



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS  
COM GRANDE EXTENSÃO ESPACIAL**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Paloma Angelina Simões**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2020**

# **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS COM GRANDE EXTENSÃO ESPACIAL**

---

por

**Paloma Angelina Simões**

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientador: Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos**

**Itajubá, MG, Brasil  
2020**

**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE  
RELÂMPAGOS COM GRANDE EXTENSÃO ESPACIAL**

elaborada por

**Paloma Angelina Simões**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

**Comissão Examinadora:**



---

**Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Rachel Ifanger Albrecht, Dr<sup>a</sup>. (USP)**



---

**Mateus Dias Nunes, MSc. (UNIFEI)**

Itajubá, 16 de novembro de 2020.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a todos os amigos e familiares que me apoiaram nessa etapa da minha vida.

Agradeço a minha mãe, Maria Margarida Guedes Simões por todo o apoio, dedicação e ajuda que foram indispensáveis para que eu conseguisse finalizar essa etapa. A minha irmã, Flávia Aparecida Simões, por todo o companheirismo e amizade nos momentos de desânimo, o que foi essencial para que eu não desanimasse nas horas mais difíceis.

A minha sobrinha Milena Corrêa Simões, a minha avó Alcina Simões e minhas duas gatas, Tardis e Kaira, por toda a leveza, amor e luz que vocês me transmitem na vida.

A todos os meus amigos de graduação e de fora dela, por toda a ajuda e companheirismo. Em especial as minhas colegas de graduação, Larrisa Costa e Paula Sayeko Oda, por todo o apoio e amizade tanto no âmbito da graduação como fora dela.

A todos os professores que passaram pela minha jornada ao longo da graduação, agradeço pelos conhecimentos adquiridos, sejam no âmbito da graduação ou no da vida.

Ao meu orientador e professor Doutor Enrique Vieira Mattos sou grata por toda a dedicação, paciência e conhecimentos adquiridos durante a realização dessa pesquisa e nas aulas ministradas, que além de ser um ótimo professor, claramente demonstra durante suas aulas o amor pela profissão, o que motiva e facilita o aprendizado.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto número 427673/2018-6 o qual este trabalho está inserido.

Dedico essa pesquisa a mim mesma, por ter sido resiliente e forte mesmo nos momentos mais difíceis durante a conclusão dessa jornada.

“A vida é uma tempestade. Um dia você está tomando sol e no dia seguinte o mar te lança contra as rochas. O que faz de você um homem é o que você faz quando a tempestade vem.”

Alexandre Dumas



## RESUMO

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS COM GRANDE EXTENSÃO ESPACIAL**

AUTORA: PALOMA ANGELINA SIMÕES  
ORIENTADOR: Prof. Dr. ENRIQUE VIEIRA MATTOS

O presente estudo teve como objetivo principal analisar as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos com grande extensão espacial (relâmpagos com áreas  $\geq 173,98 \text{ km}^2$ , denominados relâmpagos CGEE). Para alcançar esse objetivo foram utilizados dados da campanha CHUVA-Vale entre novembro de 2011 e março de 2012 na Região Metropolitana de São Paulo. Desta campanha foram empregados dados de medições em três dimensões de relâmpagos da rede São Paulo Lightning Mapper Array (SPLMA), descargas de retorno intra-nuvem (IN) e nuvem-solo (NS) em duas dimensões provenientes da rede BrasilDAT e dados de refletividade provenientes do radar Banda-S de polarização única pertencente a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. A primeira parte do trabalho consistiu em avaliar as propriedades físicas dos relâmpagos CGEE e dos relâmpagos não CGEE (relâmpagos com áreas  $< 173,98$ ), como também avaliar a relação entre as propriedades físicas (área, comprimento e quantidade de fontes) e a área dos CGEE. Na segunda etapa do trabalho foram avaliadas as propriedades elétricas (pico de corrente, polaridade, multiplicidade e intervalo de tempo entre descargas de retorno) dos relâmpagos CGEE. Por último, foi avaliado com maior detalhamento o comportamento dos CGEE que apresentaram a maior área e duração entre os relâmpagos analisados. Foi observado que um aumento na área dos relâmpagos é acompanhado por um aumento no comprimento, duração e quantidade de fontes dos CGEE. Para a segunda parte notou-se que a maioria dos CGEE possuem predominância de descargas de retorno IN, seguidos dos CGEE que possuem NS negativos e positivos. Os CGEE com predominância de descargas de retorno NS apresentam maiores valores de pico de corrente quando comparados aos IN. Além disso os CGEE NS positivos em geral possuem pico de corrente maiores (média de

39,33 kA) em relação aos CGEE NS negativos (média de 24,14 kA, em módulo). Os valores de multiplicidade apresentaram maiores variações nos IN quando comparados aos NS (désvio padrão de 10,41 e 1,43, respectivamente), que apresentaram a maioria dos casos ocorrendo em torno de 1. O presente trabalho encontrou um intervalo de tempo entre os CGEE IN e NS maiores do que o normalmente é encontrado na literatura (média de 87,34 (ms) e 187,6 (ms), respectivamente) , podendo indicar que esses valores são maiores no caso de relâmpagos com maiores dimensões espaciais. Na avaliação dos CGEE extremos (em área e duração), notou-se que a tempestade associada ao relâmpago de maior duração foi mais intensa do que o relâmpago de maior área, apresentando regiões com refletividade > 65 dBZ, indicando a existência de largas partículas de gelo. Os resultados obtidos nesse trabalho trazem informações adicionais sobre os CGEE, podendo ajudar no entendimento desse tipo de relâmpago, podendo servir de subsídio para trabalhos futuros sobre a temática.

**Palavras-chave:** Intra-Nuvem (IN); Nuvem-Solo (NS); Parte; Área.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Região de estudo, localização dos sensores e hipsometria do estado de São Paulo..... 27
- Figura 2:** Exemplo da determinação da área de um relâmpago através do método Convex Hull (casco convexo) que ocorreu no dia 13 de março de 2012 às 20:51 UTC. A área calculada foi de 436,14 km<sup>2</sup> ..... 30
- Figura 3:** Distribuição da frequência absoluta da área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) Relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE ..... 33
- Figura 4:** Distribuição da frequência absoluta do comprimento (km) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) Relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE ..... 35
- Figura 5:** Relação de dispersão entre a área (km<sup>2</sup>) e o comprimento (km) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA ..... 36
- Figura 6:** Distribuição da frequência absoluta da duração (s) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) Relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE ..... 37
- Figura 7:** Relação de dispersão entre a duração (s) e a área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA ..... 38
- Figura 8:** Distribuição da frequência absoluta do número de fontes de VHF por relâmpago para os relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) Relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE ..... 39
- Figura 9:** Relação de dispersão entre o número de fontes de VHF e a área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA ..... 40

- Figura 10:** Distribuição de ocorrência de todas as descargas de retorno intra-nuvem e nuvem-solo positivo e negativo dos relâmpagos provenientes da rede BrasilDAT ..... 41
- Figura 11:** Idem a Figura 10 para a primeira descarga de retorno dos relâmpagos..... 41
- Figura 12:** Distribuição da frequência absoluta do pico de corrente (kA) dos CGEE intra-nuvem (a) positivos e (b) negativos..... 42
- Figura 13:** Distribuição da frequência absoluta do pico de corrente (kA) dos CGEE nuvem-solo (a) positivos e (b) negativos. .... 43
- Figura 14:** Distribuição da frequência absoluta da multiplicidade (número de descarga de retorno por relâmpago) dos CGEE: (a) intra-nuvem e (b) nuvem-solo..... 44
- Figura 15:** Distribuição da frequência absoluta do intervalo de tempo entre descargas de retorno (ms) dos CGEE para os relâmpagos: (a) intra- nuvem e (b) nuvem-solo ..... 45
- Figura 16:** Distribuição espacial e temporal das fontes de VHF do CGEE que possui a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os painéis representam: (a) altitude versus tempo-as cores representam o tempo das fontes dentro do ciclo de vida do relâmpago, (b) altitude versus longitude, (c) histograma de altitude das fontes de VHF, (d) latitude versus longitude e (e) latitude versus altitude. Na legenda são mostrados os valores das propriedades físicas e elétricas estimadas através das informações das redes SPLMA e BrasilDAT..... 47
- Figura 17:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de

retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os cortes verticais foram realizados centrados no local do relâmpago NS registrado pela BrasilDAT (círculo preenchido cinza) ..... 49

**Figura 18:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os cortes verticais foram realizados centrados no local mais intenso da tempestade (refletividade maiores que 35 dBZ) ..... 51

**Figura 19:** Distribuição espacial e temporal das fontes de VHF do CGEE que possui a maior duração (2,44 s). Os painéis representam: (a) altitude versus tempo- as cores representam o tempo das fontes dentro do ciclo de vida do relâmpago, (b) altitude versus longitude, (c) histograma de altitude das fontes de VHF, (d) latitude versus longitude e (e) latitude versus altitude. Na legenda são mostrados os valores das propriedades físicas e elétricas estimadas através das informações das redes SPLMA e BrasilDAT ..... 53

**Figura 20:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior duração (2,44 s). Os cortes verticais foram realizados centrados no local mais intenso da tempestade (refletividade maiores que 65 dBZ)..... 54

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BrasilDAT	-	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
Cfa	-	Clima Subtropical Úmido
CGEE		Com Grande Extensão Espacial
Cwa	-	Clima Subtropical
Cwb	-	Clima Temperado Marítimo Úmido
ELAT	-	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EM	-	Entre-Nuvens
EUA	-	Estados Unidos da América
GEC	-	Circuito Elétrico Global
GOES	-	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GLM	-	<i>Geostationary Lightning Mapper</i>
IN	-	Intra-Nuvem
KHz	-	Quilohertz
Km	-	Quilômetro
LF	-	Low Frequency
LIS	-	Lightning Imaging Sensor
LMA	-	Lightning Mapping Array
LINET	-	Lightning Detection Network
MHz	-	Megahertz
Nox	-	Óxido de Nitrogênio
NS	-	Nuvem-Solo
OMM	-	Organização Mundial Meteorológica
PIB	-	Produto Interno Bruto
RINDAT	-	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RMSP	-	Região Metropolitana de São Paulo
TRMM	-	Tropical Rainfall Measuring Mission
S	-	Segundo
SCM	-	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SPLMA	-	São Paulo Lightning Mapping Array
VHF	-	Very Higher Frequency
ZCAS	-	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	-	Zona de Convergência Intertropical



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. OBJETIVOS.....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1. Tipos de nuvens e estrutura de cargas elétricas.....	20
2.2. Tipos de Relâmpagos e Redes de Relâmpagos.....	22
2.3. Estudos recentes.....	24
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
4.1 Dados .....	26
4.1.1. Descrição da área de estudo.....	26
4.1.2. Dados SPLMA .....	28
4.1.3. Dados BrasilDAT .....	28
4.1.4 Dados radar da FCTH.....	28
4.2. Metodologia .....	29
4.2.1 Cálculo das propriedades físicas dos relâmpagos.....	29
4.2.2 Análise das propriedades elétricas dos relâmpagos.....	31
4.2.3 Análise de estudo de caso de dois relâmpagos.....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
4.1. Propriedades físicas dos relâmpagos CGEE .....	31
4.1.1. Análise das propriedades físicas entre relâmpagos não CGEE e relâmpagos CGEE.....	32
5.2 Propriedades elétricas dos CGEE .....	40
5.3 Estudos de casos.....	45
5.3.1 CGEE com a maior área (2606,47 km <sup>2</sup> ).....	45
5.3.2 CGEE com a maior duração (2,44 s).....	51
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>55</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Os relâmpagos são fenômenos que possuem um impacto importante nas condições do tempo e clima. Em termos de tempo podem provocar mortes e diversos prejuízos aos setores de energia e telecomunicações. Em contrapartida, em termos de clima, os relâmpagos são uma importante fonte de suprimento para o Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG) (WILLIAMS, 2001), conduzindo a uma série de conexões elétricas no sistema terra-atmosfera (PETERSON, 2019) e na produção de Óxido de Nitrogênio (NOx) (DECARIA et al., 2005).

A grande extensão territorial e a proximidade com o equador geográfico contribuem para que o Brasil seja caracterizado como o país com a maior incidência de relâmpagos do planeta (PINTO JR. e PINTO, 2008; AZAMBUJA, 2017). Estima-se que aproximadamente 60-75 milhões de relâmpagos ocorram anualmente no Brasil e aproximadamente 130 pessoas morram anualmente em consequência dos relâmpagos (CARDOSO, et al., 2014). Em termos de prejuízos materiais, estimam-se prejuízos anuais no Brasil de aproximadamente R\$ 1 bilhão relacionados a ocorrência de relâmpagos (INPE.ELAT, 2015; MAGINA, 2016).

Os relâmpagos são descargas elétricas atmosféricas formadas devido ao acúmulo de cargas no interior de nuvens. Essas cargas podem ser formadas no interior das nuvens provenientes de colisões entre cristais de gelo e *graupel* num ambiente com água líquida super-resfriada em regiões de fortes correntes ascendentes (REYNOLDS ET AL., 1957). O acúmulo em excesso dessas cargas elétricas pode produzir um intenso campo elétrico capaz de romper a rigidez dielétrica do ar (RAKOV & UMAN, 2003), possibilitando assim a propagação dos relâmpagos. O grande avanço na comunidade científica e tecnológica tem contribuído para um melhor entendimento do comportamento dos relâmpagos, como o surgimento dos satélites, radares e redes de sensores de relâmpagos em solo.

Dentre as redes de detecção de relâmpagos em superfície encontram-se as redes de mapeamento tridimensional de relâmpagos, conhecidas como

*Lightning Mapping Array* (LMA). As redes LMA possibilitam o mapeamento dos relâmpagos em três dimensões através da detecção de fontes em *Very High Frequency* (VHF) (30-300 MHz), permitindo inferir a estrutura de cargas elétricas e também as regiões onde as descargas elétricas são formadas no interior das tempestades (WIENS et al., 2005; BRUNING et al., 2007; LANG; RUTLEDGE, 2008, LUND et al., 2009), assim contribuindo para uma melhor compreensão do relâmpago desde o início de sua formação até a sua dissipação. A utilização combinada entre redes LMA e redes que capturam energia eletromagnética na frequência entre 1 Hz e 12 MHz possibilitam mapear as características físicas (área, comprimento e duração) e elétricas (polaridade, pico de corrente, multiplicidade, intervalo de tempo entre descargas de retorno) dos relâmpagos.

Já os satélites são importantes ferramentas para estudos em áreas de difícil acesso, como florestas densas e regiões oceânicas. Porém tipicamente podem apresentar uma eficiência de detecção de relâmpagos menor em relação as obtidas por redes de sensores em superfície, além de não serem sensíveis na discriminação entre relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo.

A utilização de tecnologias capazes de mapear em detalhes a propagação dos relâmpagos torna-se de grande importância. Na literatura são escassos estudos sobre os CGEE utilizando a combinação de redes de detecção de relâmpagos em duas e três dimensões para entender suas propriedades físicas e elétricas. Importante ressaltar, que no presente estudo é considerado um CGEE aquele relâmpago que o valor da área está acima do percentil de 90 % da distribuição da área; o que pode diferir em termos de tamanho dos estudos que registraram *MegaFlashes*, utilizando geralmente sensores orbitais e que serão discutidos posteriormente. Embora existam essas diferenças em termos espaciais, conseguimos ainda avaliar as propriedades dos maiores relâmpagos em relação ao total de relâmpagos para uma determinada região e período de estudo. Portanto, a comparação entre as propriedades de CGEE obtidas por diferentes estudos precisa ser realizada com cautela.

