico internacional do Brasil. O município é frequentemente atingido por eventos atmosféricos como tempestades que podem ser acompanhadas por chuva intensa, raios, ventos fortes, granizo, enchentes e deslizamentos de terra causando impactos diretos em diversos setores da sociedade como agricultura, aviação, indústria, navegação marítima, habitação, infraestrutura (rodovias, pontes, edifícios etc.), trânsito, eventos esportivos e inclusive ameaçando a vida humana.

A região de estudo consiste no quadrilátero formado entre as latitudes 22,7°S e 23,1°S e longitudes 43°W e 44°W, com área aproximada de 4.573 km². Ele cobre totalmente a área das cidades: Rio de Janeiro, Itaguaí, Mesquita, Nilópolis e São João de Meriti; parcialmente a área das cidades: Mangaratiba, Rio Claro, Pirai, Seropédica, Queimados, Nova Iguaçu, Belford Roxo, Duque de Caxias, Magé, Guapimirim, Itaboraí, São Gonçalo, Maricá e Niterói; quase totalmente a área da Baía de Guanabara e Baía de Sepetiba e parte da região oceânica adjacente da costa sul, conforme apresenta a Figura 4.2.

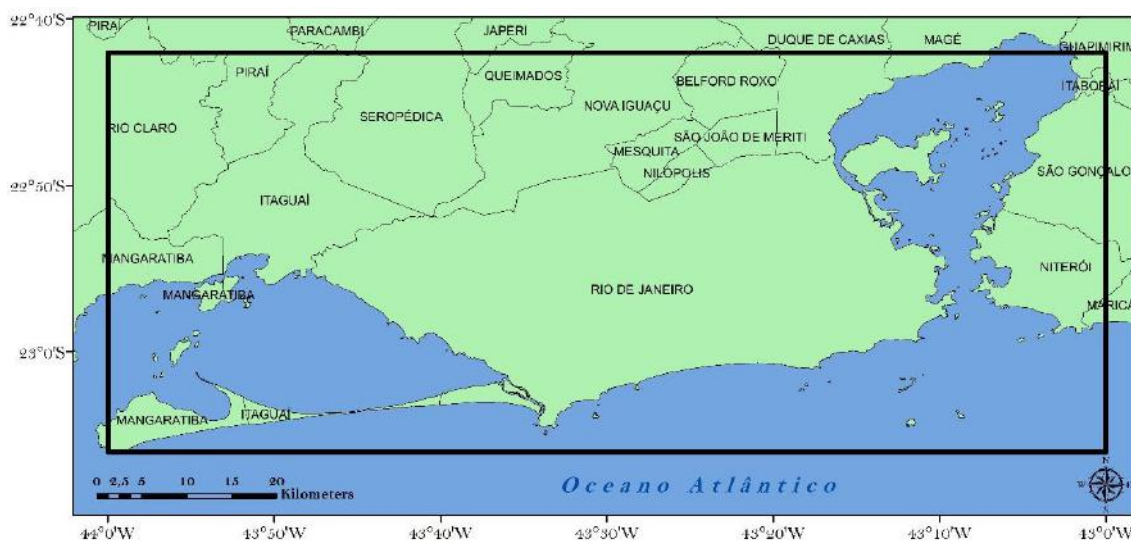


Figura 4.2 - Mapa da região de estudo. O quadrilátero formado entre as latitudes 22,7°S e 23,1°S e longitudes 43°W e 44°W representa a área em que foram filtrados os dados da RINDAT.

O período em que foram coletados dados neste trabalho foi do dia 20 de abril de 2000 até 31 de dezembro de 2016, entretanto, na maioria das análises foi considerado somente o período de 01 de janeiro de 2001 até 31 de dezembro de 2016, o que consiste numa climatologia de 16 anos.

4.3 Métodos e considerações

Para atingir o objetivo proposto, seguiram-se os seguintes passos metodológicos: a) definição da área de estudo; b) coleta dos dados da RINDAT; c) seleção dos dados para a área de estudo; d) ordenação e manipulação dos dados através do software Excel; e) criação de funções de contagem, cálculos e filtros para obtenção das seguintes estatísticas: porcentagem de raios positivos e negativos; variação sazonal da porcentagem de positivos; distribuição da corrente de pico para positivos e negativos; variação sazonal da quantidade de

raios; variação anual da porcentagem de positivos, quantidade total de raios, quantidade de raios por polaridade e corrente de pico; variação mensal da quantidade de raios, da corrente de pico e porcentagem de positivos; variação diária da quantidade total de raios, quantidade de raios por polaridade e corrente de pico;

- f) geração de mapas de densidade espacial de raios através do software ARCGIS;
- g) cálculo da taxa horária de incidência de raios para todo o período de estudo através do software Excel;
- h) determinação de sequências de ocorrências consecutivas de raios como forma de particularizar eventos de tempestade;
- i) cálculo aproximado da duração desses eventos;
- j) classificação dos eventos baseado na quantidade de raios de cada um;
- k) seleção dos eventos com maior quantidade de raios (análise dos percentis da série);
- l) obtenção das seguintes estatísticas dos eventos extremos: horário de início da atividade elétrica, duração, porcentagem de positivos, frequência média, frequência máxima em uma hora, corrente de pico dos positivos e negativos, número de raios por tempestade e distribuição sazonal;
- m) análise da variação temporal da frequência de raios a cada 15 minutos de uma amostra de 12 dos eventos extremos;
- n) estimativa da área da região de estudo (km²).

A rede RINDAT sofreu inúmeras alterações em sua configuração ao longo de todo seu período de operação, tanto pela adição de novos sensores quanto por falha nos sensores existentes, as quais afetam diretamente a eficiência de detecção em toda a rede, e consequentemente a qualidade dos dados de raios. Entretanto, os erros de detecção devido a alterações na rede não foram considerados neste trabalho devido a falta de informações sobre isso.

Na geração dos mapas de densidade mostrados na seção 5.2.2, foi realizado o comando de densidade de pontos (*point density*) pelo software ARCGIS, em que o tamanho da célula configurada para o cálculo da densidade (resolução) foi de 600 metros. O número de classes, o intervalo das classes e a resolução foram definidos através de tentativas para encontrar a melhor representação visual dos dados em cada mapa.

Na aproximação utilizada no capítulo 5.3 para particularizar os eventos de tempestades utilizando os dados de raios, considera-se o fato de que o tamanho da área de estudo utilizada neste trabalho (aproximadamente um retângulo de 100 x 45 km) é aproximadamente compatível com o tamanho de fenômenos atmosféricos de mesoescala, como grandes nuvens

Cumulusnimbus, por exemplo. Com isso, pelo tamanho da área de estudo, é possível afirmar que quanto maior for o tamanho da célula convectiva, é provável que os eventos de tempestade que geram descargas elétricas sobre este retângulo sejam causados pela existência ou pela passagem de uma célula convectiva (inteira ou parte dela) de cada vez. Sendo assim, é razoável sugerir que um evento de tempestade que provoca uma sequência de descargas elétricas dentro dessa região em um determinado período seja causado por um fenômeno atmosférico de mesoescala, formado por um ou mais núcleos convectivos e as características dessa sequência de raios vão variar conforme o ciclo de vida da(s) célula(s) convectiva(s) em atuação sobre a região. Entretanto, devido ao tamanho da área de estudo, é possível levantar a hipótese de que é mais provável que uma sequência de descargas seja causada pelo ciclo de vida de uma célula convectiva de cada vez, mas sem descartar a possibilidade de haver mais de uma atuando ao mesmo tempo.

Neste contexto, para particularizar um evento de tempestade baseado na série de dados de raios neste trabalho foi estabelecido o seguinte critério: um evento de tempestade é definido como uma sequência de descargas elétricas detectadas sobre a área de estudo, sendo que o intervalo de tempo entre duas descargas consecutivas desta sequência não exceda uma hora (tempo compatível com a duração do ciclo de vida de uma nuvem *cumulusnimbus*). Ou seja, se forem detectadas duas descargas consecutivas com mais de uma hora de intervalo entre elas, define-se dois eventos de tempestade consecutivos e diferentes, em que cada um dos raios faz parte de uma das tempestades.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo inicialmente apresenta-se uma análise detalhada das características das descargas elétricas atmosféricas detectadas pela RINDAT no período de 20/04/2000 até 31/12/2016 dentro da região de estudo, tal como a distribuição espaço-temporal e estatísticas dos dados. Em seguida é apresentado uma breve análise dos eventos de tempestades e casos extremos.

5.1 Características das descargas atmosféricas

5.1.1 Características gerais

Nesta seção são apresentados resultados que caracterizam de forma geral a incidência de descargas atmosféricas na RMRJ no período de 16 anos estudado.

A Figura 5.1 apresenta a porcentagem de raios positivos e negativos na região de estudo

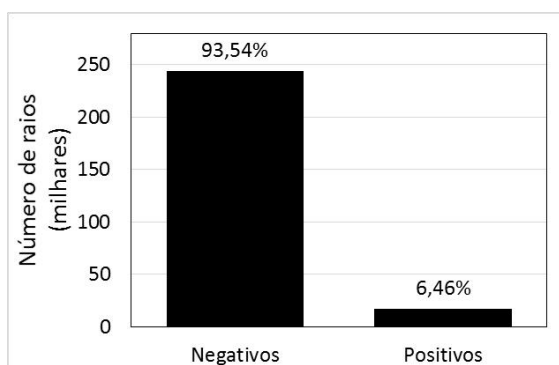


Figura 5.1 – Porcentagem de descargas elétricas nuvem-solo negativas e positivas detectadas no período de 16 anos (2001 - 2016) na RMRJ.

no período de 2001-2016, indicando que as descargas sobre a RMRJ são caracterizadas por serem predominantemente negativas (93,54 % de um total de 260.664 raios detectados). As variações sazonais e anuais dessa proporção serão apresentadas com mais detalhes posteriormente neste trabalho.

A Tabela 5.1 apresenta a porcentagem de raios positivos detectados em cada estação do ano e no período completo de 16 anos referente à 21/12/2000 até 21/12/2016. Foi observado que a porcentagem total de raios positivos permanece por volta de 6,5% e há pouca variação nas estações de verão, outono e primavera. No inverno este valor sobe para 12,1%, devido as características do inverno que favorecem a ocorrência de raios positivos como o maior

cisalhamento vertical do vento e a maior presença de aerossóis nesta estação do ano. Este resultado é aproximadamente compatível com o trabalho de Orville et al. (1997) na região de Papua-Nova Guiné em que a porcentagem de raios positivos varia por volta de 3-4% o ano todo. Orville et al. (1987) analisou resultados para o nordeste dos Estados Unidos onde a polaridade se inverte abruptamente chegando a 80% de raios positivos no inverno e menos de 5% no verão. Pinto et al. (1999) encontrou valores por volta de 35% tanto no verão como no inverno na região sudeste do Brasil e notou que nos trabalhos realizados em regiões tropicais apresentaram pouca variação de polaridade ao longo do ano enquanto em regiões de latitudes mais altas a porcentagem de raios positivos é maior nas tempestades de inverno do que no verão, concordando com o resultado encontrado neste trabalho. Informações mais detalhadas sobre variação mensal da porcentagem de positivos serão apresentada posteriormente neste trabalho, na seção 5.1.3.

Tabela 5.1 - Porcentagem de raios positivos em relação ao total para cada estação do ano referente ao período de 21/12/2000 até 21/12/2016.

Estação do ano	Porcentagem de raios positivos
Verão	6,38%
Outono	5,59%
Inverno	12,09%
Primavera	6,61%

A Figura 5.2 representa um histograma de distribuição da corrente de pico de raios nuvem-solo positivos e negativos na RMRJ, classificados em intervalos de 20 kA. Os valores médios da corrente de pico dos raios negativos e positivos foram 20,6 e 21,3 kA, respectivamente, enquanto os valores máximos encontrados foram 360 e 222 kA. A média da corrente de pico dos raios negativos foi diferente da encontrada em outros trabalhos realizados na região tropical como Pinto et al. [1996] no sudeste brasileiro (42 kA), Orville [1990] na Flórida (40 – 45 kA) e Petersen e Rutledge [1992] na Austrália (39 kA). Entretanto, a média do pico de corrente dos raios positivos foi similar a encontrada por Pinto et al. [1999] para o sudeste do Brasil (22 kA).

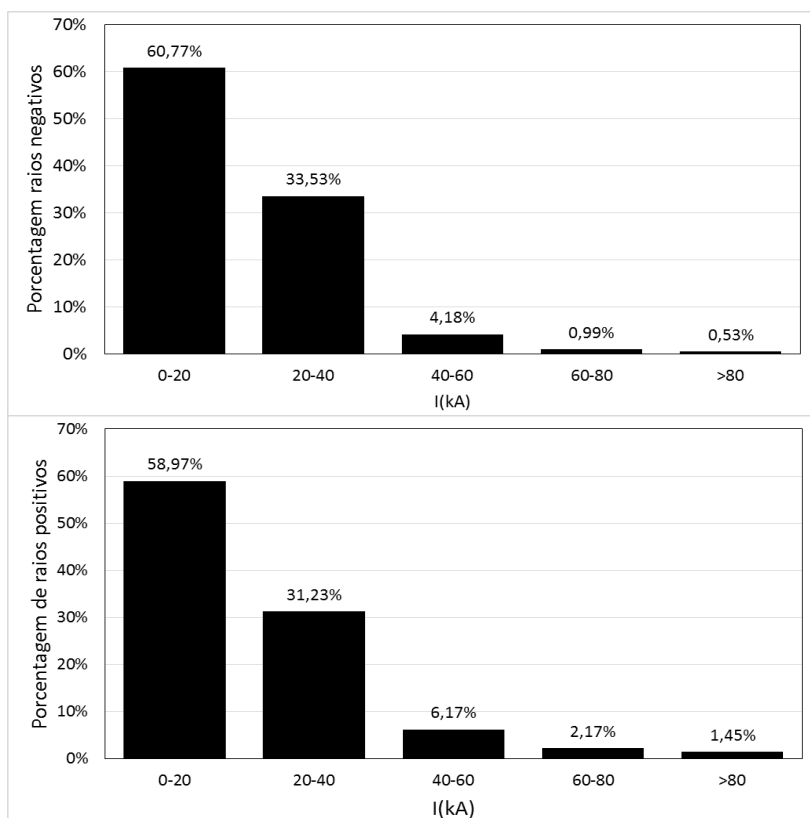


Figura 5.2 - Distribuição da corrente de pico de raios positivos e negativos para o período de 20/04/2000 a 31/12/2016.

A Figura 5.3 apresenta a distribuição sazonal de descargas elétricas nuvem-solo na RMRJ. Como esperado, a maior parte das descargas ocorreram no verão, correspondendo a 64,3% do total de descargas do período seguido pela primavera com 20,5%. O inverno é a estação com a menor frequência média de raios do período com apenas 2,3% do total. Essa distribuição é diferente da encontrada por Pinto et al. (1999b) para a região sudeste em 1993 que observou o máximo de atividade elétrica na primavera, o que pode ser explicado pela diferença na localização e tamanho da área de estudo.

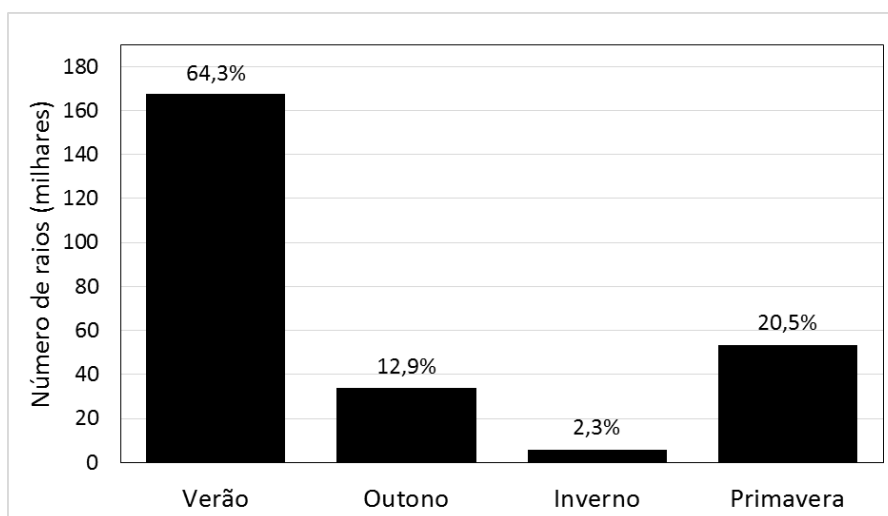


Figura 5.3 - Variação sazonal de descargas elétricas nuvem-solo para a RMRJ no período de 21/12/2000 – 21/12/2016.

5.1.2 Variação interanual

O estudo da variação interanual das características da incidência de descargas atmosféricas é uma parte importante neste trabalho pois ele possui um período de estudo de 16 anos (2001 – 2016) que é bem maior do que o período usualmente utilizado nos estudos feitos na região sudeste brasileira. Pinto Jr. et al. [2006] por exemplo, estudou raios nuvem-solo na região sudeste e parte das regiões centro-oeste e sul num período de 6 anos (1999 – 2004); Pinto Jr. et al. [2008] estudou a região do município de São Paulo num período de 8 anos (1999 – 2006); Pinto Jr. et al. (2003) fez um estudo de 7 anos somente dos raios nuvem-solo negativos no período 1989 – 1995 e Naccarato et al. [2005] abordou o período de 6 anos (1999 – 2004) para a região sudeste brasileira. Portanto, este trabalho permite uma análise das variações interanuais de forma abrangente permitindo identificar anos anômalos e relacionar com as características interanuais de outras variáveis de forma mais completa.

A variação interanual da porcentagem de raios positivos para o período de 2001 – 2016 é apresentada na Figura 5.4. Os valores variam entre 9,34% em 2007 e 3,85% em 2004, com o desvio padrão de 1,36% para este período. A amplitude de variação observada entre 2001 e 2016 é aproximadamente igual à amplitude intrasazonal apresentada na Tabela 5.1 e seu valor é por volta de 6 %, o que indica que a variação interanual da proporção de raios positivos pode ser significativa. As variações podem ser causadas pelas características da estação seca de cada ano, quantidade de aerossóis e processos microfísicos que não foram detalhados neste trabalho. Orville e Huffines [2001] apresentaram em seus resultados um aumento simultâneo da

porcentagem de raios positivos e a quantidade total de raios ao longo de 10 anos nos Estados Unidos e atribuíram essa variação ao aumento da sensibilidade da rede para as descargas mais fracas, porém, neste trabalho não foi observado uma relação clara entre essas variações e a quantidade total de raios.

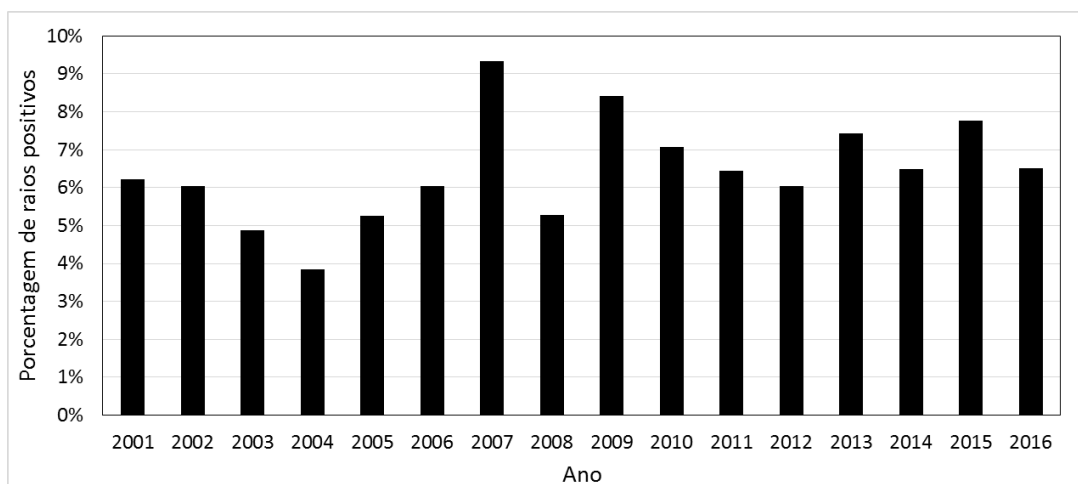


Figura 5.4 - Variação interanual da porcentagem de raios positivos referente ao período 2001 – 2016.

A variação interanual da quantidade de descargas elétricas na RMRJ no período estudado é apresentada na Figura 5.5. Observa-se uma média de 16.175 raios/ano com um desvio padrão de 7.121 raios/ano ($3,54 \pm 1,56$ raios.km⁻².ano⁻¹), o que indica uma grande variação ao longo dos anos. Os anos com os maiores totais anuais detectados pela rede foram 2001 (31.853 raios) e 2013 (24.445 raios), enquanto os anos com valores mais baixos foram 2007 (7.911 raios), 2011 (2.984 raios) e 2014 (6.137 raios). O pico mais extremo encontrado no ano de 2001 também foi observado no trabalho de Pinto e Pinto (2008) e Naccarato (2005) sobre a cidade de São Paulo e região sudeste do Brasil respectivamente, e pode estar associado com a ocorrência de um fenômeno de La Niña de média intensidade neste ano, discutido por Reis (2005) e Pinto et al. (2004b). Há um comportamento interessante na ocorrência de raios a partir de 2004, em que apresenta um padrão aproximadamente cíclico de crescimento nos períodos de 2004 a 2006, 2007 a 2009 e 2011 a 2013 e decréscimo nos períodos de 2006 a 2007, 2009 a 2011 e 2013 a 2014, o que indica a possibilidade de haver algum tipo de periodicidade na variação anual do número de raios sobre a RMRJ.

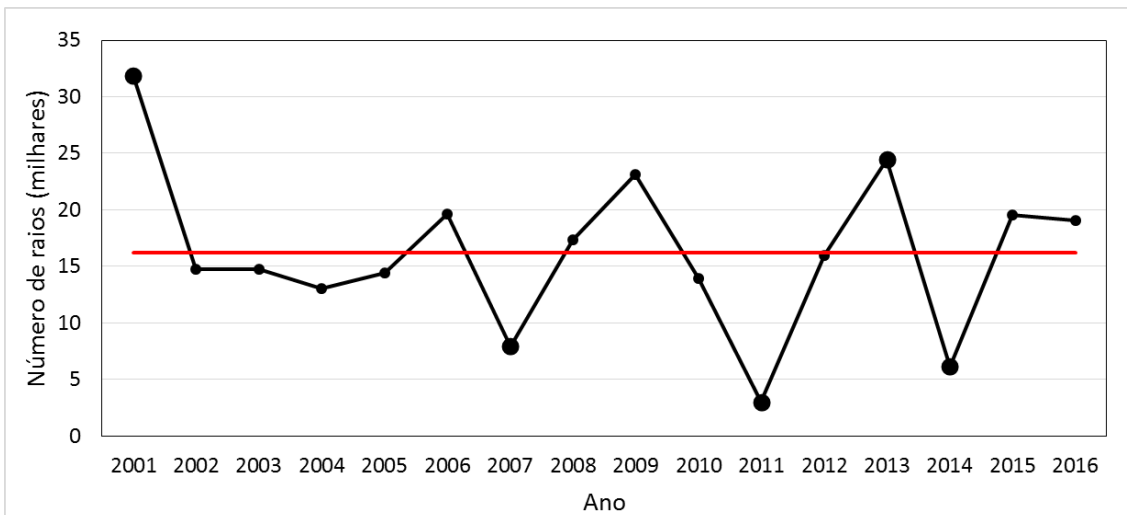


Figura 5.5 - Variação interanual do número total de raios detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016. A linha vermelha representa a média e os círculos pequenos e grandes representam, respectivamente, anos normais e anos que apresentaram valores fora do desvio padrão.

A Figura 5.6 apresenta a variação anual da quantidade de raios positivos e negativos ao longo do período 2001 - 2016. Comparando com a Figura 5.5, nota-se que as quantidades anuais totais de descargas atmosféricas são muito semelhantes ao número de raios negativos, devido a grande proporção desse tipo de raio como já apresentado anteriormente. É possível observar que as variações dos raios de ambas polaridades são semelhantes, e as diferenças podem ser explicadas pela variação interanual da proporção de raios positivos, apresentada na Figura 5.4.

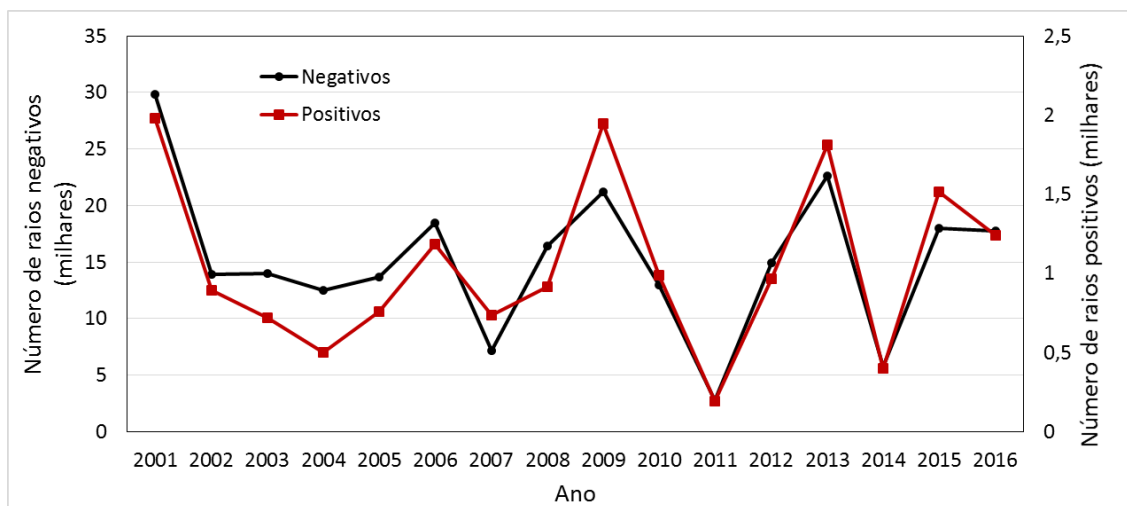


Figura 5.6 - Variação interanual do número de raios nuvem-solo positivos e negativos detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016.

A Figura 5.7 apresenta a variação anual da corrente de pico das descargas atmosféricas com ambas polaridades detectadas no período 2001-2016. O resultado observado para a RMRJ foi diferente do encontrado na região sudeste do Brasil (Naccarato. 2005), nos EUA (Orville e Huffines. 2001) e na Áustria (Schulz et al. 2005), os quais apresentaram para os raios negativos

valores aproximadamente constantes e mais baixos ao longo dos anos, enquanto os positivos possuem maior variação e valores mais altos. A variação da corrente de pico de raios negativos não apresentam valores estatisticamente significativos na RMRJ, enquanto os positivos apresentam uma tendência significativa de diminuição com o tempo de 0,77 kA/ano (teste ANOVA com 1% de nível de significância). Os valores médios da corrente de pico dos raios positivos são relativamente mais altos que os negativos na maior parte do período, apesar de que a partir de 2011 são observados valores mais baixos e uma tendência de queda de ambas as polaridades. Nos anos de 2003, 2004, 2008 e 2016 foram os únicos anos em que a diferença no valor médio da corrente de pico entre os positivos e negativos foi maior que 5 kA, ou seja, na maior parte dos anos ambas as polaridades apresentaram valores próximos.

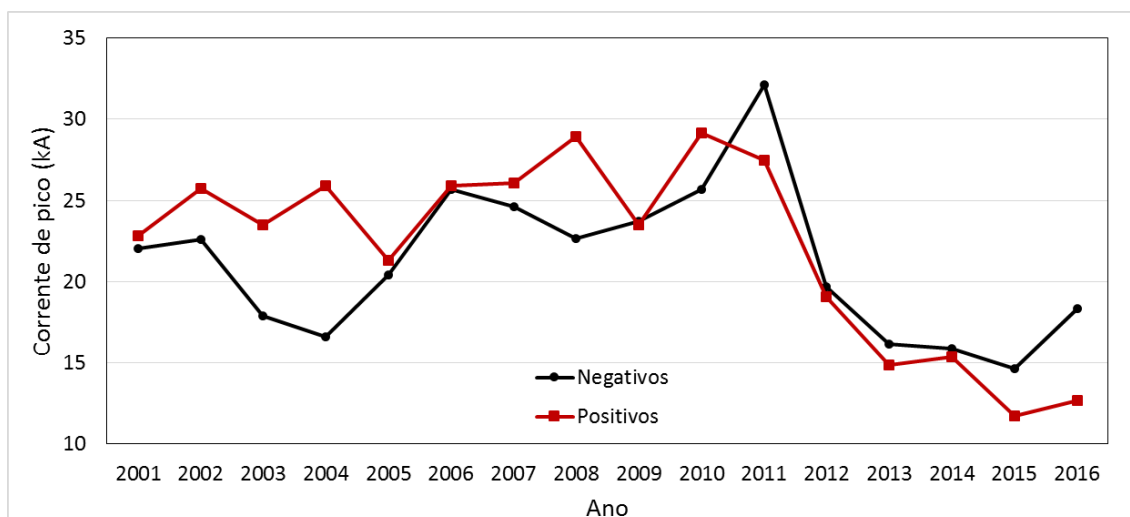


Figura 5.7 - Variação anual de valores médios da corrente de pico de raios nuvem-solo positivos e negativos detectados sobre a RMRJ para o período 2001-2016.

5.1.3 Variação intraanual

A Figura 5.8 apresenta a variação mensal do número médio raios (e não mais o número total) para o período 2001-2016. Nota-se que os meses com a maior frequência de descargas são de dezembro a março com valores acima de 2500 raios/mês correspondendo a mais de 80 % do total de raios detectados pela RINDAT no período, concordando com o comportamento sazonal no sudeste brasileiro já conhecido pelos trabalhos de Pinto et al. (1999); Naccarato et al. (2001a); Naccarato (2005) e Pinto Jr. et al. (2003b), assim como nos EUA no trabalho de Orville e Huffines (2001), na Europa com Soriano et al. (2001) e Schulz et al. (2005) e Oceania com Orville et al. (1997), que caracterizam a distribuição mensal de descargas elétricas na região próxima aos trópicos com maior atividade nos meses mais quentes do ano. O valor

máximo foi encontrado em fevereiro com a média de 4041 raios/mês (25% do total), enquanto os meses entre maio e agosto possuem médias inferiores a 130 raios/mês (3% do total). Não há diferenças significativas entre descargas atmosféricas de diferentes polaridades na variação mensal.