Recentemente dentre os relâmpagos amplamente estudados, aqueles que possuem uma extensa dimensão (valores de comprimento > 100 km), conhecidos como *Megaflashes* tem recebido uma maior atenção pela comunidade científica (Lyons et al., 2020). Por exemplo, Lyons et al. (2020) avaliaram um evento que ocorreu em Oklahoma utilizando redes de sensores em solo e dados provenientes de satélite, registrando um *MegaFlash* que ilumi-

nou uma área de 67,845 km<sup>2</sup> e apresentando aproximadamente 500 km de comprimento. Os autores mencionam que esse *MegaFlash* excedeu o relâmpago com o maior comprimento oficial registrado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Esse estudo mostra que conforme as tecnologias para registros de relâmpagos evoluírem, os recordes das propriedades como área, comprimento, duração podem ser superados. De fato, no mesmo ano, Peterson et al. (2020) registraram o relâmpago com a distância horizontal (709 km, Brasil) e duração (16,7 segundos, Argentina) já documentados na literatura.

O entendimento das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos CGEE torna-se importante como um subsídio para o desenvolvimento de equipamentos de proteção como para-raios mais eficientes. Além disso, estudos neste âmbito são importantes como auxílio para futuras melhorias nos modelos de previsão de curtíssimo prazo de tempo; sendo que suas previsões poderiam ajudar na minimização dos efeitos prejudiciais causados pela intensa atividade elétrica.

### **1.1. OBJETIVOS**

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos que possuem grande dimensão espacial (definidos como CGEE). Como objetivos específicos tem-se:

- 1) Caracterizar as propriedades físicas dos relâmpagos CGEE como a área, comprimento, duração e número de fontes de VHF;
- 2) Caracterizar as propriedades elétricas dos relâmpagos CGEE como a polaridade, pico de corrente, multiplicidade e intervalo de tempo entre descargas de retorno.
- 3) Avaliar as relações entre as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos e as assinaturas de radar meteorológico.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Diversos estudos demonstram que a origem da vida ocorreu devido a interação entre os compostos químicos presentes na atmosfera primitiva por meio de reações entre a radiação solar e os relâmpagos (MILLER, 1953; OPARIN et al., 1957). Porém as condições na atmosfera primitiva eram totalmente distintas comparadas com as de hoje em dia, além disso o homem constantemente tem promovido a modificação do meio em que vive.

Algumas pesquisas indicam que ações antropogênicas podem agravar os prejuízos relacionados com a atividade elétrica de tempestades. Por exemplo, os estudos do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) sugerem um aumento significativo na incidência de relâmpagos em grande parte do território brasileiro durante as próximas décadas, esse aumento pode estar associado ao aumento da urbanização, desmatamento, maior inserção de gases do efeito estufa na atmosfera e conseqüentemente agravamento do aquecimento global, promovendo um importante alerta para a sociedade (PINTO JR., 2015). Portanto, torna-se importante a obtenção de um entendimento físico sobre os relâmpagos. Diversos estudos têm sido realizados para compreender melhor a formação e ocorrência dos relâmpagos, formando a base teórica do ramo da Eletricidade Atmosférica. Nesse contexto, a seguir será realizada uma revisão sobre os principais conceitos envolvendo nuvens, eletrificação e estudos recentes sobre a temática.

### **2.1. Tipos de nuvens e estrutura de cargas elétricas**

Os relâmpagos são formados no interior das nuvens de tempestades. Em termos gerais, nuvens são conjuntos visíveis de partículas minúsculas de água líquida ou gelo, ou de ambos em suspensão na atmosfera (AVILA, 2006). A formação de nuvens depende principalmente de três fatores: i) disponibilidade de umidade próximo a superfície, ii) atmosfera instável (está relacionado com a presença de gradiente vertical de temperatura entre o ambiente e a parcela de ar) e iii) mecanismos de levantamento do ar (frentes, montanhas e etc). Os principais mecanismos de levantamento de ar são: os processos de convecção, convergência, orografia e frentes (AHRENS; SAMSON, 2010). De forma geral uma nuvem se forma quando uma parcela de ar contendo umidade ascende para níveis mais altos da atmosfera, expandindo-se e resfriando-se levando ao

processo de condensação de água (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Os denominados núcleos de condensação, como por exemplo, sal marinho e grãos de areia, são partículas que possuem afinidade pela água e geralmente contribuem para o processo de formação de nuvens.

As nuvens podem ser classificadas em função de dois critérios: i) aparência e ii) altura na qual sua base se encontra na atmosfera. No segundo critério as nuvens são subdivididas em: i) baixas (<2 km), ii) médias (2-6 km), iii) altas (> 6 km) e iv) com desenvolvimento vertical (VAREJÃO-SILVA, 2006). Em relação ao aspecto da nuvem, as mesmas, são divididas em três grupos: i) cumuliforme, ii) estratiforme e iii) cirriforme. As nuvens cumuliformes formam-se em uma atmosfera instável, apresentando ascendência e descendência das correntes de ar, podendo indicar tempo bom quando são formadas nuvens do tipo cumulus, ou tempo ruim quando as nuvens apresentam alto desenvolvimento vertical. As nuvens do tipo estratiformes se formam comumente em uma atmosfera estável e apresentam maior desenvolvimento horizontal, podendo cobrir o céu todo. Em contrapartida, as nuvens do tipo cirriforme se formam em altitudes mais altas, sendo denominadas nuvens altas, nas quais as temperaturas são muito frias. Essas nuvens são constituídas de cristais de gelo, possuem um aspecto fibroso e podem se formar devido a presença de bigornas em nuvens do tipo Cumulonimbus (VAREJÃO-SILVA, 2006). As nuvens do tipo Cumulonimbus são caracterizadas por fortes correntes ascendentes e descendentes de ar, turbulência, podendo apresentar intensas rajadas de vento e precipitação, além da ocorrência de granizo em alguns casos (LUDLAM, 1966). Essas nuvens são capazes de produzir uma expressiva atividade elétrica e comumente são definidas como nuvens de tempestade.

Na literatura são abordadas três principais teorias que buscam explicar como a eletrificação ocorre no interior das nuvens, sendo elas: i) carregamento convectivo (GRENET, 1947; VONNEGUT, 1953, 1955), ii) carregamento de precipitação indutivo (ELSTER; GEITEL, 1885) e iii) carregamento de precipitação não indutivo (MACGORMAN; RUST, 1998). O terceiro mecanismo tem sido o mais aceito, sendo conhecido também como carregamento por colisão cristal-*graupel*. Nesse tipo de carregamento as cargas elétricas ou já estão disponíveis ou são geradas durante a colisão de um *graupel* com um cristal de gelo, evidenciando que a eletrificação nas tempestades é relacionada a

presença de distintos hidrometeoros no interior das nuvens. Esse tipo de carregamento não necessita da existência de um campo elétrico externo, como no carregamento de precipitação indutivo e tem explicado a estrutura tripolar observada em várias tempestades (REYNOLDS et al., 1957).

Ao longo das últimas décadas houve uma evolução no entendimento sobre a estrutura espacial de disposição das cargas no interior das nuvens. Na literatura são postuladas a existência de três estruturas de cargas elétricas, que são: dipolar, tripolar e multipolar. A estrutura dipolar é a mais simples entre as supracitadas, e é representada por dois principais centros de cargas, um positivo e outro negativo (GIN, 1996). Nesta configuração de cargas pode haver dois pequenos centros (denominada camada de blindagem): um positivo na base da nuvem e um negativo próximo ao topo, que podem ocorrer devido a interação de íons presentes na atmosfera e superfície (PINTO JR. e PINTO, 1996). Em contrapartida, a estrutura tripolar é baseada na existência de três centros de cargas no interior da nuvem: sendo dois centros com cargas positivas situados na base e topo da nuvem, possuindo a mesma magnitude, e um apresentando carga negativa localizado mais ao centro, entre as isotermas de  $-10^{\circ}$  à  $-15^{\circ}$ , entre os centros de carga positivos (WILLIAMS, 1989). As estruturas multipolares são mais complexas, quando comparadas com as duas anteriores. Essa estrutura tipicamente ocorre em Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e com Supercélulas. Este modelo apresenta quatro regiões de carga localizadas próximas as correntes ascendentes e seis regiões de cargas fora das correntes ascendentes, localizadas dentro das regiões ocorrendo precipitação convectiva (STOLZENBURG, 1998).

## **2.2. Tipos de Relâmpagos e Redes de Relâmpagos**

Diversas terminologias são utilizadas para se referir aos relâmpagos. Assim, torna-se importante uma explicação detalhada nesta etapa do trabalho sobre as principais nomenclaturas associadas a relâmpago. Uma descarga elétrica refere-se a uma fonte individual de radiação emitida na frequência *Very High Frequency* (VHF) por um relâmpago quando ele propaga na atmosfera, a composição de várias descargas elétricas forma uma descarga de retorno e a composição de várias descargas de retorno é denominada relâmpago (*flash*, do inglês). A quantificação do número de descargas de retorno por relâmpago

define a multiplicidade de um relâmpago. Por fim, a polaridade de uma descarga de retorno está associada ao tipo de carga elétrica transportada em uma determinada direção. Por exemplo relâmpagos nuvem-solo positivos (negativos) possuem transporte de prótons (elétrons) do interior da nuvem em direção ao solo (BALLAROTTI, 2015).

Na literatura os relâmpagos são definidos como uma momentânea descarga elétrica de alta corrente elétrica e com o seu percurso medindo dezenas de quilômetros (AMS, 2015). Os tipos de relâmpagos são comumente classificados em função do local onde se originam e se dissipam em: i) relâmpagos no céu e ii) relâmpagos no solo. No que diz respeito aos relâmpagos no céu, existem três tipos: intra-nuvem (IN) (ocorrem no interior de uma mesma nuvem), entrenuvem (EN) (ocorrem entre nuvens diferentes) e nuvem-ar (começam em uma nuvem e se dissipam no ar). Em contrapartida, os relâmpagos no solo são divididos em dois tipos: nuvem-solo (NS) (começam na nuvem e se dissipam no solo) e solo-nuvem (se originam no solo e terminam na nuvem) (SILVA, 2009).

Os relâmpagos IN são os mais recorrentes (representam aproximadamente 80% do número total global de relâmpagos), entretanto são menos estudados devido à complexidade associada à opacidade da nuvem (PINTO JR.; PINTO, 2000). Em contrapartida, os relâmpagos que envolvem o solo, embora menos frequentes, são mais estudados, pela facilidade de serem identificados por instrumentos de medição e por apresentarem alta capacidade destrutiva em superfície. Dentre os relâmpagos que ocorrem no solo, predominam os NS negativos, representando em média 90% do total (UMAN, 1987), esse tipo de relâmpago é denominado raio e pode ter dois tipos de classificação considerando a sua polaridade (como explicitado no início desse tópico).

A principal fonte de dados sobre relâmpagos é proveniente de redes de monitoramento de relâmpagos, contribuindo para a compreensão das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos. Essas redes são capazes de capturar a radiação emitida pelos relâmpagos ao se propagar em direção ao solo e algumas, também conseguem capturar a energia emitida por relâmpagos IN. No Brasil a rede em superfície mais moderna capaz de detectar relâmpagos IN e NS é denominada Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas

(BrasilDAT). A BrasilDAT foi criada em 2011 e possui sensores instalados nas regiões sudeste, sul, centro-oeste e parte da região nordeste do Brasil. A BrasilDAT é uma rede capaz de identificar tanto os relâmpagos NS, como os IN. A rede opera na faixa de frequência entre 1 Hz e 12 MHz e as principais informações fornecidas são: data, localização e pico de corrente (NACCARATO et al., 2011). Em contrapartida, redes de relâmpagos que capturam energia eletromagnética entre 30 a 300 MHz, são conhecidas como *Lightning Mapping Array* (LMA) (CUMMINS; MURPHY, 2009). Diferentemente da BrasilDAT, essa rede não consegue diferenciar descargas IN de NS, em contrapartida essas redes são capazes de mapear tridimensionalmente o canal dos relâmpagos desde sua formação até o momento da sua dissipação. Informações como duração, comprimento e área entre outras podem ser estimadas a partir de redes LMAs. Os dados da rede, combinados com outras ferramentas, como por exemplo dados provenientes de radares meteorológicos, vem contribuindo para o entendimento sobre a microfísica das tempestades. (BRUNING et al., 2007; LUND et al., 2009, MATTOS, 2016).

### **2.3 Estudos Recentes**

Diversos trabalhos na literatura já utilizaram dados de redes LMAs. Porém estudos sobre relâmpagos CGEE são escassos e crescem à medida que os satélites e outras ferramentas de detecção de relâmpagos surgem e são aprimoradas. Por exemplo, López (2017) utilizando dados de LMA caracterizou as dimensões espaço-temporais (comprimento e duração) de uma ampla gama de relâmpagos, incluindo aqueles ocorridos no verão e inverno. Em contrapartida, Schultz et al. (2018) avaliaram o comportamento de 34 relâmpagos que ocorreram durante épocas com queda de neve, caracterizando a polaridade predominante nesses eventos como: pico de corrente, área, comprimento, duração entre outras características. O estudo de Bruning e Macgorman (2013) demonstrou a existência de uma relação entre as dimensões dos relâmpagos e a intensidade da tempestade, indicando que quando os relâmpagos estavam localizados próximos (distantes) de intensas correntes verticais, a tendência era uma maior (menor) frequência e menor (maior) tamanho do fenômeno (MONTAYA, 2014).

Silva (2018) empregou redes de sensores de relâmpagos em solo para aprofundar o conhecimento sobre como as propriedades físicas dos relâmpagos (área, comprimento, duração) podem estar associadas aos demais parâmetros

elétricos (polaridade, multiplicidade e pico de corrente). Com relação aos valores extremos, utilizando dados provenientes da rede SPLMA, o autor encontrou valores de aproximadamente 4.861,04 km<sup>2</sup> (para a área) dentre uma amostra de 91732 casos de relâmpagos que ocorreram no estado de São Paulo durante o mês de janeiro de 2012.

Alguns estudos na literatura documentaram os relâmpagos *Megaflashes* (Lang et al., 2016; Peterson et al., 2017; Peterson, 2019; Lyons et al., 2020; Peterson et al., 2020). Por exemplo, Lang et al. (2016), utilizando dados de redes LMA documentaram as características de um *MegaFlash* que ocorreu sobre Oklahoma em 2007. Esse relâmpago foi registrado pela OMM como o relâmpago possuindo na época o maior comprimento já documentado (321 km). Utilizando dados do sensor *Lightning Imaging Sensor* (LIS) a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), Peterson et al. (2017) investigaram se os dados seriam capazes de fornecer estimativas úteis sobre a evolução dos relâmpagos. Os resultados se mostraram satisfatórios e os autores caracterizaram eventos extremos de relâmpagos, avaliando características sobre a estrutura, energia e evolução dos eventos. Com relação ao tamanho, os autores relatam que o maior relâmpago iluminou uma área de aproximadamente 10,604 km<sup>2</sup>.

Peterson (2019) relatou que em 2018 o sensor GLM registrou o relâmpago mais longo já registrado, percorrendo aproximadamente 673 km no Rio Grande do Sul (Brasil) e o maior relâmpago iluminando uma área de 114, 997 km<sup>2</sup> na região central dos Estados Unidos. O autor discutiu que esses dois *MegaFlashes* ocorreram nas regiões estratiformes dos sistemas convectivos de mesoescala. Em consistência, Montayá (2014) utilizando dados de sensores LMA em fenômenos que ocorreram na Europa identificou diferentes eventos de trovoadas e no conjunto que abrangia sistemas convectivos de mesoescala encontrou os maiores e mais duradouros relâmpagos, com eventos acima de 120 km.