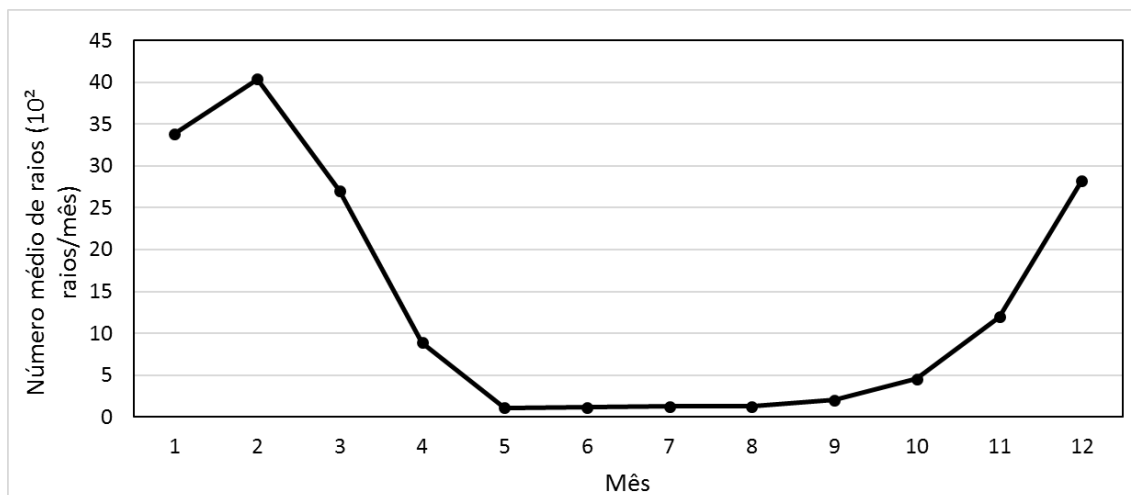


Figura 5.8 - Variação mensal do número médio de descargas elétricas nuvem-solo para o período 2001-2016 na RMRJ.

A Figura 5.9 apresenta a variação mensal da corrente de pico (valores médios) para descargas negativas e positivas, o que permite comparar as variações de ambas as polaridades. Nota-se que as variações entre as descargas de ambas as polaridades apresentam variações sazonais aproximadamente semelhantes, o que é diferente do resultado encontrado pelo trabalho de Naccarato (2005) na região sudeste brasileira, que possuem maiores diferenças nas variações entre raios positivos e negativos. A princípio, os raios negativos tendem a ser, em média, mais fortes do que os positivos de janeiro a março em termos de intensidade da corrente de pico, porém, a partir de março a intensidade se inverte tornando os positivos com maiores valores médios de corrente de pico durante a maior parte do ano. Portanto, em termos médios, os raios positivos são predominantemente mais intensos na maior parte do ano, com uma média anual de 23,8 kA, enquanto os negativos possuem a corrente de pico média de 20,5 kA. É possível observar que no verão e início do outono a corrente de pico média dos raios de ambas as polaridades apresentam valores próximos, porém, eles se distanciam nos meses mais frios (de maio a novembro com exceção de junho), o que pode sugerir mais uma vez que as descargas positivas possuem comportamentos distintos nas estações mais frias. Essa característica também foi encontrada por Naccarato (2005). Essa diferenciação pode ter relação com o início do período de queimadas ou presença de aerossóis que ocorrem nessa época do ano

principalmente no Cerrado brasileiro (predominantemente os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), em que os gases poluentes emitidos para a atmosfera nesta região são transportados para a região sudeste (Aires. 2001; Boian e Kirchhoff. 2004). O trabalho de Fernandes (2005) mostrou que há uma associação entre a redução da corrente dos raios negativos e o período de queimadas. Naccarato (2005) destacou ainda que na região sudeste há uma recuperação dos valores de corrente de pico conforme o verão se aproxima e se inicia o período de chuvas, limpando a atmosfera dos resíduos da queima de biomassa e que esses indícios mostram que se não houvesse queimadas, a corrente de pico dos raios negativos se manteria mais constante ao longo do ano e haveria menor diferença entre a corrente de pico dos raios positivos e negativos.

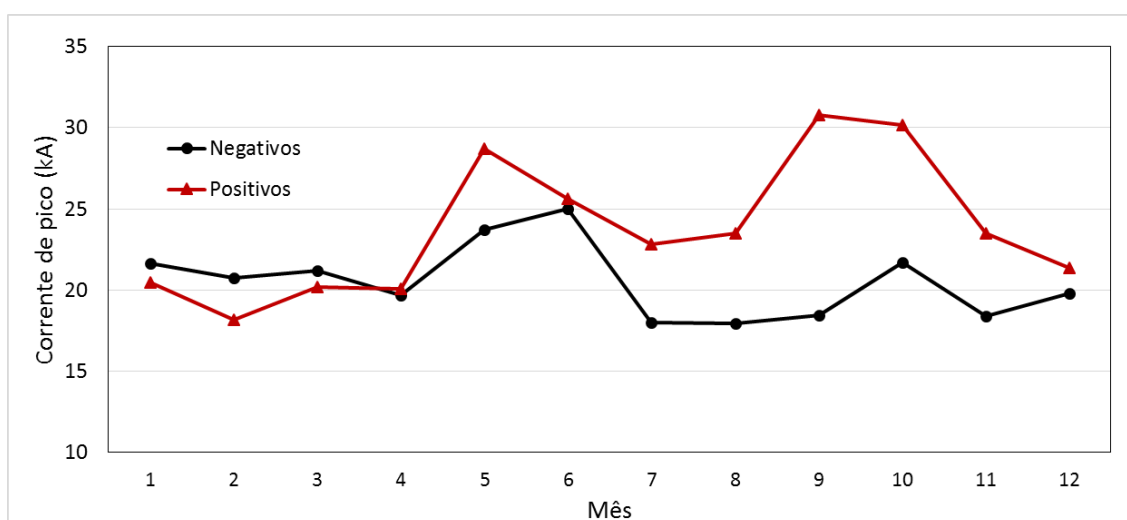


Figura 5.9 - Variação intraanual da corrente de pico média de descargas elétricas nuvem-solo positivas e negativas para o período 2001-2016 na RMRJ.

A variação intraanual da porcentagem de raios positivos é apresentada na Figura 5.10. Essa variação é caracterizada por duas cristas, a maior no mês de setembro (15,94 %) e a segunda no mês de junho (13,17%), enquanto os menores valores ocorrem em abril (5,01%) e fevereiro (5,70%). Foi notado que em 7 meses do ano a porcentagem dos positivos ficou dentro do estreito intervalo de 5 a 7 % e como apresentado anteriormente pela Tabela 5.1, foi identificado um aumento significativo na média do inverno (6,38% no verão para 12,09% no inverno). Foram encontrados resultados semelhantes por Naccarato (2005) na região sudeste do Brasil no período de 1999-2004, por Soriano et al. (2001) na Península Ibérica (5-7% no verão para 12-14% no inverno), por Schulz et al. (2005) na Áustria (10-11% no verão para 19-21% no inverno) e por Orville e Huffines (2001) nos EUA (de 4-5% no verão para 16-18% no inverno). Apesar da média do inverno ser quase o dobro das outras estações do ano, o mês de

julho apresentou valor comparável ao verão. Naccarato (2005) destacou que essa variação sazonal possui uma correlação inversa com o número de raios, que possui seu valor reduzido drasticamente no inverno, como apresentado na Figura 5.8. Orville e Huffines (2001) propõem que no inverno, o gradiente vertical da velocidade do vento é mais acentuado, causando um maior cisalhamento horizontal das nuvens e favorecendo a ocorrência de descargas atmosféricas positivas. Outra hipótese citada por Naccarato (2005) seriam as diferenças entre as características atmosféricas no inverno (maior atuação de sistemas frontais) e no verão (maior presença de tempestades convectivas). O primeiro pico registrado em junho pode estar relacionado com o início da estação do inverno, enquanto o segundo pico no mês de setembro foi um aspecto que também foi notado pelo trabalho de Naccarato (2005). Segundo ele, era de se esperar uma queda na porcentagem de negativos com o término do inverno, no entanto, a partir de agosto o percentual volta a crescer levando ao segundo pico em setembro, concordando com os resultados deste trabalho. Segundo Fernandes (2005), a hipótese levantada é a influência das queimadas como uma possível explicação para este comportamento, uma vez que o período de queimadas na região centro-oeste do Brasil está associado ao aumento do percentual de positivos nesta época do ano.

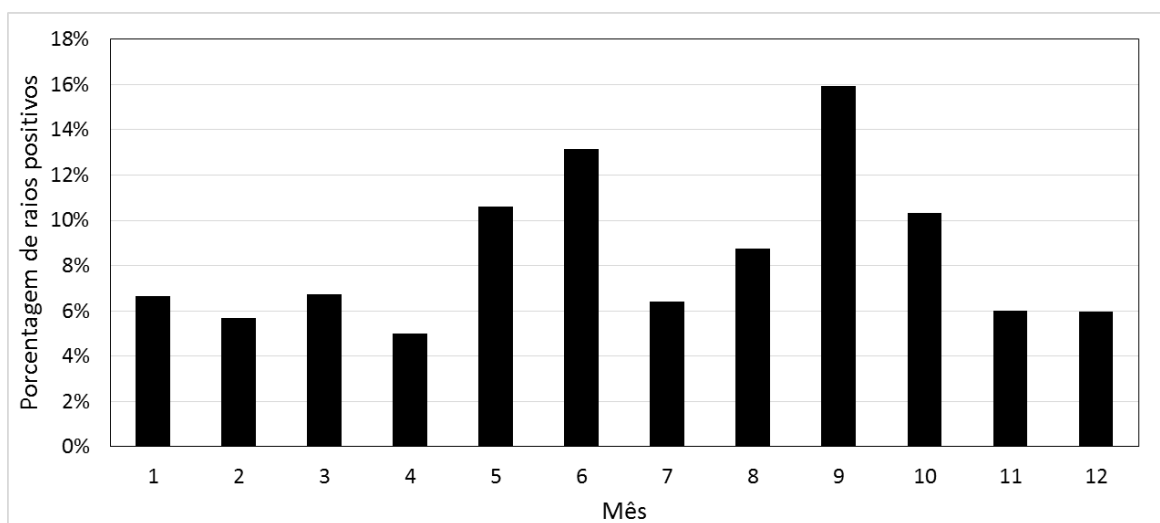


Figura 5.10 - Variação mensal da porcentagem de raios positivos referente ao período 2001 – 2016 na RMRJ.

A Figura 5.11 apresenta o acumulado diário da quantidade de raios em potências de base 10 para todos os dias do período estudado (2001 a 2016). Essa figura apresenta de forma sucinta a variação sazonal e interanual da ocorrência de raios, como já descrito anteriormente, com maior atividade na temporada de novembro a abril e menor no período de maio a outubro. Nota-

se que as regiões em vermelho representam os dias que ocorreram os eventos extremos em termos de atividade elétrica, que serão estudados posteriormente na seção 5.3.2.

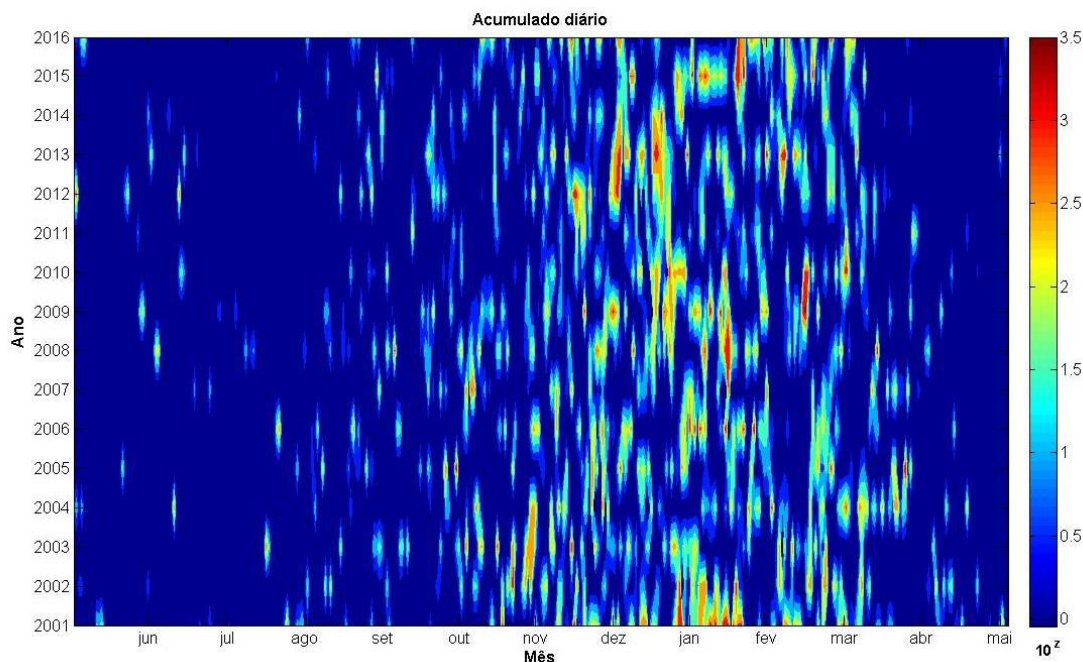


Figura 5.11 - Comportamento da distribuição mensal (abscissa) e interanual (ordenada) da taxa diária de raios, em potência de base 10, para período de 2001 a 2016.

5.1.4 Variação diurna

A Figura 5.12 apresenta a variação do número total de descargas elétricas NS com a hora do dia na RMRJ para o período 2000-2016. Observa-se uma variação típica diária com valores maiores no fim da tarde e começo da noite e valores menores durante a manhã. O período entre as 16 e as 20 horas (hora local) representa 56 % do total de descargas detectadas pela RINDAT e o horário que apresentou maior ocorrência de atividade elétrica atmosférica foi entre as 18 e 19 horas (hora local) com 15,4 % do total de descargas. Resultados similares foram encontrados por Pinto et al. (2008), Pinto et al. (1999b) e Bourscheidt et al. (2009) sobre o município de São Paulo/SP, região sudeste e região sul do Brasil respectivamente. O pico de atividade elétrica na atmosfera acompanha o ciclo diário de temperatura e insolação no período da tarde, horário em que há maior energia potencial disponível para convecção (CAPE), criando condições de instabilidade que propiciam a formação de tempestades convectivas geradoras de descargas atmosféricas. Orville e Huffines (2001) notou nos EUA que os horários de pico de atividade sofre a influência de fatores regionais.

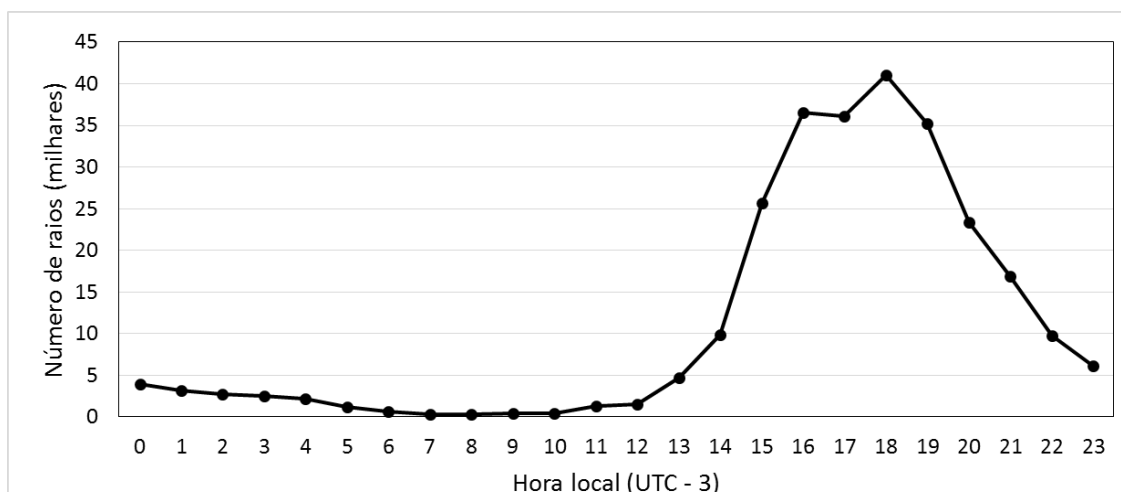


Figura 5.12 - Variação diária das descargas elétricas nuvem-solo para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.

A variação diurna do número de raios, porém agora separados por polaridade positiva e negativa, é apresentada na Figura 5.13. É importante ressaltar que a escala do número de raios positivos é reduzida e apresentada no eixo vertical secundário para facilitar a comparação com as informações dos raios negativos. Apesar de que o máximo de negativos ocorre no mesmo horário dos positivos (18h), é possível observar que a curva dos positivos ocorre aproximadamente 1h depois dos negativos. Este resultado é parecido com o encontrado por Naccarato (2005) na região sudeste brasileira entre 1999 e 2004, no qual observou que o pico dos positivos ocorreu 2 horas depois do pico dos negativos. Segundo MacGorman e Rust. (1998) e Rakov e Uman. (2003), isso ocorre pois a fase final das tempestades convectivas favorece a predominância de descargas positivas, cuja duração média é 1 hora.

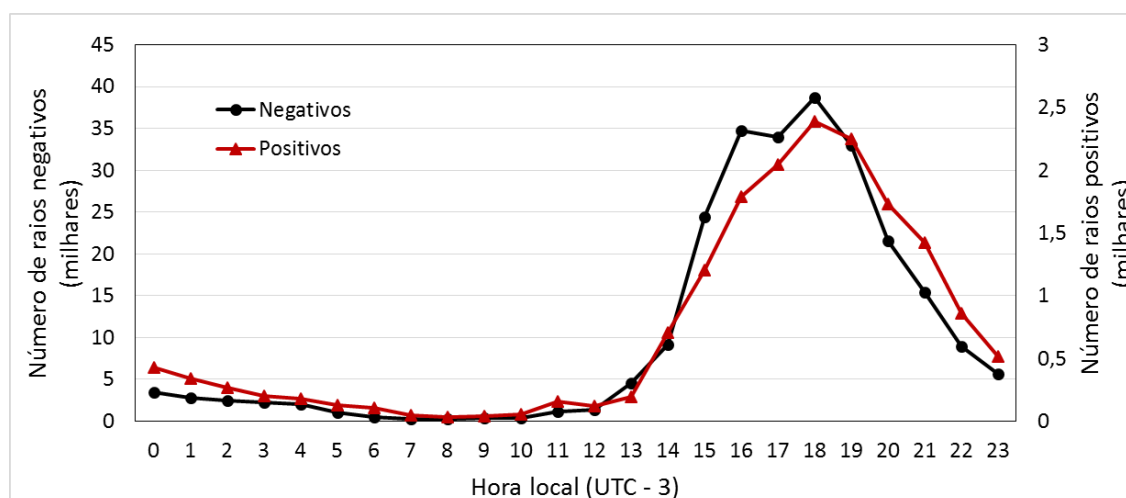


Figura 5.13 - Variação diária das descargas elétricas nuvem-solo positivas e negativas para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.

A fim de melhorar o entendimento do comportamento intraanual da incidência de raios, o ano foi dividido em duas temporadas. A temporada de maior atividade elétrica corresponde aos 6 meses com maior incidência de raios do ano, ocorre de novembro a abril e corresponde a 92,8% do total detectado pela rede no período de 20/04/2000 a 31/12/2016, enquanto a temporada de menor atividade elétrica ocorre de maio a outubro correspondendo ao semestre em que são detectadas as menores quantidades do ano, equivalente a 7,2% do total no mesmo período. Como observado anteriormente na Tabela 5.1 e discutido no item 5.1.3 (variação intra-anual), as características das descargas atmosféricas variam em função dos períodos mais quentes e frios do ano, como por exemplo a frequência de ocorrência, a variação da corrente de pico e a porcentagem de positivos.

Neste contexto, a Figura 5.14 apresenta a variação diurna dos raios separados pelos semestres de maior e menor atividade elétrica do ano explicadas acima. Nota-se que a temporada de novembro a abril apresenta comportamento muito semelhante à variação total dos raios apresentada pela Figura 5.12, devido à grande predominância de descargas que ocorrem nesse período que acabam guiando o comportamento intra-anual. Já na temporada de menor atividade (maio a outubro) é possível observar que o máximo principal ocorre no mesmo horário que a temporada de novembro a abril (19h), entretanto nota-se um comportamento diferenciado, em que há dois máximos secundários (um à 1h e outro as 5h da madrugada) e um mínimo relativo às 17h. Esse resultado mostra que as descargas ocorridas neste período devem ser analisadas separadamente e as diferenças no comportamento podem ser explicadas devido a maior porcentagem de raios de polaridade positivas que ocorrem nesta época devido às características como maior cisalhamento vertical do vento e conseqüentemente maior

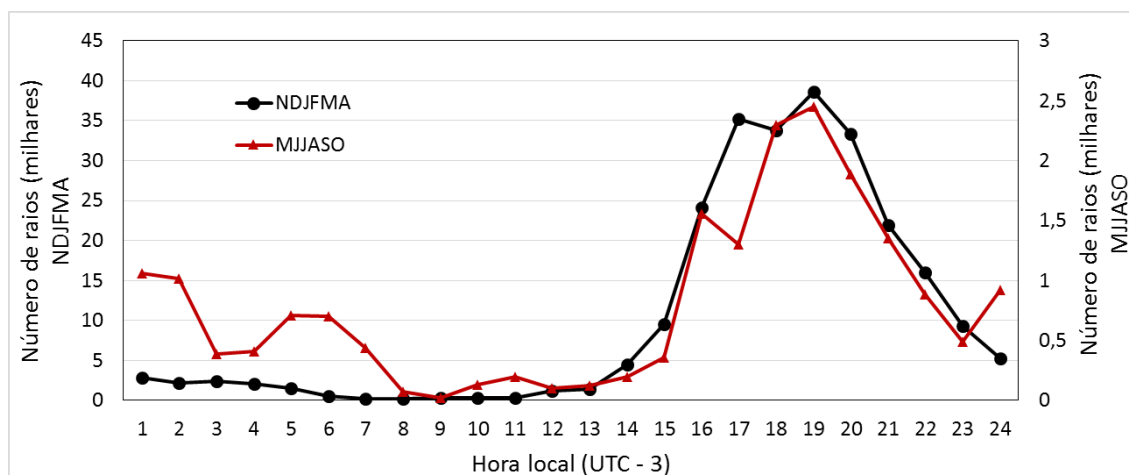


Figura 5.14. Variação diurna das descargas atmosféricas nuvem-solo separado pelo semestre com maior e menor atividade elétrica (novembro-abril e maio-outubro, respectivamente) do ano para o período 20/04/2000-31/12/2016 sobre a RMRJ.

inclinação das nuvens e a maior presença de aerossóis na atmosfera, como já discutido anteriormente.

A Figura 5.15 apresenta a variação diurna da corrente de pico separado por polaridade positiva e negativa detectados pela rede no período de 2001 a 2016. Assim como destacado na Figura 5.9, os raios positivos possuem, em média, valores de corrente superiores aos negativos. Apesar das variações parecerem bastante irregulares, é possível observar que a corrente dos positivos possui variações levemente mais acentuadas em função da hora do dia do que a dos negativos. Nota-se também uma diminuição brusca da corrente de ambas as polaridades aproximadamente a partir das 10h (a média dos positivos é de 26,72 kA antes das 10h caindo para 20,90 kA após, enquanto a média dos negativos é de 23,75 kA antes e cai para 19,84 kA após) e no período da tarde e noite as correntes vão aumentando gradualmente definindo um ciclo diurno com máximo aproximadamente no período da madrugada e manhã e mínimo no período da tarde e noite. No trabalho de Naccarato (2005) na região sudeste do Brasil também percebeu-se um ciclo diurno bem mais definido com máximo no período entre 3h e 7h (hora local – mais pronunciado para os positivos) e um mínimo entre as 13h e 16h (hora local), sendo que os valores dos positivos são mais elevados e possuem uma queda bem acentuada e a variação dos negativos é claramente mais suave. A hipótese levantada para explicar a variabilidade observada é que esse comportamento cíclico está associado com a origem das tempestades ao longo do dia. De acordo com Naccarato (2005), o período entre 22h e 11h (hora local), a atmosfera não apresenta características termodinâmicas necessárias para a formação de tempestades e a sua origem está mais relacionada com a passagem de sistemas frontais, enquanto no período entre 12h e 21h (hora local) as tempestades são causadas

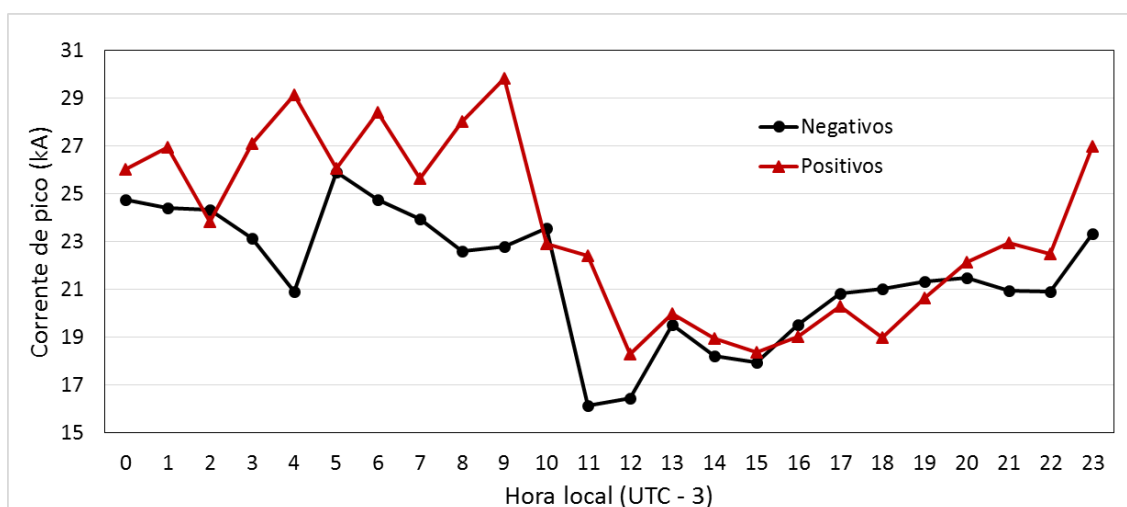


Figura 5.15 - Variação diurna da corrente de pico (valores médios) de descargas atmosféricas nuvem-solo separadas por polaridade positiva e negativa para o período 2001 a 2016 sobre a RMRJ.

predominantemente devido a instabilidade atmosférica causada pelo aumento da temperatura e troca de calor com a superfície.

A Figura 5.16 apresenta o comportamento da distribuição mensal e diária da taxa horária de raios, em potências de base 10, para período de 2001 a 2016. Essa figura mostra de forma sucinta a variação diurna da ocorrência de raios, como já descrito anteriormente, com maior atividade no período de 15 HL a 20 HL e menor nas outras horas do dia. Também é possível observar a distribuição sazonal, como mostrado anteriormente pelas figuras 5.3 e 5.8 em que os meses de maior ocorrência ficam na temporada de novembro a abril.

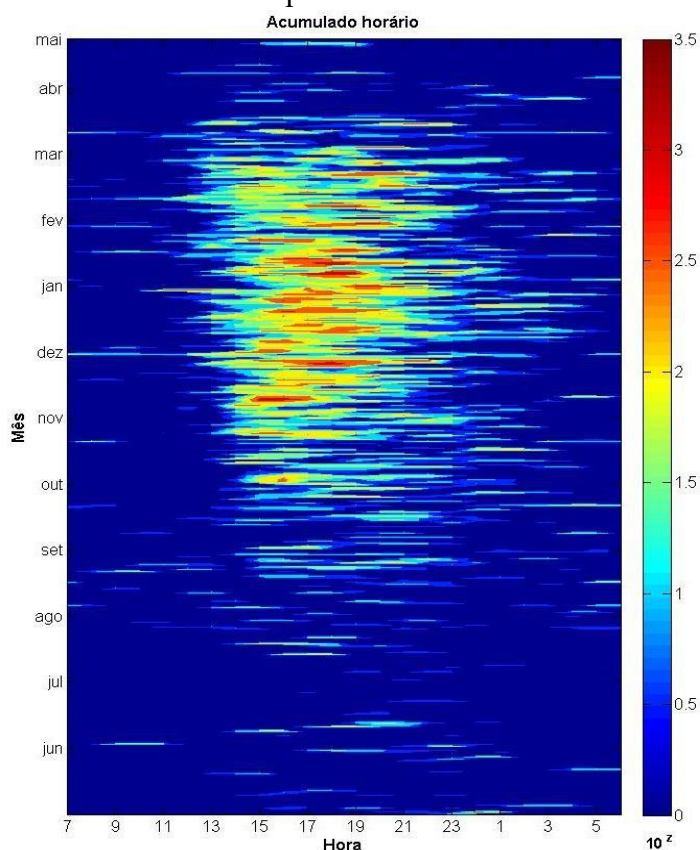


Figura 5.16 - Comportamento da distribuição mensal (ordenada) e diária (abscissa) da taxa horária de raios, em potência de base 10, para período de 2001 a 2016.

5.2 Distribuição geográfica

Nesta seção será apresentada uma breve descrição geográfica do relevo e em seguida uma análise da distribuição climatológica da densidade de raios na região de estudo para o período de 16 anos (2001 – 2016).

5.2.1 Descrição do relevo

Mangaratiba e Rio Claro. Engloba na região sul parte do litoral do estado do RJ com o Oceano Atlântico, à leste quase a totalidade da Baía de Guanabara, à sudoeste grande parte da Baía de Sepetiba, três grandes maciços litorâneos ao sul da Serra dos Órgãos: o Maciço da Tijuca, o Maciço da Pedra Branca e o Maciço do Mendanha e a sua área continental é predominantemente constituída pela região denominada Gráben da Guanabara (Figura 5.17).

O *Gráben* da Guanabara, definido por Almeida (1976), é a região que engloba toda a área de relevo deprimido que se estende desde a Baía de Sepetiba, a oeste, até a localidade da Barra de São João, a leste. Essa área faz fronteira ao norte com a Serra do Mar, que pode alcançar 2200 metros de altitude e pelos maciços litorâneos, ao sul, com altitudes máximas em torno de 1000 metros (Ferrari, 2001). Segundo Ferrari (1990), no interior do *Gráben* as altitudes raramente ultrapassam os 100 metros, com exceção para os maciços constituídos por rochas alcalinas, que podem chegar a quase 1000 metros (Figura 5.18).

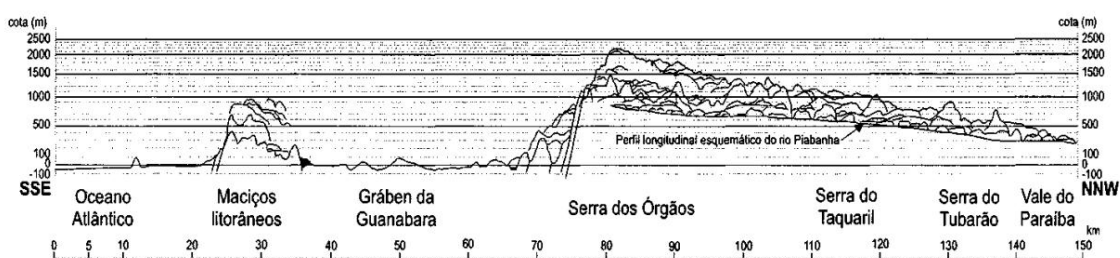


Figura 5.18 - Perfil esquemático transversal às estruturas geológicas da região entre o Oceano Atlântico e o Vale do Paraíba, no estado do Rio de Janeiro. A região correspondente ao *Gráben* da Guanabara encontra-se indicada. Escala vertical logarítmica. (Fonte: modificado de Ruellan, 1944).