Lyons et al. (2020) identificaram um relâmpago sobre os Estados Unidos da América (EUA) medindo cerca de 67,845 km<sup>2</sup> e 500 km de comprimento, excedendo muito o atual recorde de comprimento indicado pela OMM. Os autores apontam que essas novas ferramentas a bordo de satélites podem vir a indicar que relâmpagos com grande extensão, conhecidos com *MegaFlashes* podem não ser tão incomuns. Em adição, em 2020 a OMM registrou um novo

recorde de tamanho e duração de relâmpagos, relatado pelo trabalho de Peterson et al. (2020). O novo recorde de comprimento foi de 709 km e ocorreu em partes da região sul do Brasil no dia 31 de outubro de 2018. Em contrapartida, o relâmpago mais longo durou 16,73 s e foi detectado no norte da Argentina no dia 4 de março de 2019, os dados desses registros foram obtidos do sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite – 16* (GOES-16).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Dados**

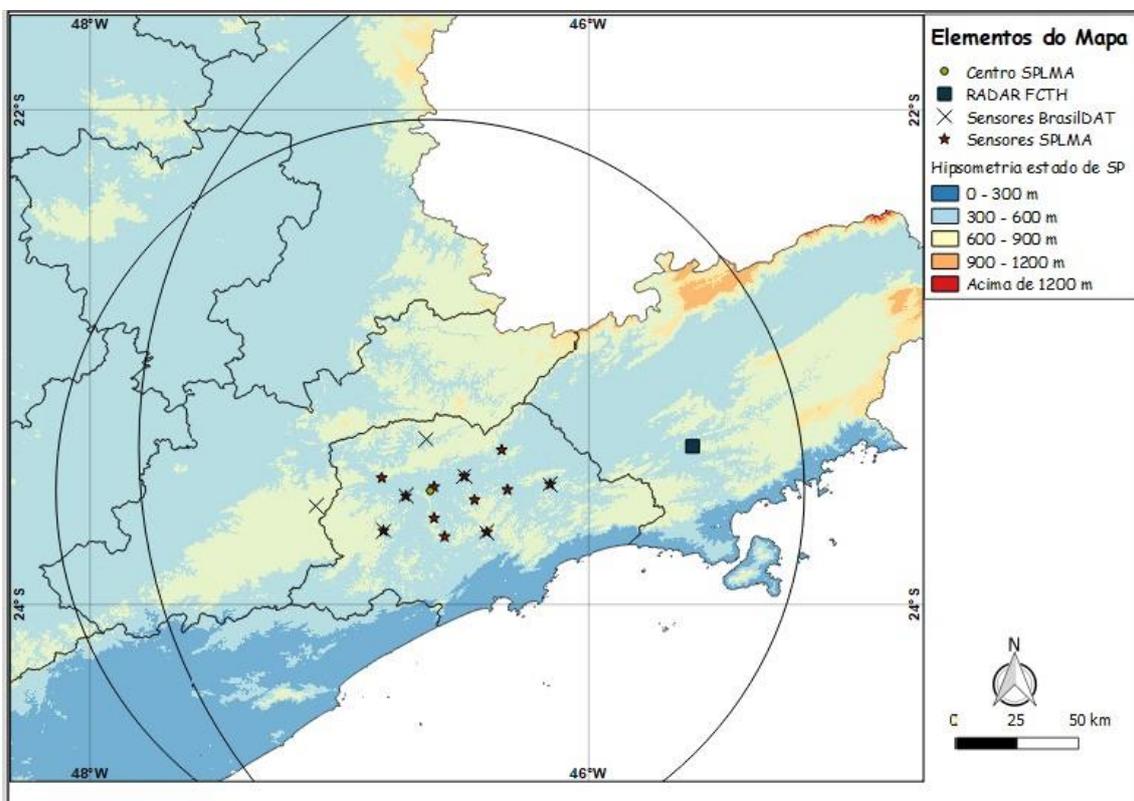
##### **3.1.1 Descrição da área de estudo**

A área de análise do presente estudo compreende a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A região possui uma área total de 7.946,96 Km<sup>2</sup>. A RMSP está inserida no setor leste do estado de São Paulo e compreende um total de 39 municípios (EMPLASA, 2019), sendo eles: Arujá, Barueri, Biritiba Mirim, Caieiras, Cajamar, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guararema, Guarulhos, Itapeverica da Serra, Itapevi, Itaquaquetuba, Jandira, Juquitiba, Mairiporã, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Poá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Salesópolis, Santa Isabel, Santana de Parnaíba, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, São Lourenço da Serra, São Paulo, Suzano, Taboão da Serra e Vargem Grande Paulista (EMPLASA, 2019).

O Estado de São Paulo apresenta seis tipos distintos de clima segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, fator que influencia na alta variabilidade da precipitação anual, variando entre 1.000 e 4.500 mm. A RMSP apresenta predominância de três tipos de clima, sendo eles: Clima Subtropical (Cwa), Clima Subtropical Úmido (Cfa), e Clima Temperado Marítimo Úmido (Cwb) (GIMENEZ, 2017). Essa região possui normalmente altos acumulados de chuva ao longo dos meses de verão contrastando com baixos nos meses de inverno (BIER, 2017).

Os dados utilizados nesse estudo compreendem os meses de novembro de 2011 a março de 2012, contabilizando todo o período da campanha CHUVA-Vale (maiores detalhes podem ser encontrados em Machado et al., 2014). A

campanha ocorreu nas redondezas do Vale do Paraíba e RMSP visando caracterizar sistemas de precipitação e a ocorrência de relâmpagos nos mesmos (ALBRECHT et al., 2014). Os dados da campanha utilizados no presente estudo foram: i) relâmpagos da rede São Paulo *Lightning Mapper Array* (SPLMA), ii) relâmpagos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) e iii) refletividade proveniente do Radar da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). A área de estudo assim como a localização dos sensores da SPLMA e BrasilDAT são mostrados na figura abaixo.



**Figura 1:** Região de estudo, localização dos sensores e hipsometria do estado de São Paulo. A localização dos sensores SPLMA está indicada pelos marcadores em formato de estrela (em vermelho), já os marcadores em formato de cruz representam os sensores da BrasilDAT. A localização do radar está indicada pelo quadrado (em azul), o círculo de maior tamanho indica o raio de abrangência do radar (190 km). O marcador circular (em amarelo) indica o centro dos sensores da rede SPLMA, ao longo do qual foi desenhado um círculo (de menor tamanho) que representa a área de melhor eficiência de detecção da rede SPLMA (< 150 km de distância ao centro da rede SPLMA).

### 3.1.2 Dados SPLMA

Durante a campanha CHUVA-Vale foram instalados 12 sensores que compuseram a rede LMA na RMSF, formando assim a rede São Paulo *Lightning Mapper Array* (SPLMA). A SPLMA esteve em operação entre o período de novembro de 2011 e março de 2012. A rede detectava as fontes de radiação eletromagnética emitidas pelos relâmpagos emitidas nas frequências de 180-186 MHz e 192-198 MHz (correspondentes aos antigos canais 8 e 10 de TV VHF), com tempo de amostragem de 80 ms (ALBRECHT et al., 2014; BAILEY et al., 2014). O dado utilizado é pertencente ao *Level 2*, sendo composto das fontes de VHF agrupadas em relâmpagos (*flashes*, do inglês). Comumente, essas redes tem uma eficiência de detecção de até 150 km de distância (RISON ET AL., 1999). Os dados sobre relâmpagos provenientes dessa rede contêm as seguintes informações: data, horário, latitude, longitude e altitude das fontes de VHF dos relâmpagos.

### 3.1.3 Dados BrasilDAT

A BrasilDAT diferentemente das redes LMA detecta relâmpagos apenas em duas dimensões. A BrasilDAT possui 58 sensores espalhados pelo Brasil, abrangendo as regiões, Sul, Sudeste, Nordeste e parte da região Centro-Oeste. A rede é capaz de detectar descargas de retorno IN e NS, além disso, ela é capaz de registrar características físicas importantes a respeito dos relâmpagos, tal como polaridade e pico de corrente. É uma rede que atua na faixa de frequência entre 1 Hz e 12 MHz e emprega a tecnologia TOA para detecção de raios NS (NACCARATO et al., 2011). Foram instalados durante o período da campanha CHUVA-Vale sensores adicionais próximos a cidade de São Paulo, com o objetivo de aumentar a eficiência da detecção da rede nas localidades nas quais a campanha ocorreu (MATTOS, 2015). Os dados provenientes dessa rede utilizados no presente estudo são: data, horário, polaridade e pico de corrente.

### 3.1.4 Dados radar da FCTH

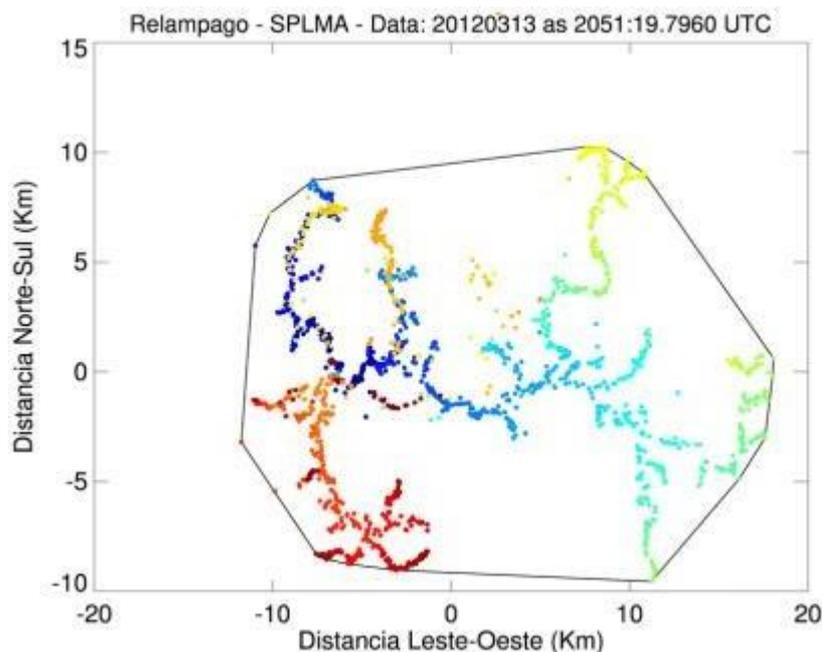
O radar utilizado no presente estudo é o radar operado pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e se localiza no município de Salesópolis, estado de São Paulo. Esse radar opera em banda S (comprimento de onda de 10 cm). Os dados de refletividade do radar durante a campanha,

tiveram uma resolução espacial de 5 minutos e alcance de 190 km. A varredura volumétrica do radar forneceu informações em 20 ângulos de elevação (denominados *Plan Position Indication*-PPI) variando de 1° a 30,8°. A resolução radial foi dependente da distância ao radar sendo de: 0,5 km (< 60 km), 1,0 km (60-120 km) e 2,0 km (> 120 km) (AMORIM et al., 1999). Foram produzidos *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) com resolução espacial horizontal e vertical de 1 km entre 3 e 15 km de altura da variável refletividade. Embora não tenham sido realizadas correções nos dados, Morales, Albrecht e Biscaro (2013) estimaram a existência de uma superestimativa entre 2 e 4 dBZ (BELTRAN, 2017) referentes aos dados volumétricos e nos dados de CAPPI, que foram processados durante a realização do projeto CHUVA, informações adicionais sobre esse projeto podem ser verificados em Machado et al. (2014).

## **3.2 Metodologia**

### **3.2.1 Cálculo das propriedades físicas dos relâmpagos**

A primeira etapa do presente trabalho será focada em analisar as propriedades físicas dos relâmpagos, como: área, comprimento, duração e número de fontes de VHF. Neste contexto, visa-se compreender e mapear em detalhes as características dos relâmpagos CGEE. Para tanto, será empregado os dados da rede SPLMA. Nesta etapa foram selecionados apenas os relâmpagos da rede SPLMA com mais de 10 fontes de VHF. Essa metodologia é semelhante a aplicada por Lund et al. (2009) e Bailey et al. (2014) e visa eliminar relâmpagos que eventualmente podem conter ruídos. Para o cálculo da área dos relâmpagos (em km<sup>2</sup>) considerou a metodologia empregada por Bruning e Macgorman (2013), no qual a área é calculada empregando-se o método do *Convex Hull* (casco convexo). Nesse método a área é calculada considerando a área de um polígono formada pela conexão entre as fontes de VHF mais externas de um relâmpago. A Figura 4.2 mostra um exemplo desse método para um relâmpago que possui uma área de aproximadamente 436,14 km<sup>2</sup>.



**Figura 2:** Exemplo da determinação da área de um relâmpago através do método Convex Hull (casco convexo) que ocorreu no dia 13 de março de 2012 às 20:51 UTC. A área calculada foi de 436,14 km<sup>2</sup>.

Em contrapartida, o comprimento foi extraído através do cálculo da raiz quadrada da área dividida por  $\pi$  (idem ao trabalho de MECIKALSKI et al. (2015)). O cálculo da duração (em s) constitui-se no computo da diferença entre o tempo da última fonte de VHF registrada e o instante da fonte inicial pertencente a um mesmo relâmpago. Além disso, esse banco de dados foi formado pela quantidade de fontes de VHF de cada relâmpago.

A partir dessa base de dados foram selecionados os relâmpagos CGEE. Para isto foi utilizado como referência a área de todos os relâmpagos do período de estudo, e foi determinado o percentil de 90 % em relação a área. Assim, os relâmpagos CGEE foram definidos no presente trabalho, como sendo aqueles que possuem área acima do percentil de 90 % ( $> 173,98 \text{ km}^2$ ). Ao todo este estudo analisou 616.596 relâmpagos, sendo que apenas 61.657 (ou seja, representando aproximadamente 10 % do total de relâmpagos) foram classificados como CGEE. A partir dessa base de dados os relâmpagos foram separados em dois grupos: i) CGEE (sendo aqueles que possuem área  $\geq 173,98 \text{ km}^2$ ) e ii) relâmpagos não CGEE (sendo aqueles que possuem área  $< 173,98 \text{ km}^2$ ). Foi avaliado as diferenças nas propriedades físicas (comprimento, duração e número de fontes) entre os dois grupos de relâmpagos definidos acima.

### **3.2.2 Análise das propriedades elétricas dos relâmpagos**

Na segunda etapa do trabalho serão avaliadas as propriedades elétricas dos relâmpagos CGEE estimadas pela rede BrasilDAT. Estas propriedades serão: i) polaridade, ii) pico de corrente, iii) multiplicidade e iv) intervalo de tempo entre descargas de retorno. Para isto os relâmpagos detectados pela rede SPLMA foram combinados com os relâmpagos da BrasilDAT. Os dados da BrasilDAT estão no formato de descargas de retorno (strokes, do inglês). Foi empregado um critério temporal e espacial de 500 ms e 20 km, respectivamente. Assim, o banco formado contém as informações de duração, comprimento, área, número de fontes, pico de corrente (da primeira descarga de retorno), multiplicidade e intervalo de tempo entre descargas de retorno. As distribuições das propriedades serão avaliadas através de histogramas de distribuição dos seus valores. Será avaliado também como cada uma dessas propriedades elétricas estão relacionadas com a área dos relâmpagos estimados através da rede SPLMA.

### **3.2.3 Análise de estudo de caso de dois relâmpagos**

Foram avaliados em detalhes as características elétricas, físicas e de radar para o relâmpago que apresentou a maior extensão e maior duração dentre os CGEE. Para isto foram utilizadas as propriedades elétricas (proveniente da rede BrasilDAT) e físicas (proveniente da rede SPLMA) dos relâmpagos. Em termos de radar foi analisado a estrutura vertical do sistema precipitante que produziu cada um dos relâmpagos supracitados.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Propriedades físicas dos relâmpagos com grande extensão espacial**

Nesse tópico serão discutidas as propriedades físicas dos relâmpagos CGEE utilizando os dados da rede SPLMA. Também serão avaliadas as relações de dispersão entre a área e as demais propriedades (comprimento, duração e número de fontes) dos relâmpagos.