5.2.2 Distribuição espacial da densidade de raios

A densidade espacial média de raios para o período de 16 anos (2001 – 2016) encontrada para a região de estudo é de $3,54 \text{ raios.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$. Entretanto, há uma grande variação espacial que será mostrada a seguir. A Figura 5.19 apresenta o mapa de densidade espacial de raios para os 16 anos de dados (2001 – 2016). É possível observar claramente uma maior frequência de ocorrência ao leste do município de Piraí, nordeste de Rio Claro, sudeste e leste de Nova Iguaçu, Belford Roxo e sudeste de Queimados. Nota-se um gradiente de densidade de sul para norte, em que as áreas oceânicas e próximas a costa possuem valores mais baixos em relação às regiões continentais ao norte e afastado da costa. A hipótese levantada para explicar essa distribuição são as diferenças entre as características do continente e oceano em termos de absorção de calor e variação de temperatura, como já explicado no capítulo 2.

Destaca-se também duas regiões separadas com altos valores de densidade: uma próxima ao município de Nova Iguaçu e outra à noroeste do retângulo que abrange o sul do município de Pirai. A distribuição próxima ao município de Nova Iguaçu pode ter relação com a presença do Maciço do Mendanha na região.

Essa configuração da distribuição de raios pode ser explicada através da comparação com dados de topografia da região, porém esta análise não foi realizada neste trabalho e fica como sugestão para trabalhos futuros. O trabalho de Naccarato (2005) mostrou que a configuração espacial dos máximos de densidade no sudeste de MG, sul do RJ e leste de SP segue com exatidão a elevação do terreno nessa mesma região (configuração da Serra da Mantiqueira), e resultados semelhantes também foram encontrados por Orville et al. (2002) e Burrows et al. (2002) para cadeias montanhosas nos EUA e Canadá, respectivamente. O fato das regiões com altos valores de densidade se localizarem na porção norte da área de estudo pode ser uma evidência de que o efeito orográfico da Serra dos Órgãos/Serra do Mar ao norte seja uma possível explicação para a distribuição de densidade observada, pois a frequente passagem de sistemas frontais e fontes tropicais de calor combinado com a dinâmica de ventos próximo à cadeia montanhosa induziria à formação de tempestades convectivas ao longo da parte sul da encosta (e não sobre ela), causando a maior ocorrência de descargas elétricas nesta região.

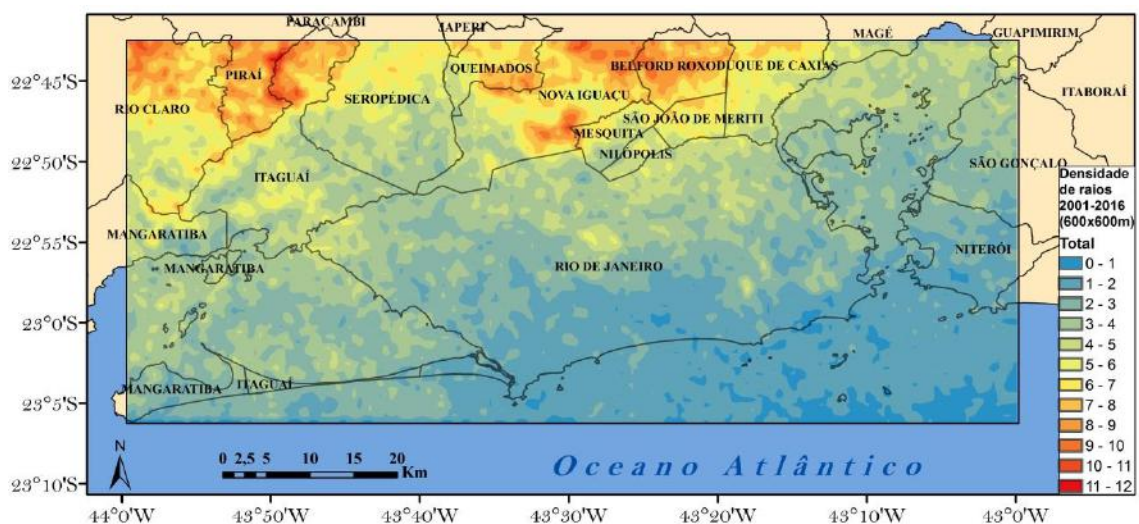


Figura 5.19 - Mapa de densidade espacial do total de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo (raios.km⁻².ano⁻¹).

A Figura 5.20 mostra a distribuição da densidade espacial dos raios que foram detectados na primavera e no verão, respectivamente. É possível observar que a configuração é semelhante à encontrada no total de descargas em ambos os mapas. Entretanto, nota-se que a escala apresenta valores reduzidos em comparação ao mapa do total de raios, principalmente

na primavera, em que a densidade varia de 0 a 3,25 raios.km⁻².ano⁻¹, enquanto no verão varia de 0 a 9 raios.km⁻².ano⁻¹, o que corresponde à proporção de raios que ocorrem em cada uma destas estações (apresentado anteriormente pela Figura 5.3).

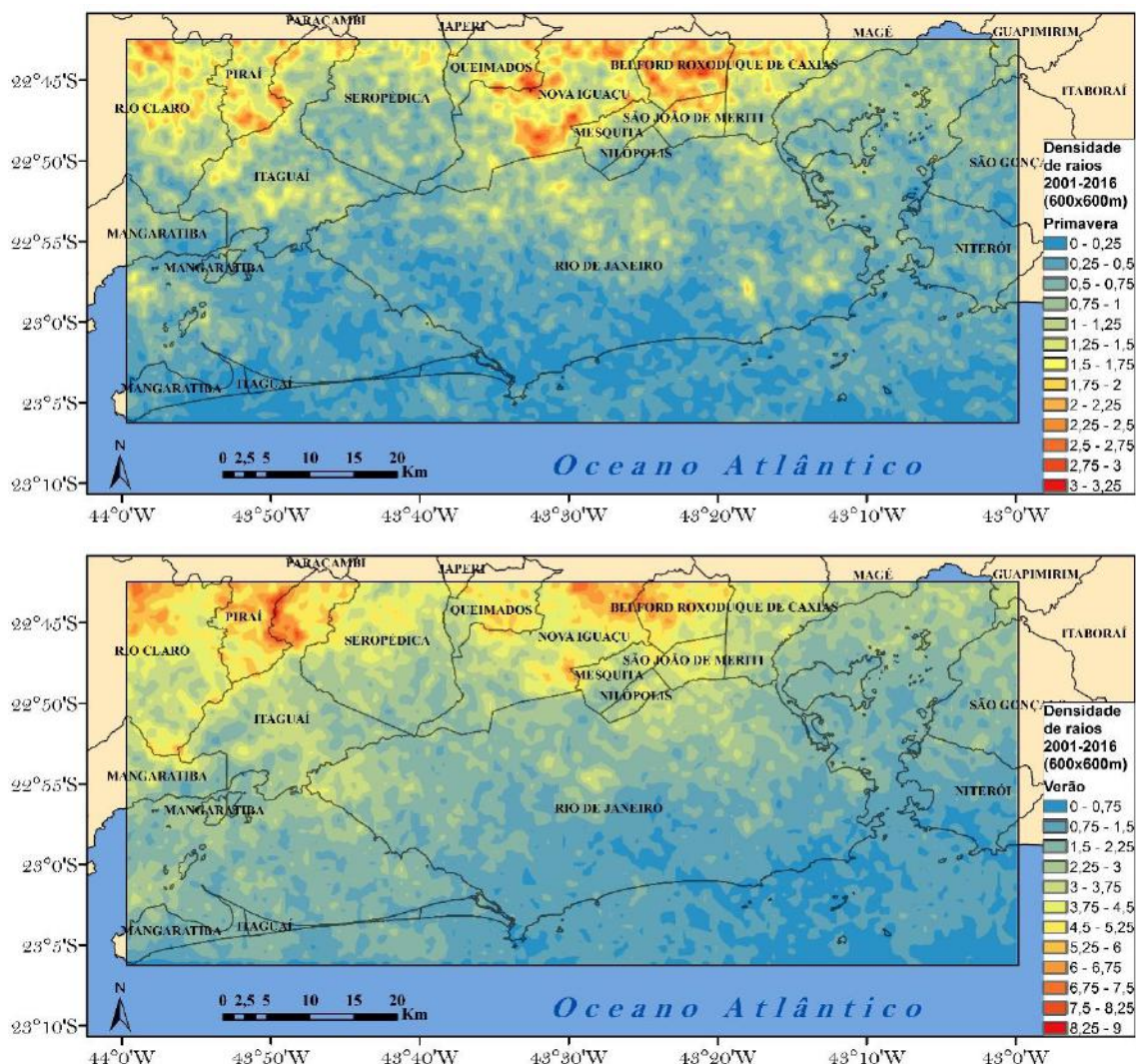


Figura 5.20 - Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para as estações de primavera e verão, nesta ordem (raios.km⁻².ano⁻¹).

A Figura 5.21 apresenta a distribuição da densidade espacial dos raios que foram detectados no outono e no inverno, respectivamente. Nota-se algumas diferenças na distribuição de densidades em comparação com o total e com as outras estações. No outono há regiões de alta densidade de descargas sobre a Baía de Sepetiba, um pequeno pico na região central da cidade do Rio de Janeiro e nas mesmas regiões dos mapas anteriores: um sobre Nova Iguaçu e outro sobre Pirai. No inverno é observado um comportamento bem diferente em relação às outras estações, como já esperado devido à baixa atividade elétrica que ocorre neste período. A região de maior destaque nesta estação fica à sudeste de Nova Iguaçu e/ou leste de Mesquita,

onde foi encontrado um pico de alta densidade em relação às regiões vizinhas, entretanto, o motivo deste fenômeno não é conhecido, mas pode ser a ocorrência de um caso isolado em algum inverno naquela região. A escala apresenta os menores valores em comparação aos mapas anteriores variando de 0 a 2,1 raios.km⁻².ano⁻¹ no outono e de 0 a 0,84 raios.km⁻².ano⁻¹ no inverno.

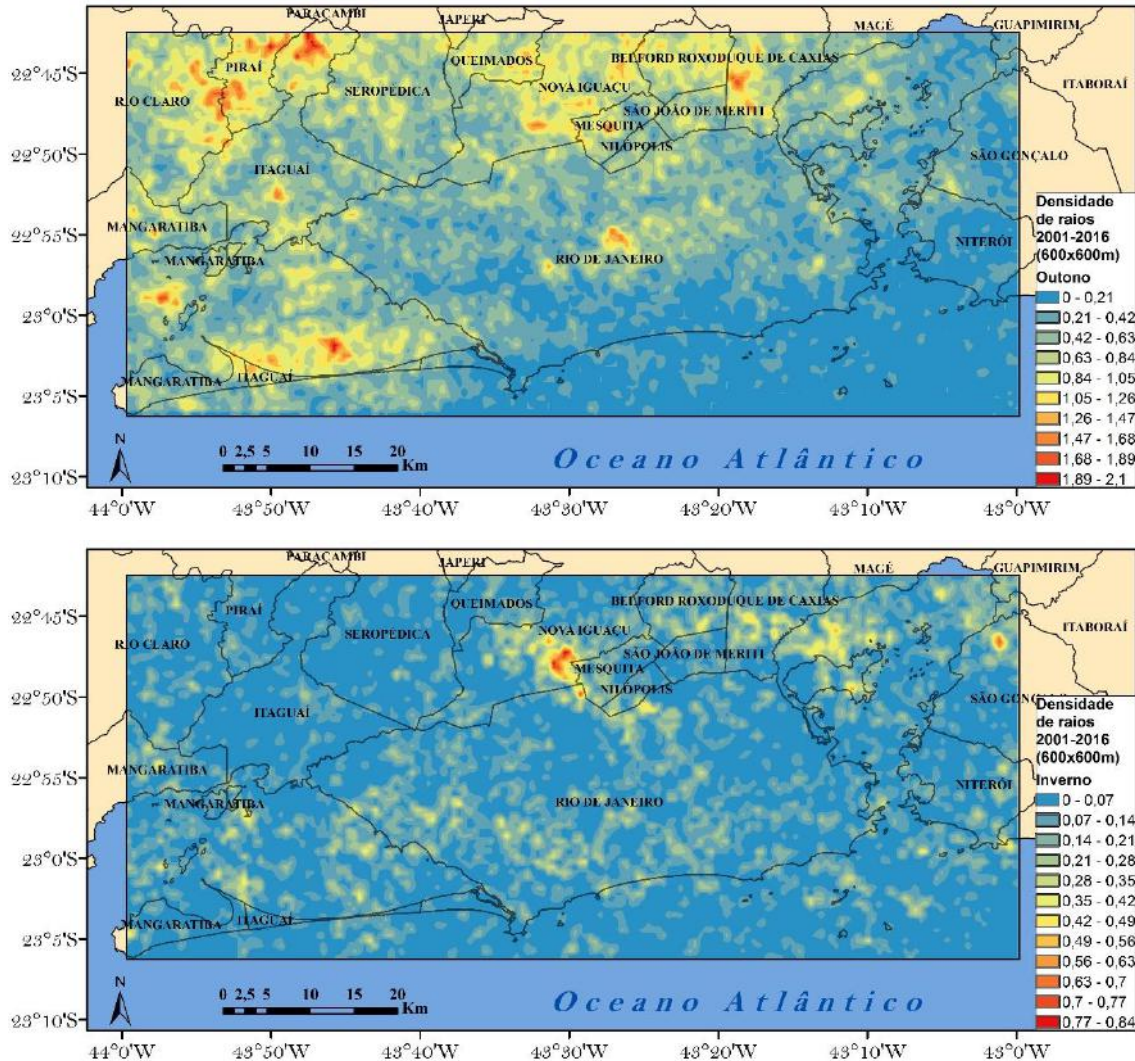


Figura 5.21 - Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para as estações de outono e inverno, nesta ordem (raios.km⁻².ano⁻¹).

A Figura 5.22 apresenta a distribuição da densidade espacial dos raios positivos e negativos, respectivamente. A configuração observada para os negativos é semelhante à encontrada no total de descargas devido a alta proporção de raios desse tipo de polaridade como mostrado anteriormente na Figura 5.1 (cerca de 97% dos raios são negativos). Já no mapa dos positivos é possível notar um leve aumento de densidade nas direções de leste para oeste e de sul para norte, culminando em uma região maiores valores na porção noroeste da área de estudo

(continentalidade). A densidade varia de 0 a 11 raios.km⁻².ano⁻¹ para os raios negativos, enquanto que para os positivos varia de 0 a 1,105 raios.km⁻².ano⁻¹.