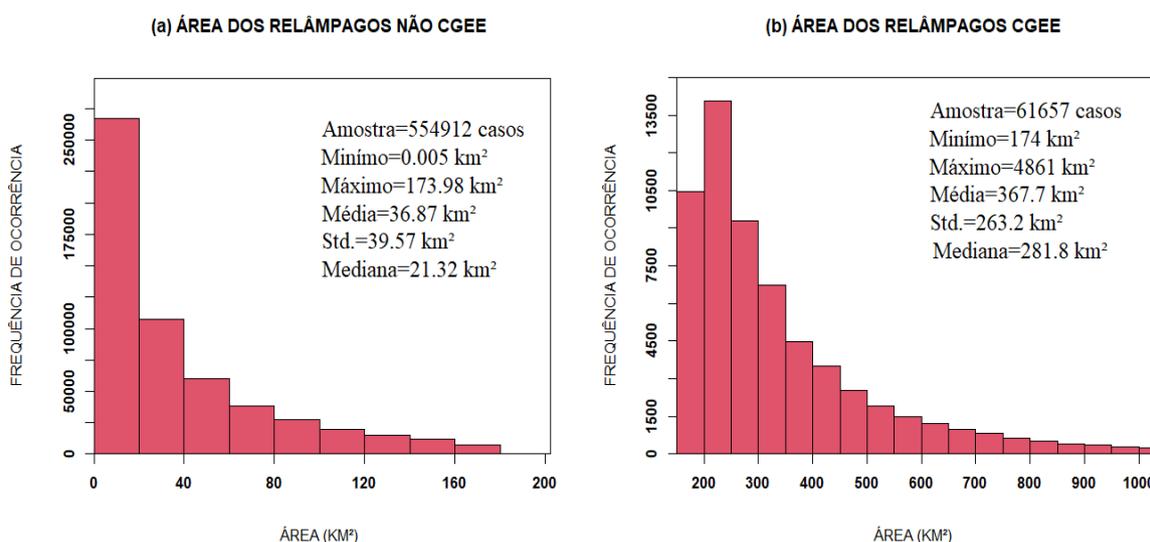
#### **4.1.1. Análise das propriedades físicas entre relâmpagos não com grande extensão espacial e relâmpagos com grande extensão espacial**

A primeira propriedade a ser analisada será a área dos relâmpagos. Importante lembrar que esta variável foi a propriedade utilizada como referência para a definição e seleção dos relâmpagos CGEE nesse trabalho. As características referentes a área podem ser observadas na Figura 3. Podemos observar que para ambas as distribuições as maiores ocorrências estão centradas nos relâmpagos de menores áreas. O tamanho dos relâmpagos apresentou uma ampla faixa de variação entre os extremos, com mínimo de 0,005 km<sup>2</sup> e máximo de 173,98 km<sup>2</sup> para os relâmpagos não CGEE (Figura 3a). Com relação as medidas de tendência central utilizadas no presente estudo, os relâmpagos não CGEE apresentaram média e mediana de 36,87 km<sup>2</sup> e 21,32 km<sup>2</sup>, já os relâmpagos CGEE (Figura 3b) apresentaram média de 367,7 km<sup>2</sup> e mediana de 281,8 km<sup>2</sup>. Como esperado que os valores tanto da média quanto da mediana fossem maiores para os CGEE, visto que os valores da área são referentes as maiores áreas da amostra.

Silva (2018) estudando a mesma região e empregando o mesmo método de cálculo de área e dados da mesma campanha, porém apenas para o mês de janeiro de 2012 encontrou uma área média de aproximadamente 55,50 km<sup>2</sup> e mediana de 20,59 km<sup>2</sup>. Valores mais altos para a média do que os encontrados no presente estudo para o caso de relâmpagos não CGEE. O que provavelmente ocorreu devido ao menor número de casos estudados (91,732 casos), visto que os valores de medida de tendência central geralmente são afetados pelo tamanho da amostra e por valores de extremos. Além disso o autor estudou toda a amostra de estudo, portanto, podendo diferir da presente pesquisa que dividiu os relâmpagos em dois grupos distintos.

Os CGEE apresentaram um desvio padrão superior aos relâmpagos não CGEE (263,2 km<sup>2</sup> e 39,57 km<sup>2</sup>, respectivamente). Quando observamos os histogramas podemos notar que a maioria dos casos (aproximadamente 400.000) dos relâmpagos não CGEE apresentam áreas pequenas de até aproximadamente 50 km<sup>2</sup>. Em contrapartida, os CGEE apresentam maiores variações, apresentando o maior número de casos (aproximadamente 13.000) entre 200 km<sup>2</sup> e 250 km<sup>2</sup>.

De modo geral, podemos notar que quando avaliamos toda a amostra os relâmpagos apresentam menores tamanhos, variações e medidas de tendência central. Em contrapartida, quando filtramos as maiores áreas, todas essas características apresentam maiores valores e variações. Em ambos os casos, os relâmpagos apresentam uma ampla variação em relação aos valores extremos das áreas. Vale salientar, que todos os histogramas foram realizados até os intervalos de classes nos quais é mais visível a ocorrência, por exemplo para o caso da figura 3b, os CGEE ocorrem até 4861 km<sup>2</sup>, porém após o valor de 1000 km<sup>2</sup> a frequência de ocorrência é quase não notória.



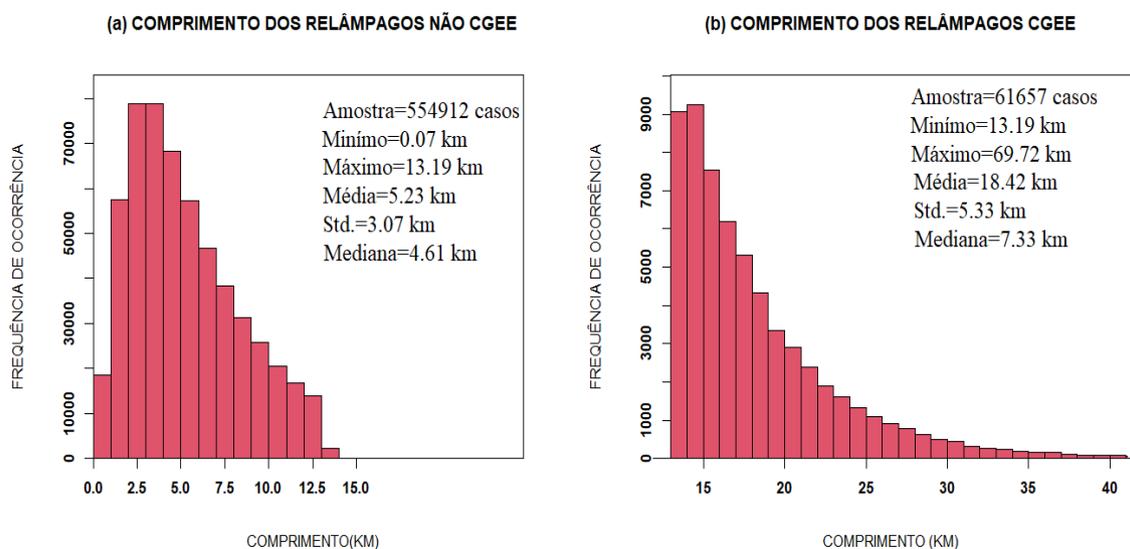
**Figura 3:** Distribuição da frequência absoluta da área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE.

A distribuição dos valores do comprimento dos relâmpagos, assim como a área, também apresenta uma ampla variação dos valores (Figura 4). Esse comportamento era esperado visto que a área e comprimento são relacionados entre si. Os mínimos valores do comprimento encontrados foram de 0,07 km e 13,19 km, dos relâmpagos não CGEE (Figura 4a) e dos CGEE (Figura 4b), respectivamente. Com relação aos valores máximos, os relâmpagos não CGEE apresentaram o valor de 13,19 km, coincidindo com o valor mínimo dos CGEE. Evidenciando assim a relação entre área e comprimento, visto que os dados para o grupo de CGEE são filtrados com relação a variável área, já para os CGEE o máximo encontrado foi de 69,72 km. As variações encontradas entre as propriedades da área e comprimento indicam que cada relâmpago possui sua própria identidade, o que é influenciado pelos processos de formação, como discutido no tópico sobre formação de nuvens e relâmpagos.

Os relâmpagos não CGEE (CGEE) apresentarem média e mediana de aproximadamente 5,23 km e 4,61 km (18,42 km e 7,33 km) de comprimento, respectivamente. Montayà et al. (2014) encontraram comprimentos médios e medianos para os relâmpagos com grande extensão de aproximadamente 14 km e 20 km, respectivamente. Em contrapartida, em relação aos valores extremos, o estudo detectou valores máximos acima de 120 km. As diferenças de valores de comprimento encontradas no estudo citado com relação ao presente estudo podem estar relacionadas aos diferentes sistemas convectivos que originaram os relâmpagos e a utilização de canais de VHF com frequência mais baixa e que tem maior uma melhor eficiência de detecção, como no caso de Montayà et al. (2014).

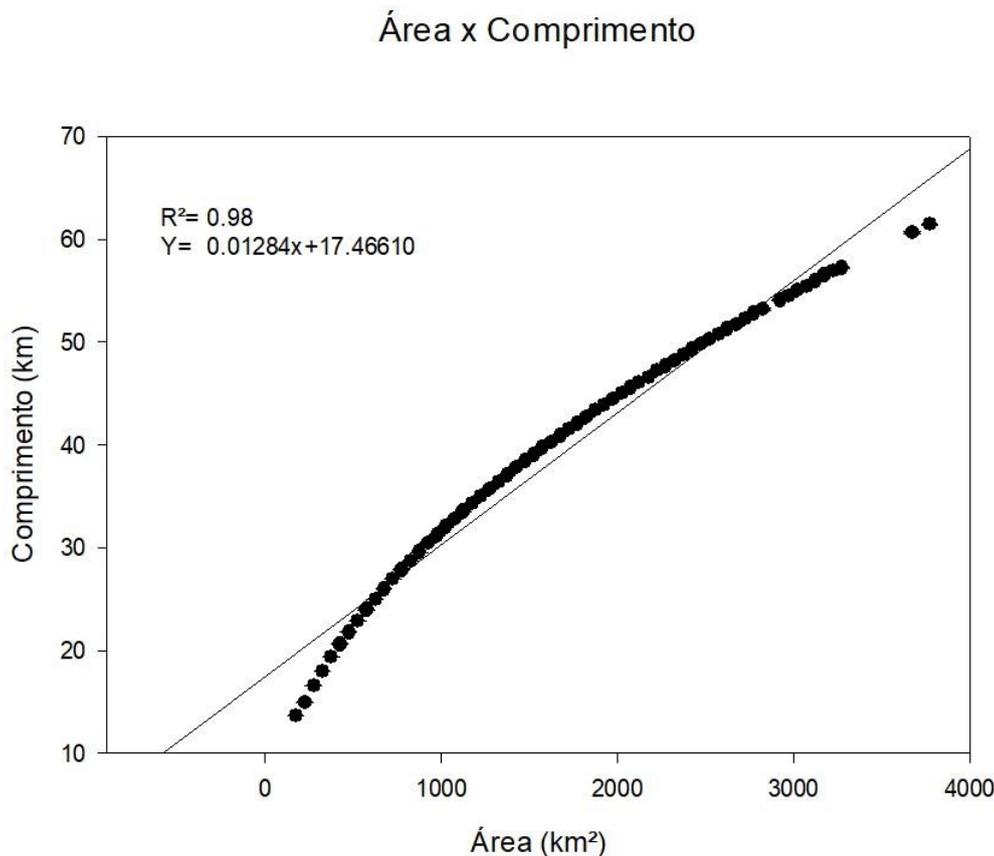
Em adição o comprimento médio (~ 18 km) dos CGEE encontrados no presente estudo, é menor em relação aos *Megafashes* mapeados por satélites, como os documentados por Lyons et al. (2020) (50 km), Peterson et al. (2020) (673 km) e Peterson et al. (2020) (709 km). Sensores orbitais detectam os pulsos óticos emitidos pelos relâmpagos e difundidos através do topo das nuvens em 770 nm e podem imagear uma ampla região; em contrapartida sensores de redes de relâmpagos como a SPLMA detectam a radiação eletromagnética em VHF, e portanto possuem uma limitação espacial (tipicamente < 150 km do centro da rede) (RISON et al.,1999) muito maior que os sensores orbitais.

Os desvios identificados entre relâmpagos não CGEE e relâmpagos CGEE foram de aproximadamente 3,07 km e 5,33 km, respectivamente, conforme já esperado, os CGEE apresentaram valores maiores de desvio. Quando observamos a Figura 4, notamos que a distribuição da propriedade comprimento possui um valor de desvio entre os dois casos menos de discrepantes quando comparada com a área, o que pode ocorrer devido ao filtro ser realizado em função da área. Os maiores valores da amostra dos relâmpagos não CGEE ficam por volta 3 a 5 km e dos relâmpagos CGEE aproximadamente 13 a 16 km.



**Figura 4:** Distribuição da frequência absoluta do comprimento (km) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE.

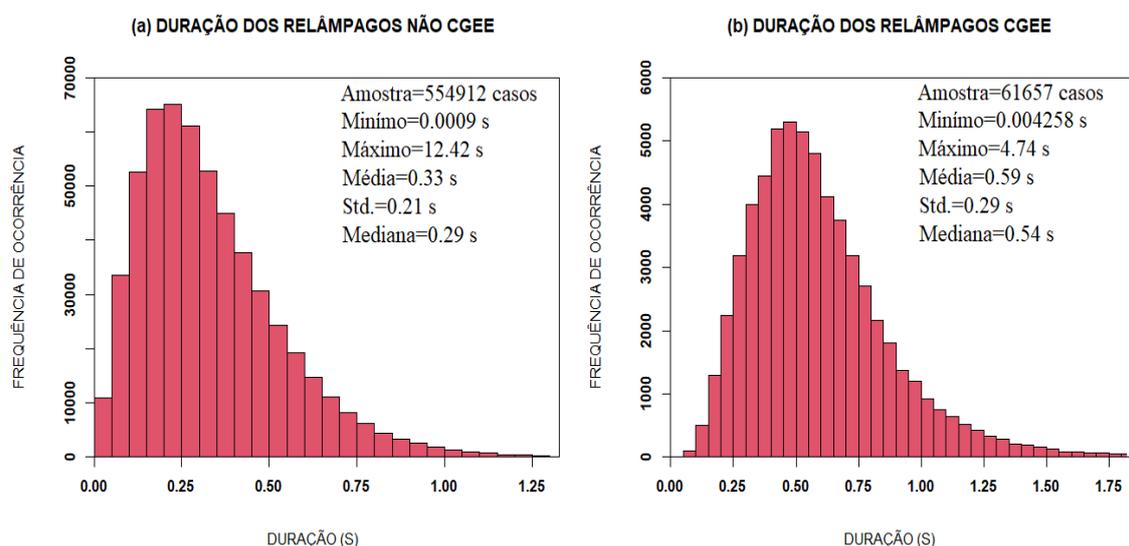
A Figura 5 evidencia um alto coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre a área e o comprimento dos relâmpagos CGEE. Os resultados mostram uma baixa dispersão entre as variáveis e alto índice de correlação (0,98), indicando uma alta correlação positiva entre as propriedades. É interessante observar na Figura 5 que justamente próximo aos valores extremos, temos as maiores dispersões entre as variáveis. É importante salientar que as medidas de dispersão foram realizadas com os dados filtrados em relação aos dados do percentil de 90 em função da área e com divisões em intervalos de 50 a 50, para uma melhor visualização dos dados.



**Figura 5:** Relação de dispersão entre a área (km<sup>2</sup>) e o comprimento (km) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA.

A Figura 6 mostra a distribuição de frequência da duração dos relâmpagos. Os valores de extremos observados foram de 0,0009 s e 12,42 s para os relâmpagos não CGEE (Figura 6a) e 0,004258 s e 4,74 s para relâmpagos CGEE (Figura 6b), respectivamente. Os desvios se apresentaram próximos e com valores baixos, sendo 0,21 s para os relâmpagos não CGEE e 0,29 s para relâmpagos CGEE. A Figura 6 indica que o comportamento dessa variável é bem distribuído, apresentando um comportamento típico de uma distribuição gaussiana, o que também foi identificado por Silva (2018), denotando que esse comportamento é bastante recorrente na natureza. Podemos também observar que esse comportamento é mais pronunciado para a distribuição da duração dos relâmpagos CGEE. As medidas de valores de tendência central foram de 0,33 s e 0,29 s (média e mediana) para os relâmpagos não CGEE e de 0,59 s e 0,54 s (média e mediana) para os relâmpagos CGEE. Valores próximos para a média da duração de relâmpagos não CGEE também foram encontrados no estudo de Albrecht et al. (2014), para

a mesma região de estudo, utilizando os mesmos dados, sendo de aproximadamente de 0,42 s. Silva (2014) estudou regiões próximas a localização dos relâmpagos do presente estudo. A autora empregou dados de uma rede de câmeras de alta velocidade que fazem parte projeto RAMMER (Rede Automatizada Multi-Câmera para o Monitoramento e Estudo de Raios), durante 5 dias dos verões de 2012/2013. Os relâmpagos apresentaram um valor médio de duração de 0,27 s, valor próximo ao encontrado nos casos do presente estudo, porém a autora utilizou uma média geométrica ao invés da média aritmética. Vale ressaltar que esses estudos citados acima utilizaram toda a amostra da série temporal de dados, o que difere do presente estudo.

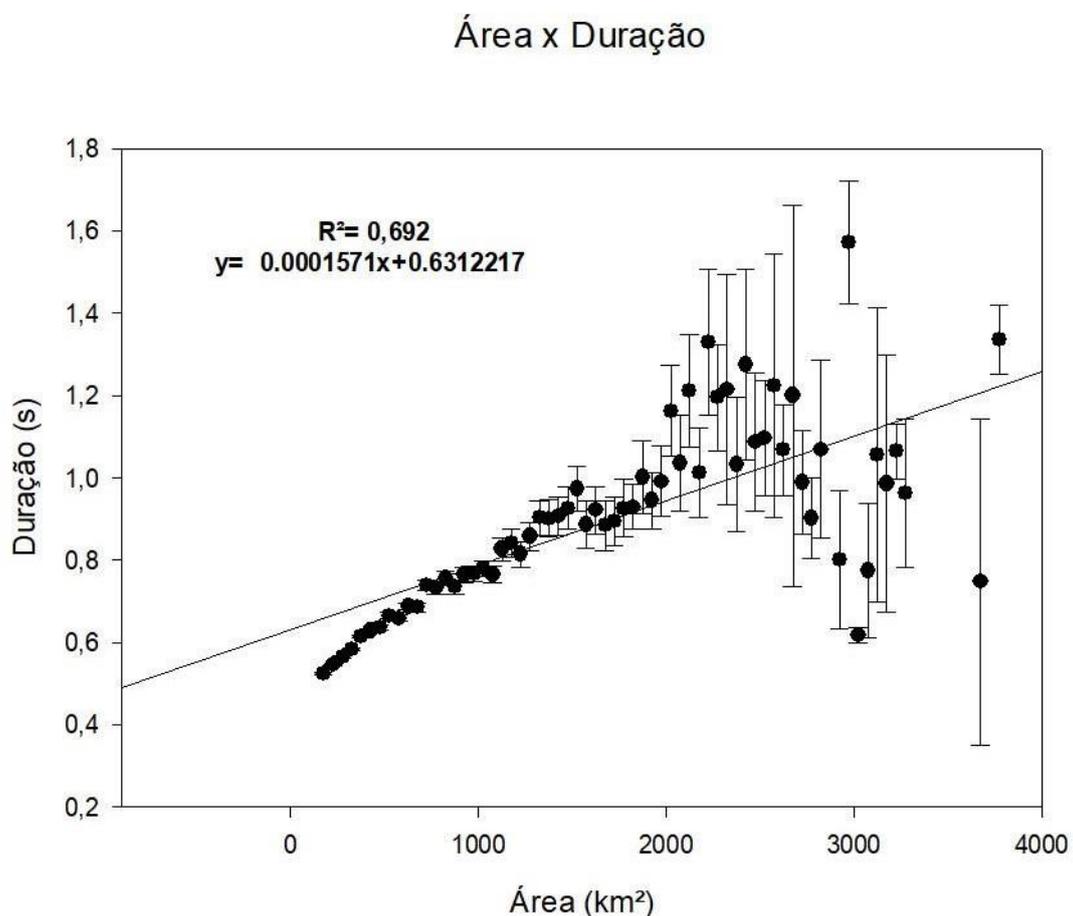


**Figura 6:** Distribuição da frequência absoluta da duração (s) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE.

Ao analisar a relação entre a área e duração (Figura 7), nota-se uma relação crescente em grande parte entre as variáveis. Os resultados mostram uma baixa dispersão entre as variáveis (menos próximos aos extremos) e alto índice de correlação ( $\sim 0,7$ ), indicando uma alta correlação positiva entre as propriedades. ODA (2019) avaliando relâmpagos totais para todo o território brasileiro através de informações do sensor GLM encontrou uma relação semelhante entre as maiores áreas e durações dos relâmpagos. A autora salientou a possibilidade dessas maiores ocorrências estarem relacionadas a sistemas meteorológicos de grande extensão, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Porém, vale ressaltar que essas

relações foram registradas nas regiões Sul, Centro-Oeste e Nordeste e, portanto, não coincidem com a região desse estudo, na qual essa relação foi menos evidenciada.

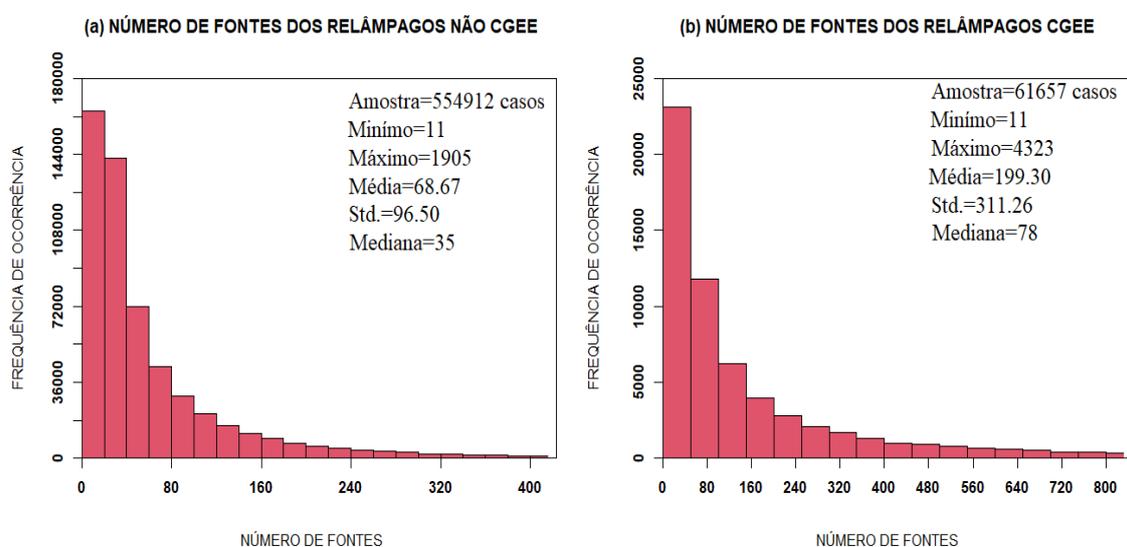
Os relâmpagos desse estudo estão relacionados com sistemas de escala espacial menor, apresentando geralmente convecção isolada e não-organizada, conforme evidenciam, por exemplo, os trabalhos de Mattos (2015) e Beltran (2017). Observamos também que uma maior dispersão na relação é evidenciada em valores extremos, conforme também observado na relação entre área e comprimento. A dispersão na relação entre duração e área observada para valores maiores de área, provavelmente esteja associada a menor quantidade de amostras para essas classes.



**Figura 7:** Relação de dispersão entre a duração (s) e a área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA.

A última propriedade analisada é o número de fontes de VHF de cada relâmpago. Importante salientar que esta estatística sofre influência do critério

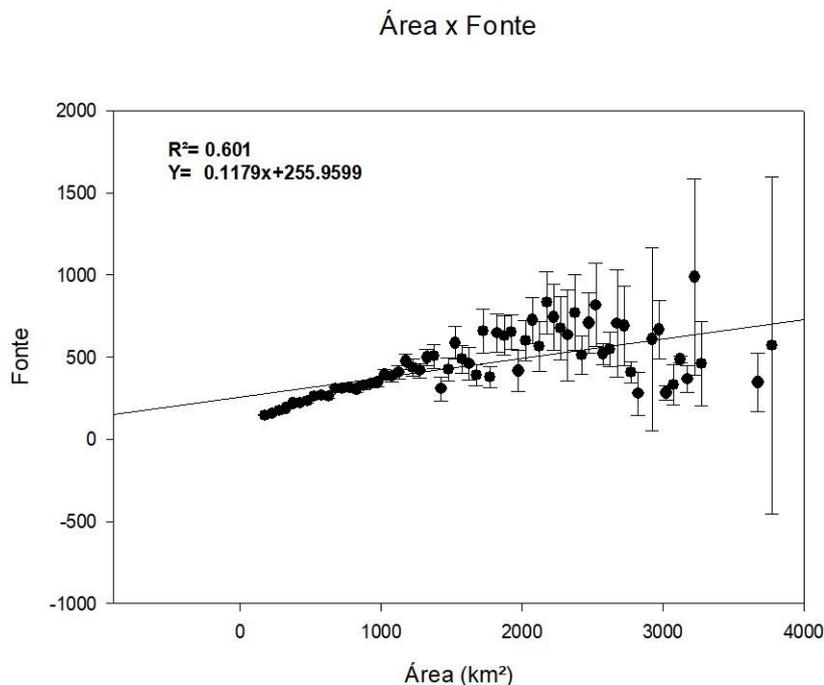
de filtragem aplicado para a eliminação de ruídos (ou seja, a utilização de apenas relâmpagos que possuem mais de 10 fontes de VHF) já comentado anteriormente no presente estudo, tanto para relâmpagos não CGEE, quanto para os relâmpagos CGEE. O mínimo de fontes de VHF encontrado foi de 11, e o máximo foi de 1905 fontes para relâmpagos não CGEE e 4323 fontes para CGEE (Figuras 8a e 8b). A distribuição dessa propriedade mostra-se semelhante em ambos os casos, apresentando mais casos com poucas fontes e diminuindo a quantidade de casos conforme o número de fontes aumenta, com o pico de casos ocorrendo até 100 número de fontes. Essa propriedade apresentou média e mediana para os relâmpagos não CGEE (CGEE) de 68,67 e 35 (199,3 e 78). Albrecht et al. (2014) também encontraram uma relação semelhante no seu estudo, nos quais a maioria dos casos apresentava valores até 100 fontes, porém alguns apresentavam valores maiores que 1000 número de fontes.



**Figura 8:** Distribuição da frequência absoluta do número de fontes de VHF por relâmpago para os relâmpagos detectados pela rede SPLMA para: (a) relâmpagos não CGEE e (b) relâmpagos CGEE.

A Figura 9 mostra a relação de dispersão entre área e o número de fontes de VHF dos relâmpagos. Os resultados mostram a existência de uma forte correlação positiva entre as variáveis até áreas de aproximadamente 2500 km<sup>2</sup>, podendo indicar que áreas menores tendem a possuir baixa quantidade de fontes de VHF. Conforme a área aumenta, a dispersão também aumenta, o que pode ter influenciado o valor moderado do índice de correlação obtido entre as

duas propriedades (0,601). Nos valores extremos do final da série podemos observar os maiores valores de dispersão entre as duas propriedades.

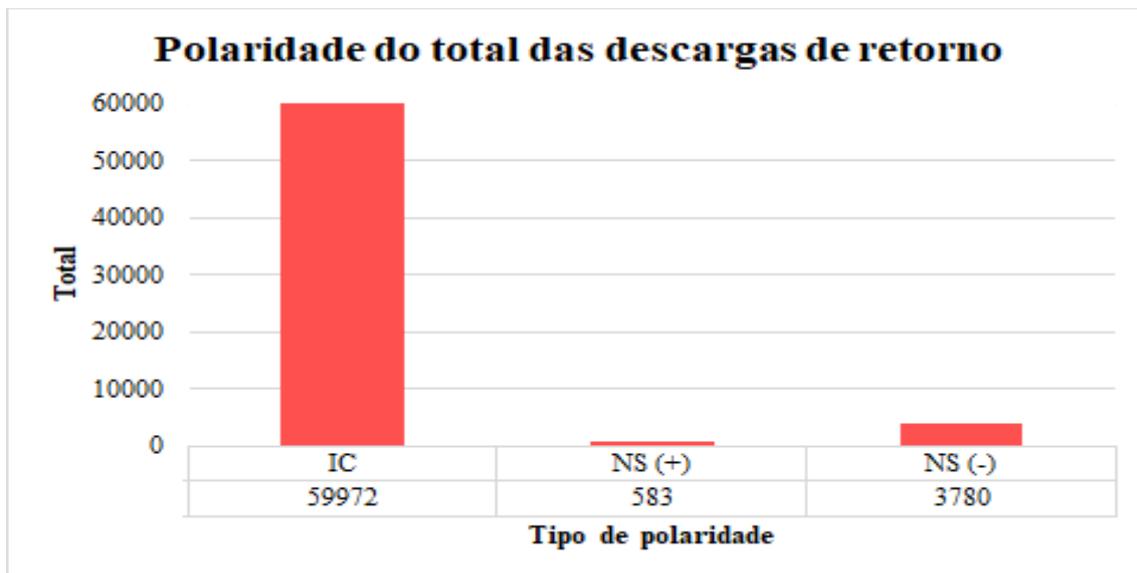


**Figura 9:** Relação de dispersão entre o número de fontes de VHF e a área (km<sup>2</sup>) dos relâmpagos CGEE detectados pela rede SPLMA.

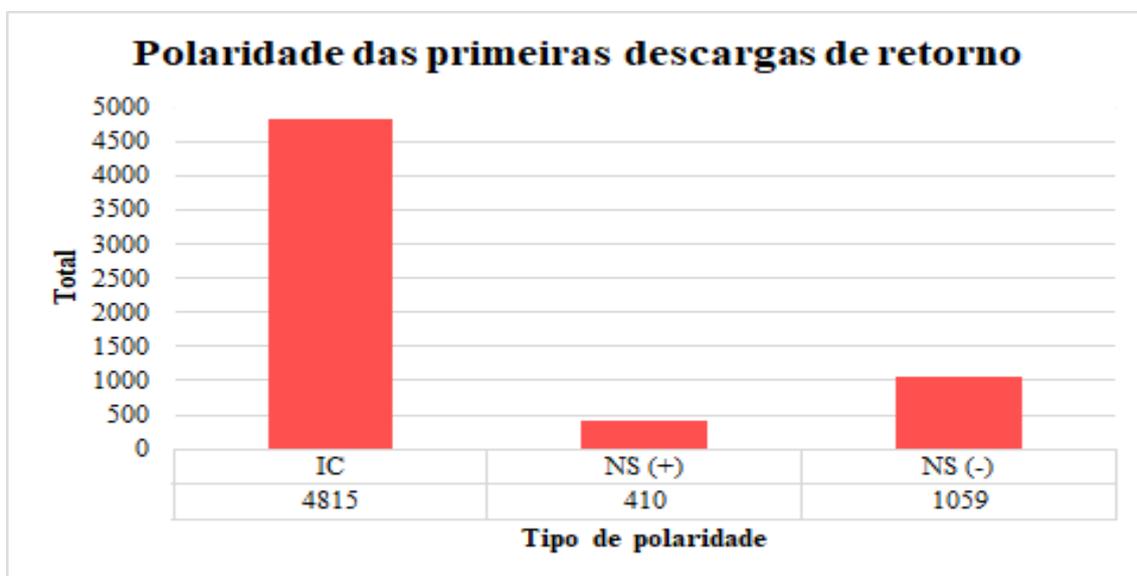
## 5.2 Propriedades elétricas dos relâmpagos com grande extensão espacial

Nesse tópico serão discutidas as propriedades elétricas dos relâmpagos CGEE estimadas pela rede BrasilDAT. Para isto os relâmpagos detectados pela rede SPLMA foram combinados com os relâmpagos da BrasilDAT. Quando analisamos a polaridade dos relâmpagos (Figuras 10 e 11) é observado que a maioria das descargas de retorno são IN (tanto ao considerar todas as descargas de retorno de um mesmo relâmpago (Figuras 10), quanto ao considerar apenas a primeira descarga de retorno dos relâmpagos (Figuras 11)). Estes resultados corroboram com a literatura conforme citado no início desse trabalho de que, existe uma predominância de casos de relâmpagos IN nas tempestades. Em contrapartida, quando analisamos os casos de descargas de retorno NS, nota-se uma predominância de relâmpagos NS negativos quando comparados aos NS positivos, valor muito

decorrente na literatura, como verificado por exemplo, pelo trabalho de Ballarotti (2007).