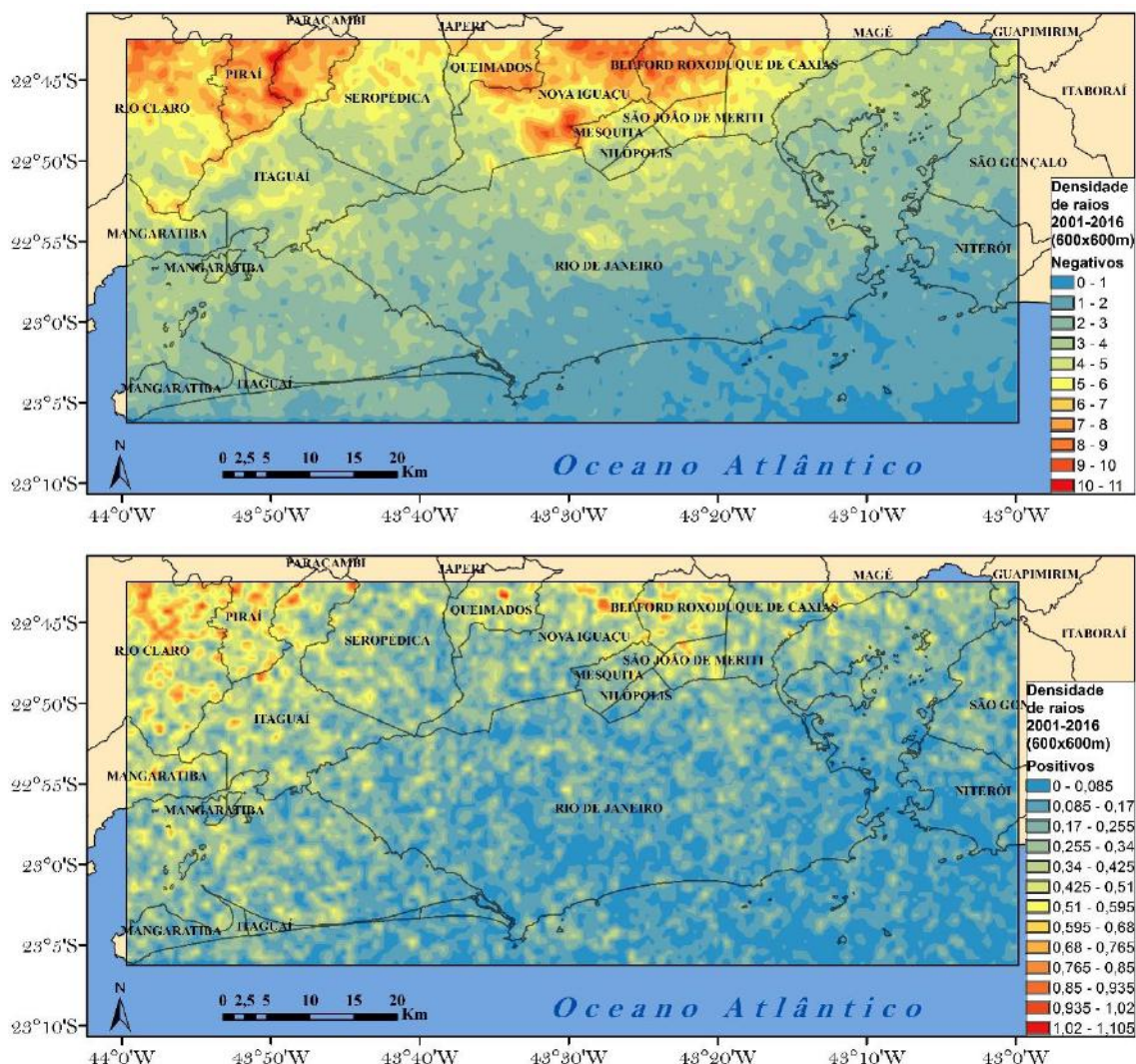


Figura 5.22 - Mapas de densidade espacial de descargas elétricas nuvem-solo no período de 2001 a 2016 na região de estudo para raios negativos e positivos, nesta ordem (raios.km⁻².ano⁻¹).

5.3 Análise de eventos

No estudo da análise espaço-temporal de descargas elétricas sobre a RMRJ, assim como em qualquer estudo climatológico, nota-se diversas características que são visíveis em termos médios e com um longo período de dados. O problema disso é que muitas vezes a média de um determinado fator é composto pela ação conjunta de uma grande quantidade de eventos e fenômenos complexos em um longo período, cada um com suas características específicas, o que pode mascarar as pequenas variações e esconder informações relevantes.

Sabe-se que as descargas elétricas são formadas por diversos processos de eletrificação durante o ciclo de vida de uma nuvem *Cumulonimbus*, que chamamos de tempestade, e a climatologia de raios de uma região é a resposta de um grande conjunto de eventos de tempestade que ocorreram sob diferentes circunstâncias momentâneas. A partir da observação das descargas elétricas, é possível notar que existem determinadas sequências de incidência de raios consecutivos com pouco intervalo de tempo entre eles, correspondendo ao período em que a atividade convectiva permaneceu ativa sobre a região de estudo, e através da análise do intervalo de tempo entre a ocorrência dos raios é possível verificar que cada raio pertence à uma determinada sequência. Por isso, este capítulo não pretende abordar a climatologia a partir da análise média de um conjunto de raios que foram detectados pela RINDAT, mas sim pelo ponto de vista da análise média um conjunto de sequências de raios que correspondem à eventos de tempestades que se formaram sobre a região e deixaram suas características gravadas através de um rastro de descargas elétricas. Para isso foi necessário particularizar os eventos de tempestade baseado nos dados de raios segundo o critério descrito na metodologia deste trabalho.

5.3.1 Estatísticas dos eventos

A partir do critério proposto, foi encontrado que todos os 266.028 raios detectados no período entre 20/04/2000 e 31/12/2016 estão distribuídos em 2.186 tempestades. Baseado no horário de início e de término de cada sequência de descargas foi possível obter a climatologia de duração das tempestades como apresenta a Figura 5.23. Nota-se que 44% ou 960 tempestades foram encontradas com até uma hora de duração. Isso ocorre pois o tipo de tempestade mais frequente é aquela em que toda a atividade convectiva que atuou sobre a região produziu poucos raios (52,0 % ou 1136 das tempestades produziram até 7 raios e 28,5 % ou 624 tempestades produziram apenas 1 raio dentro da região de estudo), determinando que grande parte dessas sequências com poucos raios iniciaram e terminaram dentro de um período menor que uma hora. É fácil observar que as tempestades com duração mais longa são cada vez menos frequentes, sendo que apenas 4,1% ou 90 casos duraram mais de 6 horas e apenas 0,2% ou 5 casos duraram mais de 10 horas. Tempestades de longa duração requerem uma grande quantidade de energia e constante aporte de umidade para se manter, por isso suas ocorrências são raras. O uso de dados de descargas elétricas para detecção do tempo de duração de tempestades se mostrou uma forma rápida e eficaz de obter esse tipo de informação, e pode ser

utilizado futuramente em estudos de duração de tempestades, entretanto vale ressaltar que a sequência de raios detectada pode não provir de uma única nuvem *Cumulonimbus*, e isso depende muito do tamanho da área a ser estudada.

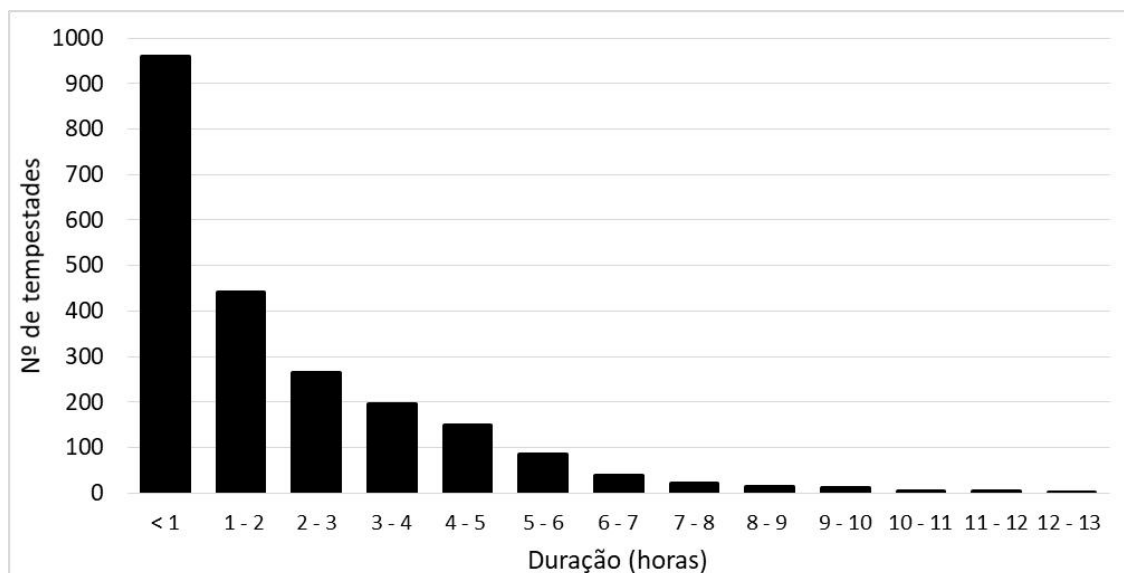


Figura 5.23 - Histograma de duração dos 2186 eventos de tempestade que ocorreram no período de 20/04/2000 – 31/12/2016.

Cada tempestade é composta por uma determinada quantidade de raios, que neste estudo variam de 1 a 4054. É razoável afirmar que medir a quantidade de descargas produzidas por cada tempestade é uma forma de medir a intensidade delas. Neste contexto, para ter uma idéia de intensidade das tempestades que ocorrem na RMRJ baseado na sua atividade elétrica, as quantidades de raios de cada tempestade foram colocadas em ordem decrescente e apresentadas na Figura 5.24. Ao analisar a série de número de raios por tempestade, foram calculados arbitrariamente os percentis 50, 75, 90, 95 e 99 e os resultados obtidos foram, respectivamente: 6, 64, 308, 666 e 1746, também indicados na Figura 5.24. Os percentis indicam que há uma grande quantidade de tempestades que provocaram uma quantidade muito baixa de raios, enquanto uma pequena minoria de tempestades geraram um grande número de descargas.

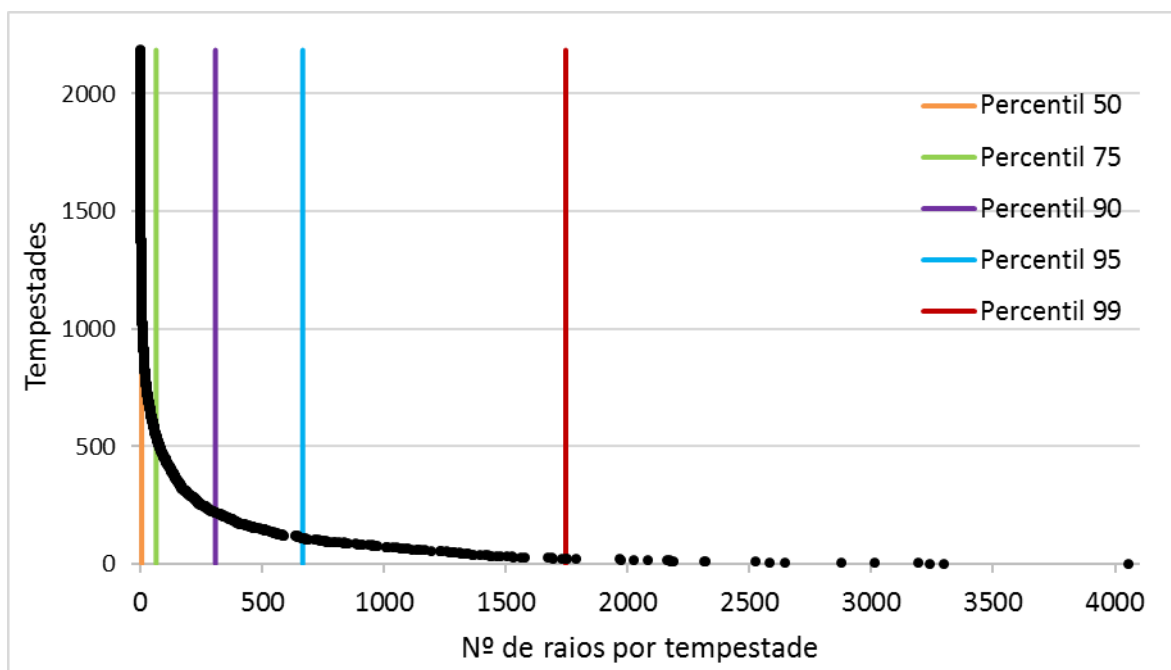


Figura 5.24 - Número de raios de cada tempestade, apresentadas em ordem crescente e as linhas verticais representam os percentis da série no período de 20/04/2000 a 31/12/2016.

A escolha dos percentis sugere uma maneira de classificar a intensidade da atividade elétrica das tempestades baseado na quantidade de raios em que cada uma delas provocou. As quantidades de eventos para cada classe de percentis são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Quantidade de eventos de tempestade classificados de acordo com o nível de atividade elétrica.

Percentil	Nº de raios por tempestade	Nº de tempestades
<50	<7	1056
50 - 75	7 - 64	583
75 - 90	65 - 308	328
90 - 95	309 - 666	109
95 - 99	667 - 1746	88
>99	> 1746	22

A relação entre a quantidade de raios por tempestade e o tempo de duração da atividade elétrica é apresentado pela Figura 5.25. Como esperado, é possível observar que nas tempestades de curta duração (até 4 horas), o aumento da quantidade máxima de raios por tempestade é aproximadamente proporcional ao aumento do tempo de duração. Entretanto, este comportamento não se mantém para os eventos com duração a partir de 5 horas. Nas tempestades que duram de 4 a 10 horas são encontrados os 22 casos acima do percentil 99 de atividade elétrica, representando os eventos mais extremos observados no período que serão

estudados especificamente na próxima seção. Nota-se que os eventos com maior duração (vistos no lado direito do gráfico) não correspondem necessariamente aos eventos com maiores quantidades de raios (em vermelho), indicando que estes podem ser classificados como casos extremos em termos de duração da atividade elétrica e devem ser estudados separadamente. A análise específica dos eventos de longa duração não foi realizada neste trabalho.

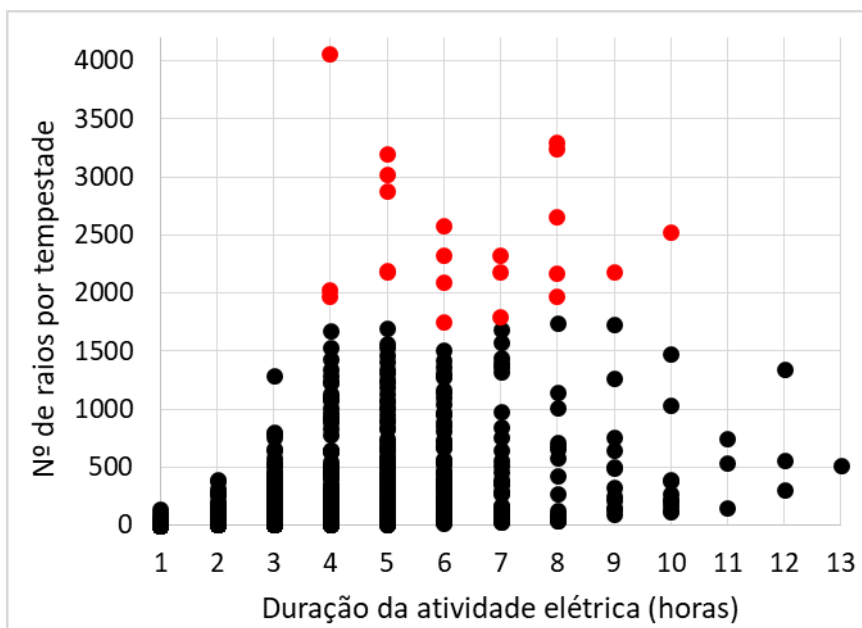


Figura 5.25 - Gráfico de dispersão entre o número de raios por tempestade e o tempo de duração da atividade elétrica. Os pontos em vermelho representam os 22 casos que estão acima do percentil 99 (1746 raios por tempestade), correspondendo aos eventos mais extremos em termos de atividade elétrica.

5.3.2 Análise dos eventos extremos

A seguir, serão analisados apenas os eventos de tempestade classificados como extremos, ou seja, acima do percentil 99, correspondendo aos 22 casos (1%) em que foram detectados a maior quantidade de raios em um único evento. As principais características de cada um destes eventos são apresentados na Tabela 5.3.