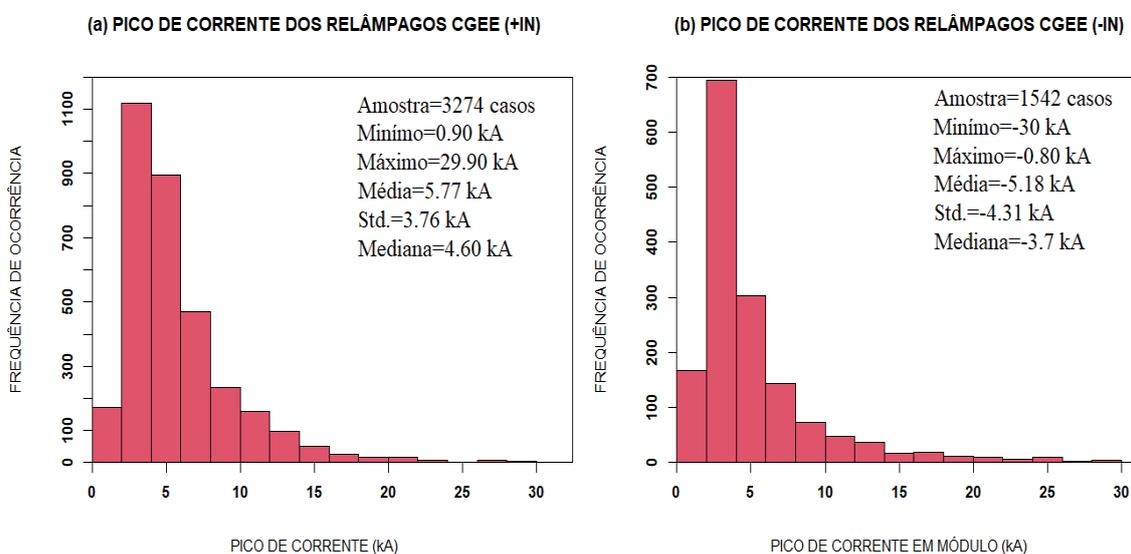


**Figura 10:** Distribuição de ocorrência de todas as descargas de retorno intra-nuvem e nuvem-solo positivo e negativo dos relâmpagos provenientes da rede BrasilDAT.



**Figura 11:** Idem a Figura 10 para a primeira descarga de retorno dos relâmpagos.

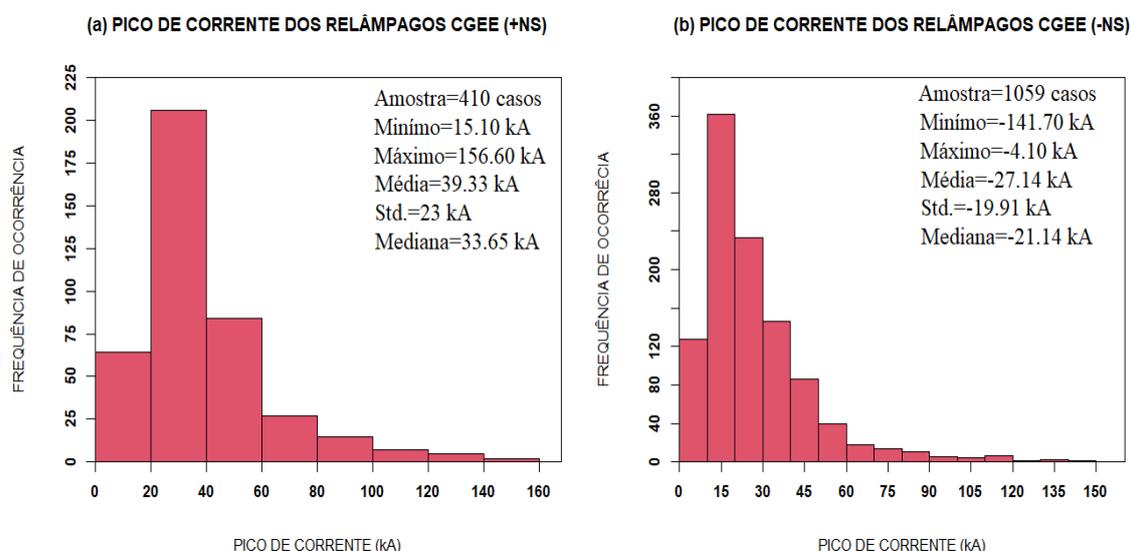
A segunda propriedade elétrica a ser analisada será o pico de corrente dos CGEE que possuem predominância de descarga de retorno IN (positivos e negativos). As características referentes os valores de pico de corrente podem ser observadas na Figura 12. Pode-se observar que os CGEE IN positivos possuem quase o dobro de eventos a mais do que os negativos (3274 casos e 1542 casos, respectivamente). Em ambos os casos as maiores ocorrências de pico de corrente são concentradas nas classes de valores de 2,0 a 6,0 kA e apresentam valores extremos muito próximos, apresentando em módulo máximos de aproximadamente 30 kA e mínimos de 0,85 kA. Com relação as medidas de tendência central, os CGEE IN positivos apresentaram uma média de 5,77 kA, mediana de 4,60 kA e desvios de 3,76 kA, ambos valores maiores do que os valores encontrados para os relâmpagos IN negativos. Vale ressaltar que na literatura ainda são escassos estudos sobre o comportamento do pico de corrente de relâmpagos IN, conforme discutido na introdução desse trabalho, apesar representarem o maior número de casos, são de difícil medição e não são danosos em superfície como os relâmpagos NS.



**Figura 12:** Distribuição da frequência absoluta do pico de corrente (kA) dos CGEE intra-nuvem (a) positivos e (b) negativos.

Comparando os picos de corrente dos relâmpagos NS (Figura 13) com os IN (Figura 12), nota-se que os relâmpagos CGEE NS são mais energéticos. Comparando a polaridade dos relâmpagos NS positivos em relação aos negativos, pode-se observar que os relâmpagos NS positivos apresentaram

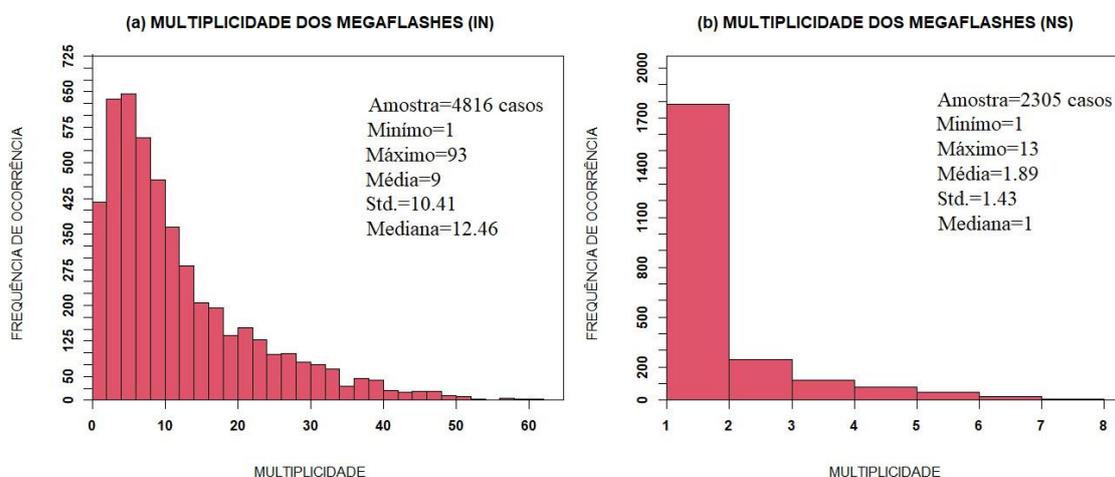
valores de medida central maiores do que os NS negativos. Em adição, os valores de extremos são maiores em módulo, indicando que os CGEE possuem picos de corrente maior para os relâmpagos de polaridade positiva, valores em módulo que corroboram com valores típicos encontrados na literatura (OGAWA, 1995; NACARRATO, 2011). Silva (2018) encontrou uma relação contrária estudando relâmpagos totais na mesma região. O autor documentou valores de maiores intensidade de cargas para os relâmpagos NS negativos. Paulucci (2017), analisando relâmpagos que ocorreram na região metropolitana do Rio de Janeiro encontrou valores médios de pico de corrente maiores para relâmpagos NS positivos, porém com pouca variação (aproximadamente 1kA) quando comparado ao valor médio para relâmpagos NS negativos. O presente trabalho verificou uma diferença muito maior entre valores de pico de corrente médios, sendo de 39,33 kA para NS positivos e em módulo 24,14 para NS negativos.



**Figura 13:** Distribuição da frequência absoluta do pico de corrente (kA) dos CGEE nuvem-solo (a) positivos e (b) negativos.

A terceira propriedade elétrica analisada diz respeito a multiplicidade dos CGEE IN (Figura 14a) e NS (Figura 14b). Nota-se que os CGEE IN possuem quase o dobro de amostras de eventos quando comparados ao NS, o que já era esperado dado a predominância de descargas de retorno IN. Com relação aos valores de medida central, a média para os CGEE IN foi de aproximadamente 9 descargas de retorno. Em contrapartida, os CGEE NS

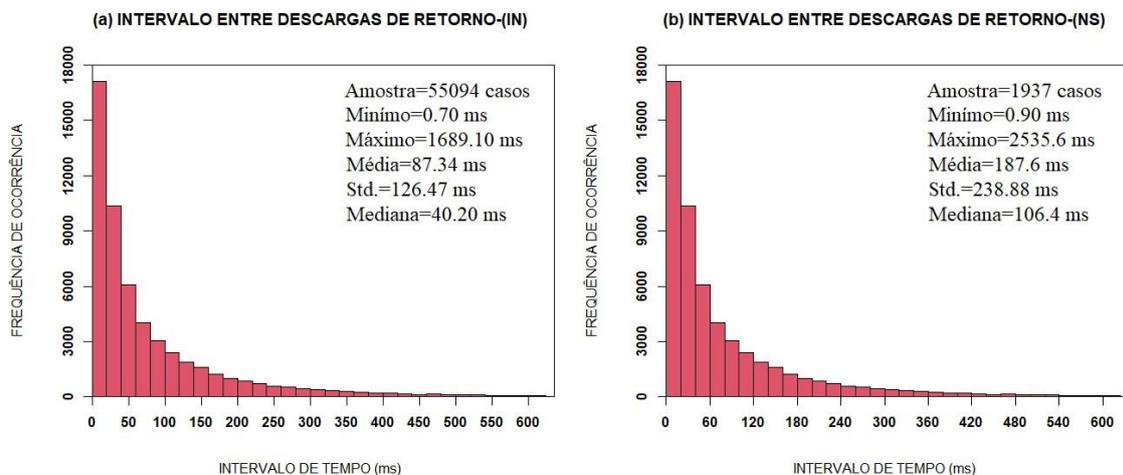
apresentaram uma multiplicidade média e mediana de aproximadamente 1. Este resultado é evidenciado graficamente, tendo quase todos os casos ocorrendo entre 1 e um desvio baixo de 1,43. Já os IN possuem uma distribuição menos uniforme, apresentando um comportamento de uma distribuição gaussiana e tendo um desvio de 10,41 e, portanto, valores bem mais distribuídos graficamente. Interessantemente Williams et al. (2016) ao analisar a multiplicidade do primeiro relâmpago NS em tempestades compactas encontraram valores semelhantes de multiplicidade.



**Figura 14:** Distribuição da frequência absoluta da multiplicidade (número de descarga de retorno por relâmpago) dos CGEE: (a) intra-nuvem e (b) nuvem-solo.

A última propriedade a ser analisada é o intervalo de tempo entre as descargas de retorno dos CGEE IN (Figura 15a) e NS (Figura 15b). Comparando os dois tipos de CGEE nota-se que a maioria dos casos ocorre para os IN, conforme já esperado. Os CGEE NS apresentaram maiores valores de medidas centrais e extremos quando comparados aos IN, apesar dessa diferença nota-se que graficamente ambos os casos apresentam o maior número de casos ocorrendo entre 1 a 60 ms. O trabalho de Williams et al. (2016) analisando o intervalo de tempo de descargas encontraram valores de média entre 72 ms para relâmpagos NS, os autores salientaram que valores próximos a esse já foram encontrados na literatura, como em Ballarotti (2007). O valor encontrado nesse trabalho é muito superior (187,6) e provavelmente

diferiu de outros trabalhos pela ampla amostra de casos estudados e por estarem associados especificamente a relâmpagos de longa extensão.



**Figura 15:** Distribuição da frequência absoluta do intervalo de tempo entre descargas de retorno (ms) dos CGEE para os relâmpagos: (a) intra- nuvem e (b) nuvem-solo.

### 5.3 Estudos de casos

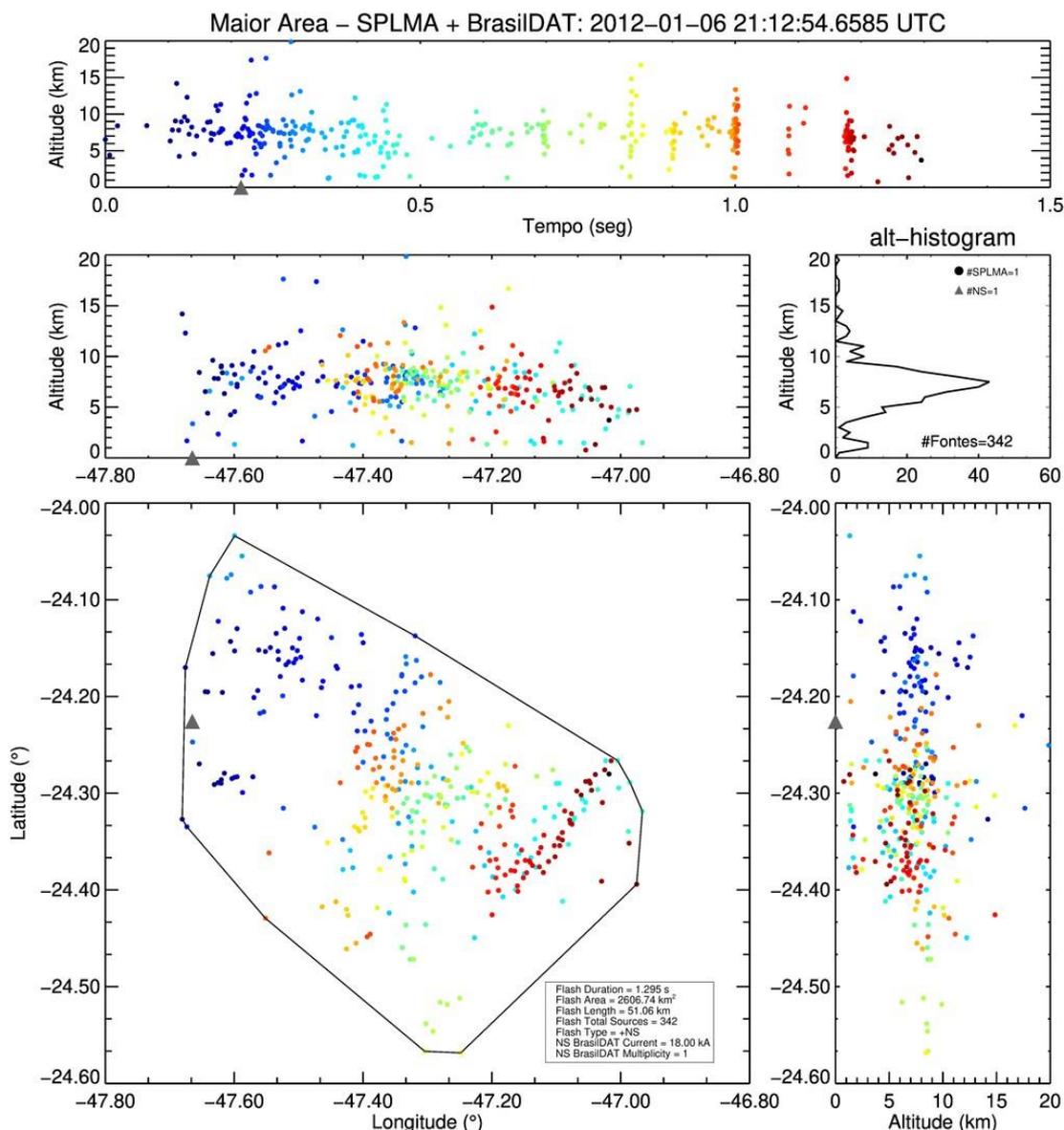
A seguir serão discutidos o comportamento das fontes VHF dos casos extremos dos CGEE que foram detectados simultaneamente pelas redes BrasilDAT e SPLMA. Para tanto foram escolhidos o caso que apresentou a maior extensão espacial e o caso com a maior duração entre os CGEE. Para ambos os casos também será avaliado o comportamento da estrutura vertical da tempestade estimada por radar. Os casos de extremos ocorreram em datas próximas, dia 6 de janeiro de 2012 (maior área, 2606,74 km<sup>2</sup>) e dia 7 de janeiro de 2012 (maior duração, 2,44 s). Ao que tudo indica, o sistema se intensificou do dia 6 para o 7 e será observado pelas imagens de radar meteorológico.

#### 5.3.1 Relâmpago com grande extensão espacial que apresentou a maior área (2606,47 km<sup>2</sup>)

O primeiro caso de estudo desta análise diz respeito ao CGEE que apresentou a maior área. Os círculos coloridos nas figuras significam os tempos de propagações das fontes VHF, ou seja, o círculo azul representa o primeiro tempo até o círculo vermelho que apresenta o último tempo, comportamento de fácil visualização no painel (a) da Figura 16. Nessa figura pode-se notar que a maior concentração de fontes VHF estão concentradas nos primeiros tempos, até aproximadamente 0,5 s, apresentando o CGEE que teve uma duração

de aproximadamente 1,29 s. O CGEE apresentou 342 fontes de VHF. Ainda nesse painel nota-se que, apesar da rede BrasilDAT ter verificado apenas uma descarga de retorno, a figura indica várias outras que não foram detectadas pela rede e que o relâmpago se iniciou alguns segundos antes da primeira descarga de retorno (e única) detectada. O painel (b) mostra que a distribuição das propagações de fontes foi uniforme entre as longitudes de aproximadamente  $-47,70^\circ$  e  $-47,00^\circ$  e o painel (e) indica uma propagação das fontes ocorrendo entre  $-24,45^\circ$  a  $-24,10^\circ$ , o que é bem evidenciado no painel (d), a qual representa a área estimada do CGEE e mostra uma maior variação latitudinal do CGEE e um sentido de propagação do noroeste para sudeste. No painel (c) nota-se que a altitude chegou a quase 20 km e que apresentou uma curva gaussiana ao longo do histograma, tendo a altitude na qual se ocorreu o maior número de casos entre 5 a 10 km. Os painéis (a), (b) e (e) indicam que algumas descargas se propagaram até aproximadamente 20 km de altura.

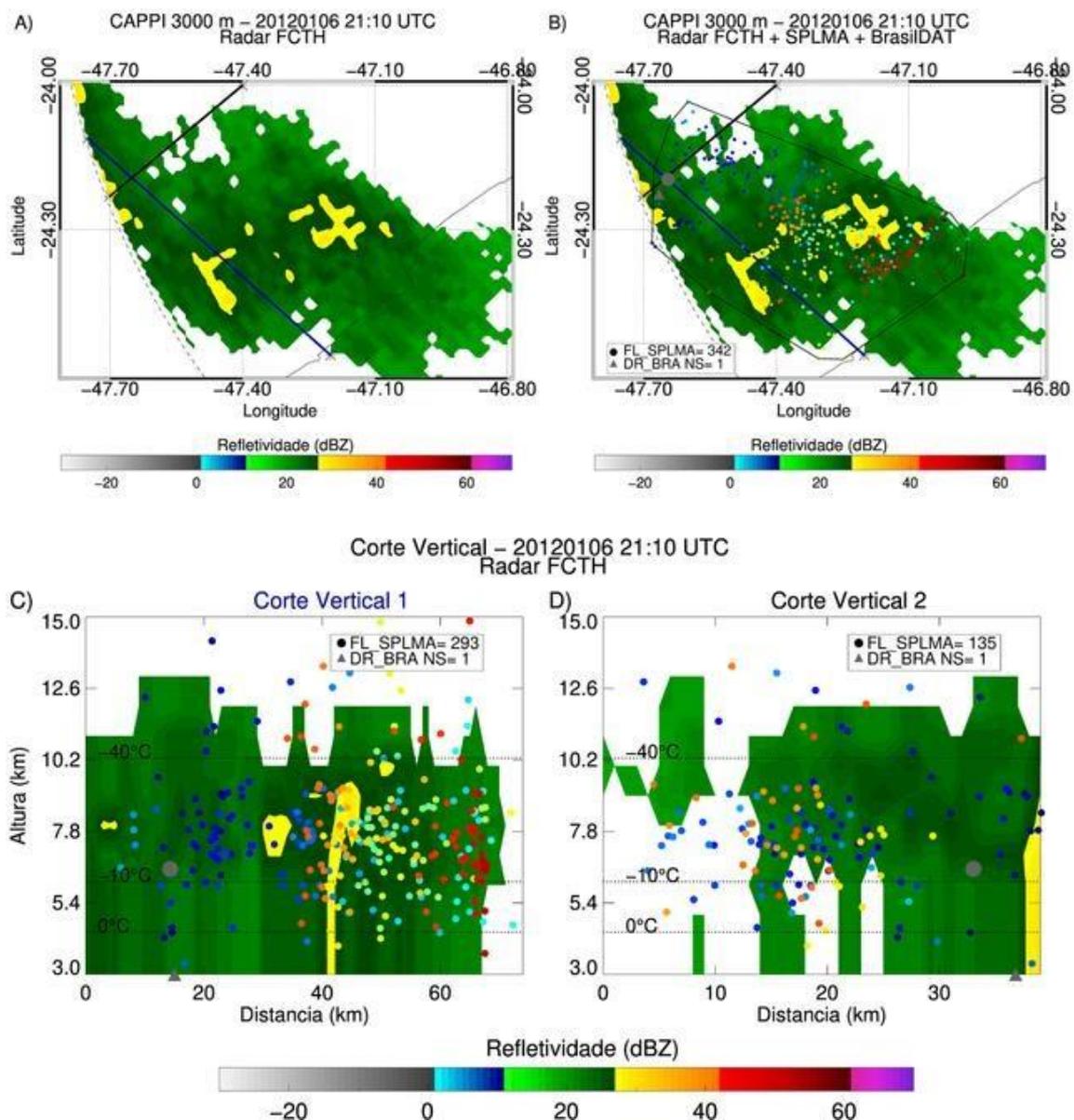
Com relação as propriedades elétricas esse CGEE apresentou somente uma descarga de retorno NS positivo, corroborando com o valor de multiplicidade encontrado para a maioria dos casos do tipo, tendo apenas 1 multiplicidade, já o pico de corrente apresentou valores de 18 kA, apresentando valores de intensidade do pico menores do que a média encontrada para os NS positivos (39,33 kA).



**Figura 16:** Distribuição espacial e temporal das fontes de VHF do CGEE que possui a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os painéis representam: (a) altitude versus tempo - as cores representam o tempo das fontes dentro do ciclo de vida do relâmpago, (b) altitude versus longitude, (c) histograma de altitude das fontes de VHF, (d) latitude versus longitude e (e) latitude versus altitude. Na legenda são mostrados os valores das propriedades físicas e elétricas estimadas através das informações das redes SPLMA e BrasilDAT.

A refletividade de radar proveniente de um alvo meteorológico está relacionada a concentração e tamanho dos hidrometeoros presentes em um determinado volume de amostragem da nuvem precipitante (RINEHART, 2004; OLIVEIRA, 2014). Quanto maior o número e tamanho das partículas maior o valor de refletividade. Em adição, as características físicas e microfísicas da tempestade são fortes moduladores das propriedades dos relâmpagos. Portanto,

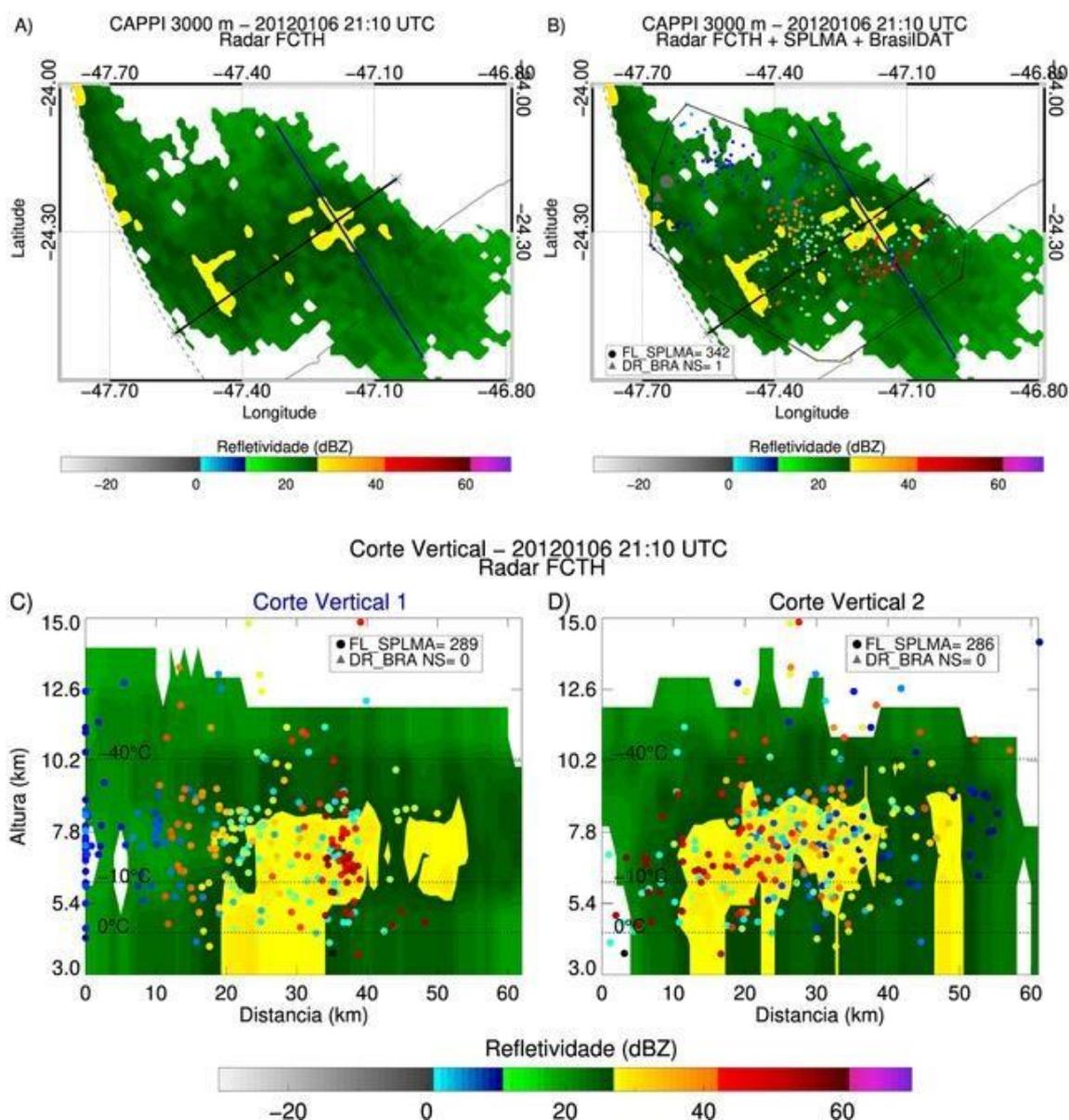
torna-se importante neste momento analisar a estrutura vertical da tempestade que produziu o relâmpago que está sendo analisado. Baseado nisto, a Figura 17a e b mostram o CAPPI de refletividade em 3 km de altura e o local onde foram realizados cortes verticais. Os cortes verticais foram realizados próximo da região onde ocorreu o relâmpago NS registrado pela rede BrasilDAT. O local de ocorrência da descarga de retorno pode ser observada no painel b, onde a área do CGEE (polígono em cinza) indica que as fontes de tempos intermediários do CGEE (pontos em azul claro e laranja) ocorreram nas regiões de maior atividade convectiva do sistema precipitante (entre 30 e 40 dBZ). Esta observação é evidenciada ao analisar-se o painel (c), que é referente ao corte vertical realizado na região de abrangência da reta em azul. Nota-se que nessa região o sistema apresentou 293 fontes e uma altura de aproximadamente 12,8 km. Já o segundo corte vertical (painel d), apresentou valores de refletividade menos intensos, menor número de fontes (135) e uma altura máxima próxima do primeiro corte vertical.



**Figura 17:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os cortes verticais foram realizados centrados no local do relâmpago NS registrado pela BrasilDAT (círculo preenchido cinza).

Informações sobre a região mais intensa do sistema precipitante do CGEE de maior extensão são observadas na Figura 18. Nesta figura os cortes verticais foram realizados na porção mais intensa da tempestade. O painel (a) mostra os locais nos quais os cortes verticais foram realizados e a

propagação das fontes e a área do CGEE são indicados no painel (b). No primeiro corte vertical (painel (c)) observa-se que nessa região a localidade do sistema precipitante detectada pelo radar apresentou alturas de aproximadamente 14 km. Ocorreram 289 fontes de VHF e uma região bem evidenciada de alta refletividade (entre 30 e 40 dBZ) e altura máxima próxima a 8 km. Essa região de alta atividade convectiva coincidiu com fontes que ocorreram entre o meio e próximas ao término do CGEE. Já o segundo corte vertical (painel (d)) apresenta um comportamento similar ao observado no primeiro corte, porém apresentando menores números de fontes e uma região mais extensa (em distância) apresentando altos valores de refletividade.



**Figura 18:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior área (2606,74 km<sup>2</sup>). Os cortes verticais foram realizados centrados no local mais intenso da tempestade (refletividade maiores que 35 dBZ).