A distribuição mensal desses eventos extremos (Figura 5.26) é semelhante à climatologia apresentada no capítulo 5.1.3 pela Figura 5.8, com ocorrências entre os meses de outubro e abril com máximo no mês de fevereiro. Sabendo que no mês de outubro, segundo a climatologia apresentada anteriormente, ocorrem somente 3% das descargas detectadas no período de 16 anos (2001-2016), destaca-se a ocorrência atípica de um evento extremo no dia 28/10/2005, com 2177 raios registrados em 5 horas e meia (ver Tabela 5.3).

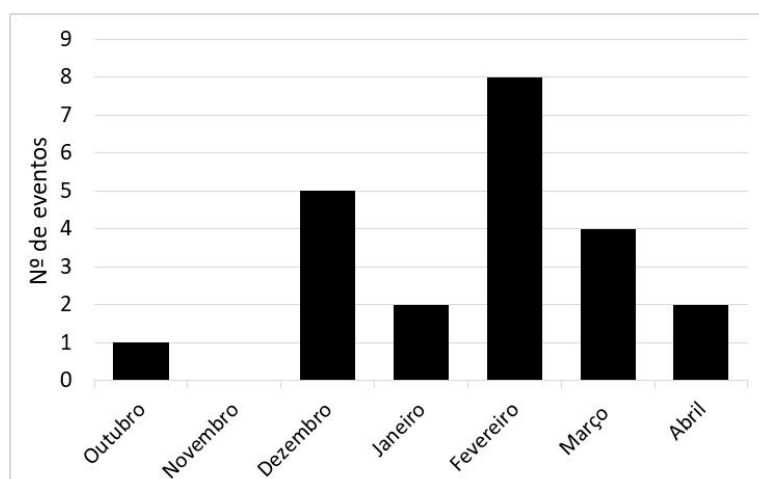


Figura 5.26 - Distribuição mensal dos 22 eventos que atingiram quantidades de raios acima de 1746 (percentil 99).

A Figura 5.27 apresenta de forma simplificada algumas das informações contidas na Tabela 5.3 sobre as características dos 22 eventos extremos estudados nesta seção através de *boxplots* que indicam os percentis 25 e 75, média, mediana, valores extremos e *outliers* dos dados. Destaca-se que o horário médio de início da atividade elétrica da tempestade (horário em que foi detectado o primeiro raio da sequência) ocorre as 16:30 HL variando entre 14:26 HL e 18:22 HL. A duração média dos eventos extremos fica entre 5 e 6 horas, mas seus valores variam entre 02:37 h e 07:58 h. O número de raios por tempestade é o parâmetro que caracteriza estes eventos como extremos neste trabalho. Seu valor médio corresponde à 2478 raios por tempestade variando entre 1786 e 4054 raios por tempestade. A frequência média indica a intensidade da tempestade baseado na quantidade de raios e sua duração. Seu valor médio é de 502 raios/hora e variando entre 272 e 1343 raios/hora. A frequência máxima em 1 hora representa o número de raios encontrado no intervalo de uma hora em que a atividade elétrica era máxima durante a tempestade. Seus valores variam entre 628 e 2300 raios e a média é de 1263 raios. A corrente de pico média dos raios negativos dessas tempestades varia entre -27,9 e -14,5 kA com média de -20,5 kA, enquanto a corrente de pico média dos positivos varia entre 9,4 e 34,9 kA com média de 19,8 kA. A porcentagem de positivos varia entre 1,4 e 12,4 % com média de 5,0 %. Destaca-se o evento do dia 13/03/2009, representado por um *outlier* nas séries de: duração, número de raios, intensidade média e porcentagem de positivos. Isso significa que, mesmo entre os eventos extremos, esse caso possui características anômalas.

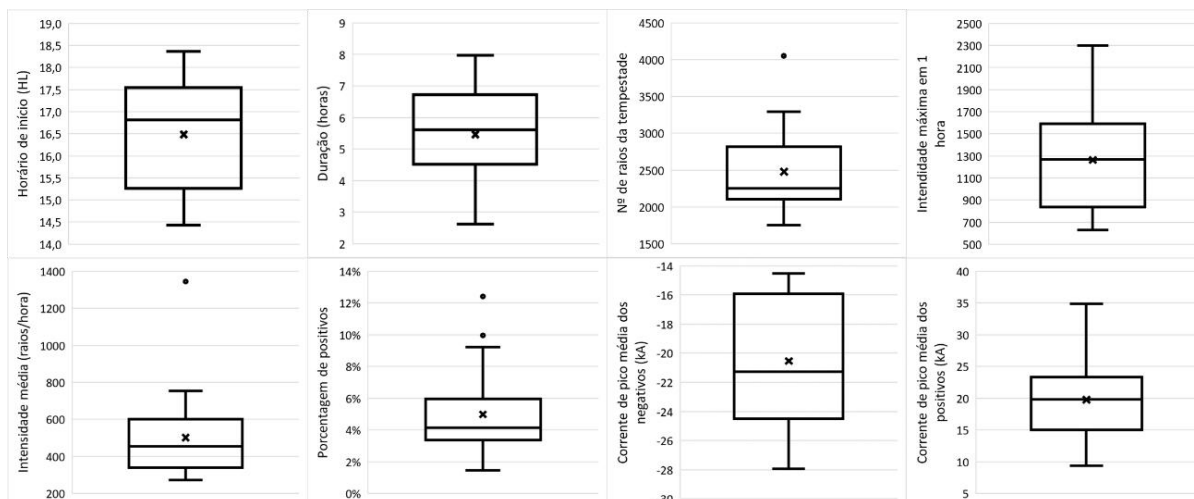


Figura 5.27 - Boxplots representando a distribuição das características dos eventos de tempestade apresentados na Tabela 5.3. As bordas superior e inferior do retângulo representam o percentil 75 e 25 da série, respectivamente, as extremidades da linha vertical indicam os valores máximo e mínimo excluindo os *outliers*, a linha horizontal central representa a mediana, o “X” mostra o valor médio e os pontos representam os *outliers* da série.

A Figura 5.28 representa a variação temporal da frequência de raios de uma amostra de 12 tempestades que possuem quantidade de raios acima de 1746 (percentil 99), destacadas em azul na Tabela 5.3. A variação temporal da frequência de raios de uma tempestade é uma resposta à entrada e/ou saída de núcleos convectivos ativos dentro da área de estudo e/ou das variações de intensidade da atividade convectiva, ou seja, na relação entre as variações dos movimentos ascendentes e descendentes dentro da nuvem com a formação de “bolsões” ou regiões de cargas de diferentes polaridades entre a atmosfera e superfície e conseqüentemente a produção de descargas elétricas para suavizar o desequilíbrio de cargas. Esse tipo de análise permite um estudo do ciclo de vida das tempestades. Apesar desses eventos terem sido todos classificados como extremos devido à quantidade de raios, observa-se características bem distintas entre cada um deles. É possível notar o horário de início e duração da tempestade, picos de frequência máxima, longos períodos de frequência baixa e intervalos de intensificação e enfraquecimento da atividade elétrica.

Tabela 5.3 - Lista dos 22 eventos de tempestade elétrica em que foram detectados as maiores quantidades de descargas elétricas com suas características. As linhas destacadas em azul são os eventos que tiveram sua sequência de descargas representadas temporalmente na Figura 5.28. A linha destacada em laranja representa o evento com a maior quantidade de raios e maior frequência média.

Data do evento	Horário de início (HJ)	Horário de término (HJ)	Duração (horas)	Nº de raios da tempestade	Frequência máxima em 1 hora	Frequência média (raios/hora)	Porcentagem de positivos	Corrente de pico média dos negativos (kA)	Corrente de pico média dos positivos (kA)	Quantidade de LPCCG
1 25/12/2000	16:05	23:04	06:59	1969	822	282,0	6,1%	-20,6	16,9	7
2 09/02/2001	17:00	23:20	06:20	1786	758	282,0	4,8%	-24,9	17,8	6
3 10/02/2001	14:26	20:28	06:02	2648	1359	438,9	4,2%	-22,5	20,3	12
4 28/03/2001	17:42	01:40	07:58	2174	733	272,9	5,5%	-20,6	21,4	12
5 13/12/2001	14:48	17:59	03:11	2026	910	636,4	2,6%	-14,8	18,7	0
6 12/12/2003	14:50	18:28	03:38	2178	1624	599,4	2,8%	-14,7	25,2	5
7 21/04/2005	17:45	23:33	05:48	3191	1644	550,2	8,0%	-15,8	17,4	3
8 28/10/2005	16:45	22:14	05:29	2177	628	397,0	2,0%	-25,4	26,6	13
9 27/01/2006	15:24	20:30	05:06	1752	771	343,5	7,5%	-27,9	26,2	25
10 10/02/2006	15:09	20:53	05:44	2320	760	404,7	3,4%	-27,9	34,9	34
11 21/02/2006	18:08	22:40	04:32	2878	1560	634,9	4,2%	-21,9	19,2	9
12 10/02/2008	16:54	19:31	02:37	1972	1188	753,6	1,7%	-22,0	21,7	7
13 11/02/2008	18:19	01:29	07:10	2164	1343	302,0	1,4%	-24,7	25,5	27
14 10/04/2008	18:22	23:26	05:04	2085	877	411,5	3,8%	-23,8	21,2	7
15 04/02/2009	18:21	23:45	05:24	2580	1221	477,8	3,4%	-23,2	23,6	21
16 13/03/2009	17:06	20:07	03:01	4054	2012	1343,9	12,4%	-25,5	22,8	81
17 13/12/2012	15:13	19:44	04:31	3014	2300	667,3	4,1%	-16,2	12,8	2
18 30/12/2012	16:05	22:56	06:51	2316	1006	338,1	3,6%	-16,9	14,4	1
19 14/01/2013	15:26	19:05	03:39	2190	1604	600,0	5,0%	-15,3	13,1	9
20 05/03/2013	16:52	23:07	06:15	3240	1417	518,4	10,0%	-15,8	12,2	5
21 15/02/2015	15:05	22:07	07:02	3296	1930	468,6	9,2%	-14,5	9,4	5
22 24/03/2016	16:52	00:41	07:49	2522	1316	322,6	3,8%	-16,7	13,7	0

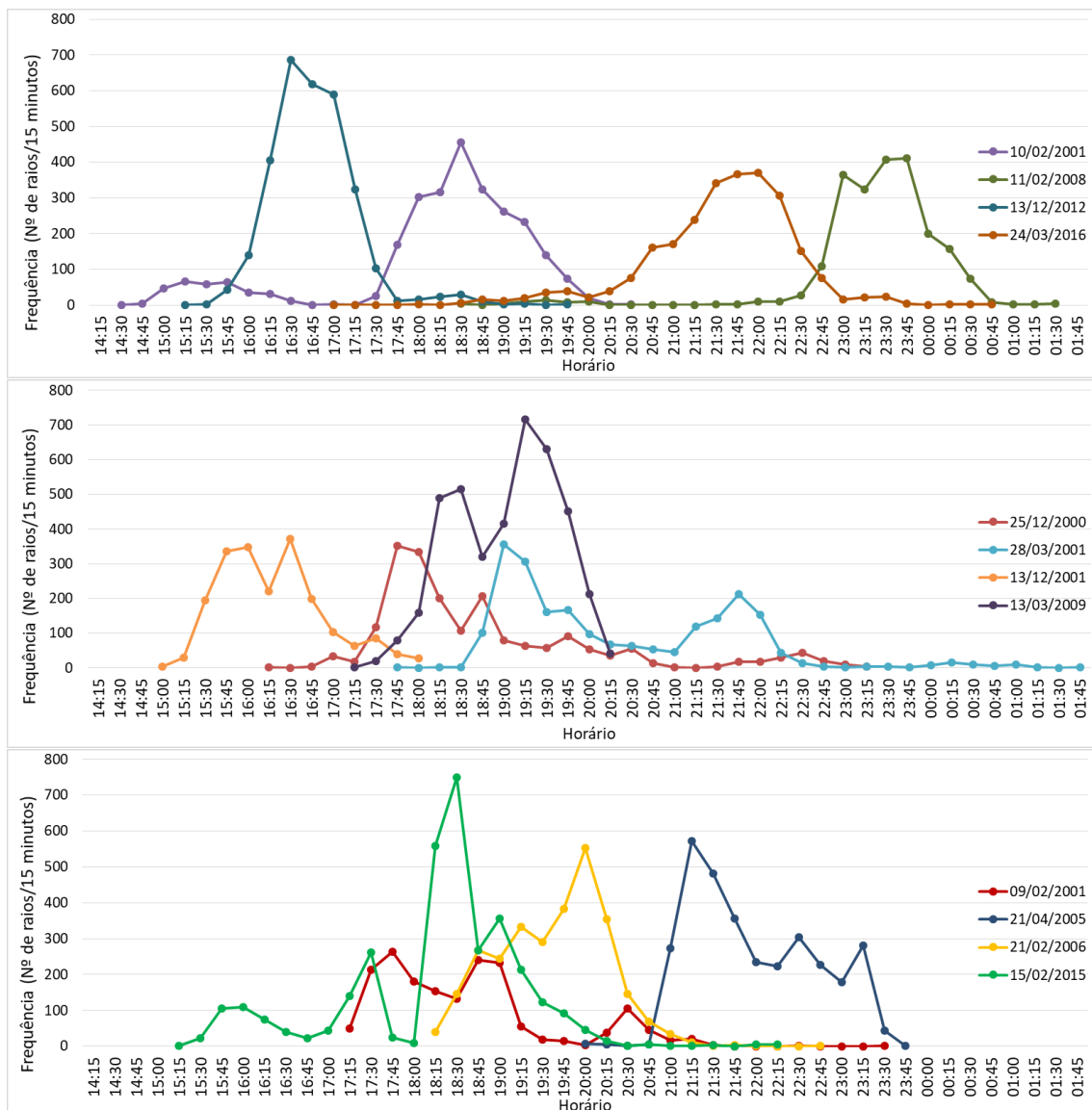


Figura 5.28 - Variação temporal da frequência de descargas elétricas de uma amostra de 12 das 22 tempestades que apresentaram mais do que 1746 raios por tempestade (percentil 99). O valor de cada ponto representa a quantidade de raios detectados na área de estudo no período de 15 minutos antecedentes ao horário correspondente no eixo das abcissas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho se estudou a distribuição espaço-temporal na RMRJ, usando dados da RINDAT - descargas elétricas atmosféricas totalizando 266.028 raios detectados - no período de 2001 a 2016. As principais conclusões são divididas em três partes, a saber: (1) o estudo climatológico das características temporais e espaciais dos raios NS; (2) análise estatística das características dos eventos de tempestade elétrica feita através da particularização de sequências de incidência consecutiva de raios; (3) estudo de casos com extrema atividade elétrica.

Através da análise das características temporais dos raios foi possível detectar comportamentos já conhecidos pela comunidade científica, comuns em diferentes regiões do globo: (1) Predominância de descargas com polaridade negativa; (2) Variação sazonal da polaridade, com aumento da porcentagem raios positivos no inverno; (3) Variação sazonal da quantidade de raios, com maior número encontrado no verão e mínimo no inverno; (4) Variação sazonal da intensidade da corrente (positivos são mais intensos no inverno/primavera e negativos são mais intensos no verão); (5) Relação entre a polaridade e intensidade da corrente (raios positivos são, em média, mais intensos do que os negativos); e (6) Ciclo diurno de atividade elétrica com máximo de ocorrência no fim da tarde e início da noite.

Quanto às características geográficas e temporais singulares observadas na RMRJ, podemos destacar que há grande variação anual da quantidade total de raios (16.175 ± 7.121 raios/ano), tendo a maior e menor atividade elétrica ocorrido em 2001 e 2011, respectivamente. Observou-se tendência de diminuição da corrente de pico dos positivos ao longo dos anos com significativa queda no período de 2011 a 2016. A maior incidência ocorre no final da tarde (entre 18-19 HL) e nos meses de primavera-verão (de novembro a abril ocorreram 93% dos eventos) com Fevereiro sendo o mês de maior incidência de raios, seguido por janeiro e dezembro, enquanto há um período de outono-inverno (maio a outubro) com atividade elétrica insignificante. A intensidade da corrente de pico dos raios positivos e negativos é maior no período de 00-10 HL e durante o verão. Por outro lado no inverno os raios positivos tem sua intensidade maior que os negativos e em setembro ocorreu uma diferença de cerca de 1/3, em concordância com o trabalho desenvolvido por Nacarato (2005). A análise dos mapas de densidade mostrou que há um gradiente de densidade espacial de raios de sul para norte da região de estudo, indicando o efeito oceânico na região ao sul e o efeito orográfico da encosta da Serra do Mar ao norte.

Através da análise estatística das características dos 2186 eventos de tempestade elétrica analisados, observou-se que a maior parte das tempestades elétricas são compostas por uma

pequena quantidade de raios, sendo 52,0 % destas produzindo no máximo 7 raios por evento. A duração da atividade elétrica de 44% das tempestades é inferior a uma hora, enquanto que as tempestades com longa duração são pouco frequentes (0,2% dos casos duraram mais de 10 horas). Vale ressaltar que a quantidade de raios por tempestade não varia proporcionalmente ao tempo de duração e os eventos de longa duração não correspondem necessariamente aos eventos grande atividade elétrica.

A partir da observação dos casos extremos que apresentaram quantidades de raios acima do percentil 99, foi possível verificar que o mês de maior ocorrência de tais eventos é fevereiro, que também corresponde ao mês com a maior atividade elétrica segundo a climatologia apresentada neste trabalho. Em geral tais eventos ocorrem no período da tarde, em média por volta das 16:30 HL, com duração média entre 5 e 6 horas. Nestes eventos, a corrente de pico dos raios negativos é ligeiramente maior que os positivos. As tempestades extremas normalmente iniciam com um período de intensificação e terminam com um período de enfraquecimento da frequência de raios e que pode durar em torno de 15 a 90 minutos, formando um ou mais picos de máxima frequência relativa. Os períodos de alta frequência de ocorrência de raios durante as tempestades intensas duram em torno de 15 a 45 minutos. Existem casos em que há um longo período em que a tempestade produz uma frequência relativamente baixa de raios (menor que 20 raios/15 minutos), que antecede o período de intensificação ou procede ao período de enfraquecimento, podendo durar até cerca de 200 minutos.

Ao analisar a climatologia e os eventos apresentados, fica evidente a necessidade de estudos mais detalhados sobre vários aspectos abordados neste trabalho. A seguir serão apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Este trabalho se mostrou importante para analisar a distribuição espaço temporal média no período de 16 anos apresentados. Entretanto, análises específicas do comportamento elétrico da atmosfera para cada ano, assim como análise de anos anômalos precisa ser estudada com mais detalhes, pois as características dos raios como polaridade, corrente de pico, variação sazonal e ciclo diurno diferem de ano pra ano e essas variações não são mostradas em uma análise climatológica. Além disso, é necessário estudar a relação da variação anual da atividade elétrica na região com outros fenômenos de variabilidade climática interanual, como por exemplo o sistema de El Niño Oscilação Sul (ENSO), a variação anual do número de sistemas frontais atuantes na região e número de eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Outro aspecto interessante para ser estudado que não foi abordado neste trabalho é a relação dos dados de atividade elétrica com outras variáveis meteorológicas. Como por

exemplo, é possível aplicar a metodologia do trabalho de Pinto Jr. e Pinto (2008), que estudou a sensibilidade da atividade elétrica com variações de temperatura da superfície nas escalas temporais: diária, mensal, anual e decadal na cidade de São Paulo. Estudar a relação da atividade elétrica com dados de precipitação, vento e rajadas de vento, temperatura da superfície, pressão atmosférica e até informações do perfil vertical atmosférica sobre estabilidade como CAPE, CINE, índices K, TT entre outros.

Sobre a análise de eventos de tempestade existem diversos campos a serem estudados. Neste trabalho a análise dos eventos extremos foi baseada na quantidade de raios por tempestade, mas uma outra sugestão seria aplicar a metodologia deste trabalho para analisar os eventos de longa duração (eventos acima do percentil 99 de duração das tempestades).

As alterações na configuração da rede de detecção devido a adição de novos sensores e falhas nos sensores existentes afetam diretamente a eficiência de detecção ao longo dos anos que não foi considerada neste trabalho. Sugere-se que seja desenvolvido e implementado um modelo para correção dos dados e melhorar a qualidade dos resultados.

Estudos anteriores da literatura mostraram que os grandes centros urbanos afetam o comportamento local dos raios, principalmente no aumento da densidade e porcentagem de positivos. Por isso, sugere-se que sejam utilizados dados de poluição e presença de aerossóis para entender como esses fatores atuam nas alterações observadas na atividade elétrica da RMRJ.

Este estudo destacou uma série de eventos significativos que ocorreram no período. Uma outra sugestão para trabalhos futuros é o estudo de caso aprofundado de cada um deles, abordando a fundo as características elétricas da tempestade, como por exemplo informações sobre a localização espacial dos raios que permite visualizar o desenvolvimento e o deslocamento do núcleo convectivo e a relação da ocorrência da tempestade com as condições meteorológicas do ambiente em que ela se encontra principalmente em termos da estabilidade termodinâmica do perfil vertical atmosférico.

Por fim, espera-se com esse trabalho que a pesquisa sobre raios no Rio de Janeiro seja retomada, contribuindo para a extensão do conhecimento sobre tempestades e eletricidade atmosférica em uma região que é frequentemente atingida por tais eventos e sofre com seus impactos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, C. B. Avaliação de contaminantes produzidos em locais de queimadas e transportados para regiões onde não se queima. 2001. 116p. (INPE-8433-TDI/775). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- Allan, Rob, Janette Lindesay, and David Parker. El Niño southern oscillation & climatic variability. CSIRO publishing, 1996.
- Almeida, F. F. M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin. An. Acad. Bras. Ci., Rio de Janeiro, 58 (suplemento): 15-26.
- Ballarotti, Maurício Grade. "Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida." (2005): 02-21.
- Blakeslee, R.J., Bailey, J.C., Koshak, W.J., Pinto Jr., O., 1999. The Rondonia lightning detection network: network description, data analysis, science objectives, and first results. Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, pp. 563–567.
- Boian, C.; Kirchoff, V. W. J. H. Measurements of CO in an aircraft experiment and their correlation with biomass burning and air mass origin in South America. Atmospheric Environment, v. 38, n. 37, p. 6337-6347, Dec. 2004.
- Bourscheidt, V., et al. "The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil." Atmospheric Research 91.2 (2009): 508-513.
- Burrows, W. R.; King, P.; Lewis, P. J.; Kochtubajda, B; Snyder, B.; Turcotte, V. Lightning occurrence patterns over Canada and adjacent United States from lightning detection network observations. Atmosphere-Ocean, v. 40, n. 1, p. 59-80, Mar. 2002.
- Cardoso, Iara. "Os Números (SURPREENDENTES) de Mortes por Raios no Brasil." Scientific American Brasil (2011): 42-45.

- Chaudhuri, Sutapa, and Anirban Middey. "Nowcasting lightning flash rate and peak wind gusts associated with severe thunderstorms using remotely sensed TRMM-LIS data." *International journal of remote sensing* 34.5 (2013): 1576-1590.
- Chowdhuri, P., et al. "Parameters of lightning strokes: a review." *IEEE Transactions on Power Delivery* 20.1 (2005): 346-358.
- Christian, H. J.; Blakeslee, R. J.; Goodman, S. J.; Mach, D. A.; Stewart, M. F.; Buechler, D. E.; Koshak, W. J.; Hall, J. M.; Boeck, W. L.; Driscoll, K. T.; Boccippio, D. J. The Lightning Imaging Sensor. In: *International Conference on Atmospheric Electricity*, 11., 1999, Guntersville, EUA. *Proceedings...* Guntersville: International Committee on Atmospheric Electricity, 1999. p.746-749. Publicado como: (NASA/CP-1999-209261)
- 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.; Stewart, M. F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 108, n.D1, 4005, doi:10.1029/2002JD002347, Jan. 2003.
- Fernandes, W. A. Características dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob a influência das queimadas em Rondônia. 2005. 161p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (Não publicado).
- Ferrari, A. L. "A geologia do "rift" da Guanabara (RJ) na sua porção centro-ocidental e sua relação com o embasamento Pré-Cambriano." *Congresso Brasileiro de Geologia*. Vol. 36. 1990.
- Ferrari, André Luiz. *Evolução tectônica do Graben da Guanabara*. Diss. Universidade de São Paulo, 2001.
- Gin, R.B.B. Estudo das características dos relâmpagos nuvem-solo em Minas Gerais no verão de 1993. (Dissertação de Doutorado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, julho 1996 (INPE).

- Hamid, Effrina Yanti, Zen-Ichiro Kawasaki, and Redy Mardiana. "Impact of the 1997–98 El Nino event on lightning activity over Indonesia." *Geophysical research letters* 28.1 (2001): 147-150.
- Hansen, James, and Sergej Lebedeff. "Global trends of measured surface air temperature." *Journal of Geophysical Research* 92.13 (1987): 345-13.
- Hodanish, Stephen, et al. "A 10-yr monthly lightning climatology of Florida: 1986–95." *Weather and forecasting* 12.3 (1997): 439-448.
- Hojo, J., et al. "Seasonal variation of cloud-to-ground lightning flash characteristics in the coastal area of the Sea of Japan." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 94.D11 (1989): 13207-13212.
- Huffines, Gary R., and Richard E. Orville. "Lightning ground flash density and thunderstorm duration in the continental United States: 1989–96." *Journal of Applied Meteorology* 38.7 (1999): 1013-1019.
- Legler, D. Enso Index According to JMA SSTA (1868-pres). Disp.: <www.coaps.fsu.edu/~legler/jmaindex.html>. Acesso em: 21 mai. 2001. 1998.
- Lopez, Raúl E., and Ronald L. Holle. "Diurnal and spatial variability of lightning activity in northeastern Colorado and central Florida during the summer." *Monthly Weather Review* 114.7 (1986): 1288-1312.
- Lyons, Walter A., et al. "Enhanced positive cloud-to-ground lightning in thunderstorms ingesting smoke from fires." *Science* 282.5386 (1998): 77-80.
- Lyons, Walter A., Marek Uliasz, and Thomas E. Nelson. "Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the summer months in the contiguous United States." *Monthly weather review* 126.8 (1998): 2217-2233.

- MacGorman, D. R.; Rust W. D. The electrical nature of storms. Nova York: Oxford University Press, 1998. 422p.
- Markson, Ralph. "The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years." *Bulletin of the American Meteorological Society* 88.2 (2007): 223-241.
- Naccarato, K.P.; Pinto, O. Jr.; Pinto, I.R.C.A.; Cazetta, A. Filho; Amorim, G.E. Lightning characteristics in the southeastern region of Brazil: 1999-2000. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 7., 2001, Salvador, Brasil. Proceedings.. Salvador: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), 2001(a). CD-ROM.*
- Naccarato, Kr P. *Análise das Características dos relâmpagos na região Sudeste do Brasil. São José dos Campos. Diss. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.*
- Orville, Richard E., et al. "Cloud-to-ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 92.D5 (1987): 5640-5644.
- Orville, Richard E. "Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude." *Nature* 343.6254 (1990): 149.
- Orville, Richard E. "Lightning ground flash density in the contiguous United States-1989." *Monthly Weather Review* 119.2 (1991): 573-577.
- Orville, Richard E., et al. "Lightning in the region of the TOGA COARE." *Bulletin of the American Meteorological Society* 78.6 (1997): 1055-1067.
- Orville, R. E.; Huffines, G. R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98. *Monthly Weather Review*, v. 129, n. 5, p. 1179-1193, May 2001.

- Orville, R. E.; Huffines, G. R.; Burrows, W. R. The North American Lightning Detection Network (NALDN) - First results: 1998-2000. *Monthly Weather Review*, v. 130, n. 8, p. 2098-2109, Aug. 2002.
- Petersen, Walter A., and Steven A. Rutledge. "Some characteristics of cloud-to-ground lightning in tropical northern Australia." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97.D11 (1992): 11553-11560.
- Pinto, O., et al. "Cloud-to-ground lightning flash characteristics in southeastern Brazil for the 1992–1993 summer season." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101.D23 (1996): 29627-29635.
- Pinto Jr., O; Pinto, I. R. C. A.; Diniz, J. H.; Filho, A. C.; Cherchiglia, L. C. L.; Carvalho, A. M. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 65, n. 6, p. 739-748, Apr. 2003 (b).
- Pinto, O., and I. R. C. A. Pinto. "On the sensitivity of cloud-to-ground lightning activity to surface air temperature changes at different timescales in São Paulo, Brazil." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.D20 (2008).
- Price, Colin. "Global surface temperatures and the atmospheric electrical circuit." *Geophysical Research Letters* 20.13 (1993): 1363-1366.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. *Lightning : Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 850p., 2003.
- Reap, Ronald M. "Analysis and prediction of lightning strike distributions associated with synoptic map types over Florida." *Monthly Weather Review* 122.8 (1994): 1698-1715.
- Reis, R. J. *Mapeando a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais utilizando dados de 1989 a 2002: uma análise exploratória*. 2005. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. (Não publicado).

- Rocha, R. M. L., I. R. C. A. Pinto, and O. Pinto Jr. "Cloud-to Ground Lightning Flash Characteristics in Southeastern Brazil in the Winter Season." 5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 1997.
- Ropelewski, C. H., and S. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115 ,1606-1626.
- Ruellan, F. 1944. A evolução geomorfológica da baía da Guanabara e das regiões vizinhas. *Revista Brasileira de Geografia*, ano VI, n. 4, p. 445-508.
- Saba, M. M. F.; Naccarato, K. P.; Pinto Jr., O; Cabral, G. F. Imaging atmospheric discharges with high-speed cameras. In: *Simpósio Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas*, 7., 2003, Curitiba, Brasil. *Proceedings...* São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia (USP), 2003. p. 14-16.
- Saba, M. M. F.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr., O; Miranda, F. J.; Naccarato, K. P. Simultaneous electric field and high-speed video observations of lightning. In: *International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2004) and International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*, 1., 2004, Belo Horizonte, Brasil. *Proceedings...* Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Proteção Elétrica (SB-RAI), 2004(b). p. 38-42, 2004.
- Schulz, W.; Cummins, K.; Diendorfer, G.; Dorninger, M. Cloud-to-ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. *Journal of Geophysical Research*, v.110, n.D9, 9101, doi:10.1029/2004JD005332, May 2005.
- Silva, Cibelle Celestino; PIMENTEL, Ana Carolina. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 25, n. 1, p. 141-159, set. 2008. ISSN 2175-7941.
- Soriano, L. R.; de Pablo, F.; Diez, E. G. Cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula: 1992-1994. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 106, n.D11, p.11891-11901, June 2001.

- Soriano, Luis Rivas, Fernando De Pablo, and Clemente Tomas. "Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67.16 (2005): 1632-1639.
- Takeuti, T., et al. "The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku coast." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 83.C5 (1978): 2385-2394.
- Uman, Martin A. "The peak temperature of lightning." *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 26.1 (1964): 123-128.
- Watson, Andrew I., Raúl E. López, and Ronald L. Holle. "Diurnal cloud-to-ground lightning patterns in Arizona during the southwest monsoon." *Monthly Weather Review* 122.8 (1994): 1716-1725.
- Williams, E., et al. "Thermodynamic conditions favorable to superlative thunderstorm updraft, mixed phase microphysics and lightning flash rate." *Atmospheric Research* 76.1 (2005): 288-306.