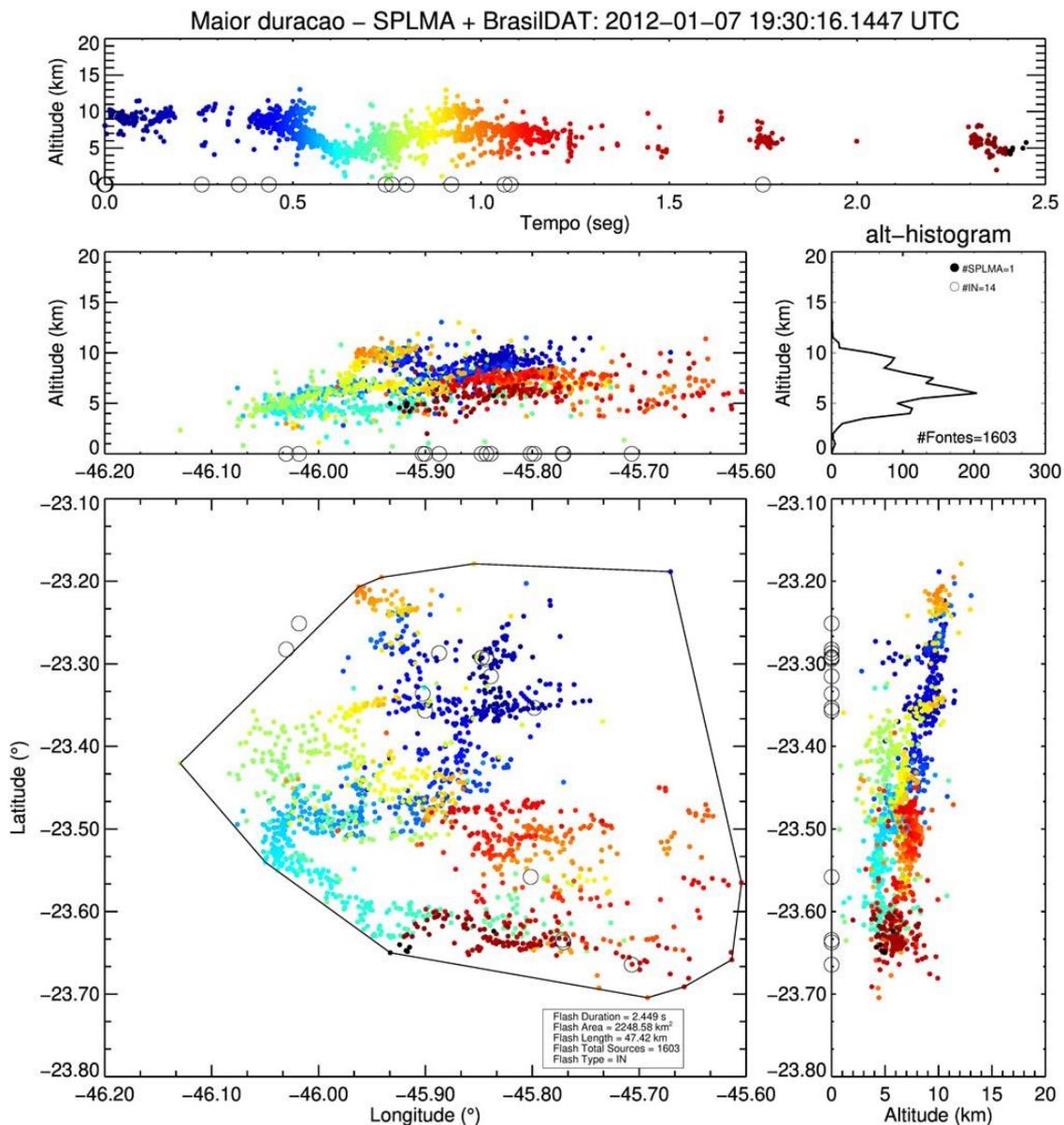
### 5.3.2 Relâmpago com grande extensão espacial que apresentou a maior duração (2,44 s)

A Figura 19 mostra a distribuição espacial-temporal das fontes de VHF proveniente da rede SPLMA e das descargas de retorno da BrasilDAT do CGEE de maior duração (2,44 s). Ao analisar a figura é observado que a

maior concentração de fontes ocorre até aproximadamente 1 s (painel (a)). Esse CGEE apresentou uma área de 2248,58 km<sup>2</sup> e 1603 fontes de VHF, e portanto, os valores encontrados corroboram com os resultados observados na primeira parte desse trabalho de que, relâmpagos com áreas até aproximadamente 2500 km<sup>2</sup> apresentam maiores durações e número de fontes (comparando com os valores observados para o caso de maior extensão).

A distribuição da propagação de fontes longitudinalmente (painel (b)) ocorreu entre -46,10° a -45,60° e latitudinalmente (painel (c)) entre -23,50° a -23,20°, com um sentido de propagação bem evidenciado na estimativa de área ((Figura 5.3.2 (d)), começando no sentido noroeste, indo para o sentido sudoeste e depois e propagando para sudeste. Na Figura 19 (c) nota-se que a altitude chegou a quase 12 km e que apresentou também apresentou uma curva gaussiana ao longo do histograma, tendo a altitude na qual se ocorreu o maior número de casos entre 5 a 8 km.

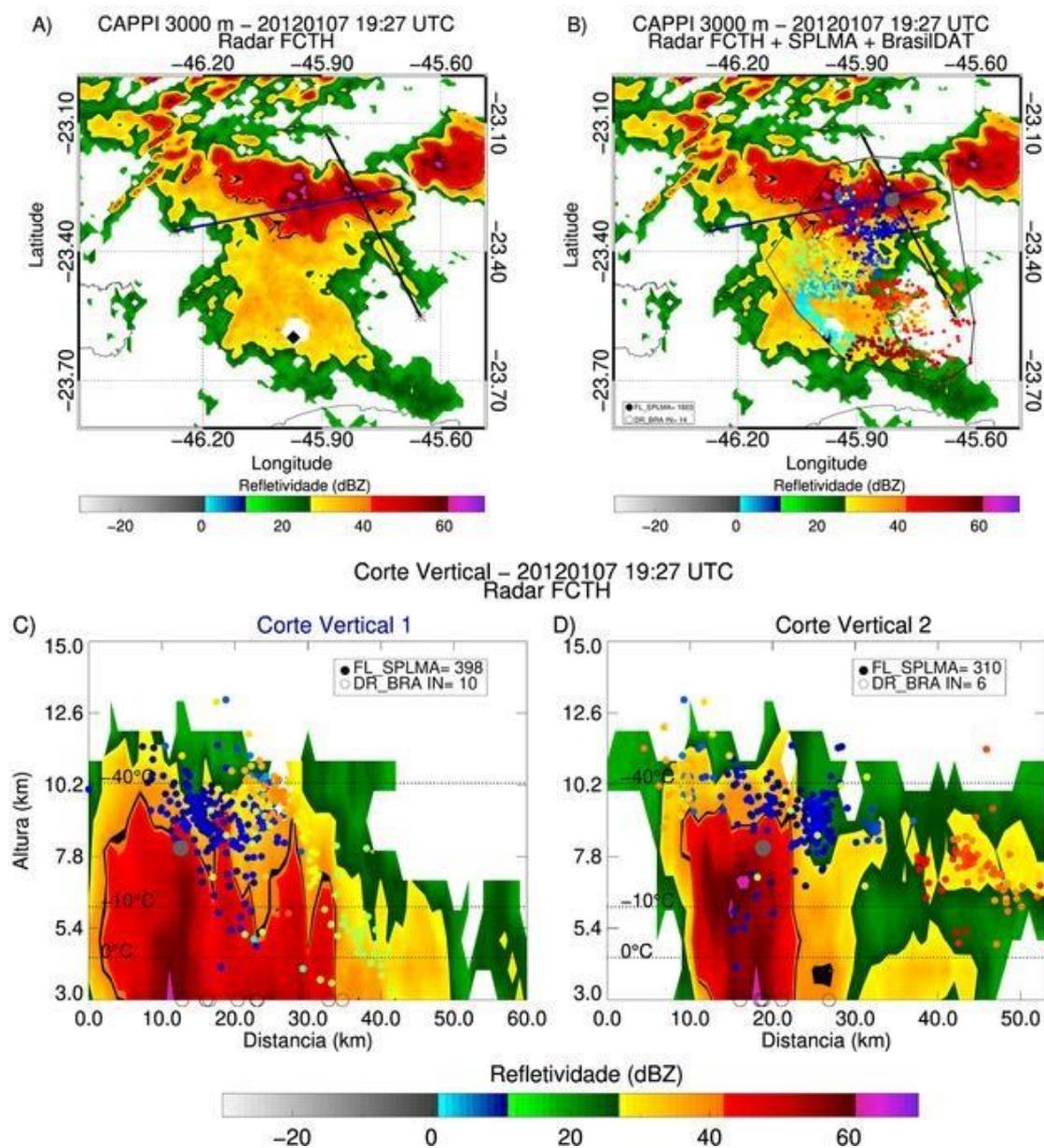
Esse CGEE apresentou apenas descargas de retorno IN, com multiplicidade uma multiplicidade de 19. Este valor está acima da média encontrada nesse estudo (~ 9) e o pico de corrente com valores de 3,4 kA, apresentando valores de intensidade do pico menores do que a média encontrada para os IN (em torno de 5,5 kA). Porém este valor é menor do que o pico de corrente encontrado para o caso de maior área, corroborando com os resultados obtidos nesse estudo de que relâmpagos NS apresentam maior intensidade desse parâmetro quando comparados aos IN.



**Figura 19:** Distribuição espacial e temporal das fontes de VHF do MegaFlash que possui a maior duração (2,44 s). Os painéis representam: (a) altitude versus tempo- as cores representam o tempo das fontes dentro do ciclo de vida do relâmpago, (b) altitude versus longitude, (c) histograma de altitude das fontes de VHF, (d) latitude versus longitude e (e) latitude versus altitude. Na legenda são mostrados os valores das propriedades físicas e elétricas estimadas através das informações das redes SPLMA e BrasilDAT.

A Figura 20 mostra o CAPPI de 3 km de altura de refletividade e os cortes verticais realizados para a parte mais intensa da tempestade que produziu o CGEE de maior duração (2,44 s). A região e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno podem ser observados nos painéis (a) e (b), onde no painel (b) a área do CGEE (polígono em cinza) indica que a região de maior intensidade sistema ocorreu no tempo de ocorrência das primeiras fontes

(pontos em azul escuro) do CGEE. O primeiro corte vertical indica uma região de intensa atividade convectiva (entre 40 a 65 dBZ), chegando a alturas de aproximadamente 10 km, associadas as primeiras fontes do CGEE. Na distância de 10 km (eixo x), nota-se uma região de refletividade > 60 dBZ, essas regiões estão associadas a ocorrência de granizo em tempestades. O segundo corte vertical (painel (d)), mostra um comportamento similar ao primeiro, porém apresentando menor número de fontes e regiões com alta refletividade menos estreitas em distância.



**Figura 20:** (a) CAPPI de 3 km de altura da refletividade e região dos cortes verticais (retas azul e preta), (b) idem ao item (a) indicando as fontes de VHF (círculos preenchidos coloridos, indo da fonte de VHF com o menor (cor azul) ao

maior (cor vermelha) tempo) e o local de ocorrência da primeira descarga de retorno (círculo preenchido cinza), (c) primeiro (reta azul) e (d) segundo (reta preta) corte vertical da refletividade para o relâmpago que apresentou a maior duração (2,44 s). Os cortes verticais foram realizados centrados no local mais intenso da tempestade (refletividade maiores que 65 dBZ).

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho avaliou as propriedades físicas e elétricas de relâmpagos CGEE na Região Metropolitana de São Paulo entre novembro de 2011 e março de 2012 durante a campanha CHUVA-Vale. Pela primeira vez no Brasil foram mapeados os relâmpagos de grande extensão (área > 174 km<sup>2</sup>) através de uma combinação simultânea de redes de relâmpagos operando em duas e três dimensões.

Os CGEE apresentaram os maiores comprimentos, durações e número de fontes, quando comparados aos relâmpagos não CGEE. Os CGEE também apresentaram um aumento no comprimento quando a área aumenta e essa mesma relação para duração e número de fontes. Contudo foi observado uma diminuição quando são observados os maiores valores de área (> 2500 km<sup>2</sup>).

Analisando as propriedades elétricas pode-se inferir que a maioria dos CGEE são do tipo IN, seguido de NS negativos e de NS positivos, comportamento semelhante ao documentado na literatura. Com relação ao pico de corrente, em relação aos CGEE que possuem predominância de descargas de retorno IN quase não se notou diferenças entre as polaridades negativas e positivas. Em contrapartida, para os CGEE NS notou-se que os positivos apresentam, no geral, valores de picos de corrente maiores do que os negativos, valor decorrente na literatura. Além disso os CGEE NS se mostraram mais energéticos quando comparados aos IN, embora menos decorrentes. A multiplicidade se mostrou mais uniforme para os CGEE NS do que os IN, com os NS apresentando a maioria dos casos ocorrendo em torno de 1 multiplicidade. O presente trabalho encontrou intervalos de tempo entre descargas de retorno de CGEE IN e NS maiores do que

o normalmente foram documentados na literatura, podendo indicar que esses valores são maiores no caso de CGEE.

O CGEE de maior extensão apresentou valores abaixo da média para o pico de corrente e um sentido de propagação de noroeste para sudeste. Em contrapartida, o CGEE de maior duração apresentou valores de pico de corrente menor do que o CGEE de maior área. Estes resultados corroboram com os resultados encontrados na segunda parte do trabalho, e um sentido de propagação começando no sentido noroeste, indo para o sentido sudoeste e depois se propagando para sudeste. Observou-se que CGEE de maior área apresentou quantidade de fontes de VHF e duração menores do que o CGEE de maior duração, que teve uma área menor do que 2500 km<sup>2</sup>, corroborando com os resultados obtidos na primeira parte do trabalho. Com relação aos valores de refletividade, o caso de maior duração apresentou valores maiores do que o CGEE de maior área, além de regiões com valores de refletividade maiores que 65 dBZ, indicando presença de granizo no sistema precipitante. O sentido de propagação, localidades e datas associados aos sistemas convectivos dos dois casos extremos sugerem que os casos fazem parte de uma mesma tempestade, porém para afirmar essa hipótese seria interessante realizar um estudo sobre o ambiente sinótico de ambos os CGEE. Sugere-se para trabalhos futuros, a realização dessas análises utilizando dados de outras redes de monitoramento, visando comparar, validar ou calibrar os dados. Além disso, seria interessante realizar as análises não realizadas somente para os CGEE para os relâmpagos não CGEE e por último, um possível estudo sobre as características dos sistemas sinóticos que contribuíram para a formação dos sistemas precipitantes que originaram os CGEE dos casos extremos, verificados por essa pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU, L. P., 2018. **Relâmpagos no Nordeste do Brasil: ocorrência, variabilidade espaço-temporal e relação com microfísica das nuvens**, 2018. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

AGUIAR, L. S. **Estudo da Relação da Qualidade do Ar e Variáveis Meteorológicas na Ocorrência de Morbidade Respiratória e Circulatória na Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.

AHRENS, C. D.; SAMSON, P. J. **Extreme weather and climate**. Cengage Learning, 2010.

ALBRECHT, R. I., 2008. **Eletrificação dos Sistemas Precipitantes na Região Amazônica: Processos físicos e dinâmicos do desenvolvimento de tempestades**. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo.

ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A.; IWABE, C. M. N.; SABA, M. F.; HÖLLER, H. Using Lightning Mapping Array to evaluate the lightning detection signatures at diferente Technologies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 2014. Oklahoma. **Anais...** Oklahoma, 2014.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2015. Lightning. **Glossary of Meteorology**.

AMORIM, W. C. M.; BARROS, M. T. L.; MASSAMBANI, O. Thunderstorm gusts nowcasting only through the reflectivity – Sao Paulo preliminary events, **preprints of the 29th Conference On Radar Meteorology**, pp. 94-97, 1999.

ANAYA, J. C. T., 2014. **Análise do Campo Elétrico Atmosférico Durante Tempo Bom e Distúrbios Geofísicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo

AZAMBUJA, R. R., 2017. **Estudo da atividade de relâmpagos na Região sul do brasil a partir de dados de Sistema de detecção**. Dissertação (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BALLAROTTI, M. G., 2007. **Estudo de Relâmpagos Nuvem-Solo Através de Câmera Rápida**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BALLAROTTI, M. G., 2015. **Redesenvolvimento do Líder Positivo no Relâmpago**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BAILEY, J. C.; CAREY, L. D.; GOODMAN, S. J.; RUDLOSKY, S. D.; ALBRECHT, R.; MORALES, C. A.; ANSELMO, E. M.; NEVES, J. R. São Paulo Lightning MappingArray (SP-LMA): Network assessment and analyses for intercomparison studies and GOES-R proxy activities. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 2014. Norman. **Anais...** Norman, 2014.

BIER, A. A, 2017. **Eventos Extremos Secos Sobre a Região Sudeste do Brasil Durante a Estação de Verão**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BROOKS, H. E.; DOSWELL, C. A., III; ZHANG, X.; CHERNOKULSKY, A. M. A.; TOCHIMOTO, E.; HANSTRUM, B.; NASCIMENTO, E. D. L.; SILLS, D. M. L.; ANTONESCU, B.; BARRETT, B. A. Century of Progress in Severe Convective Storm Research and Forecasting. **Meteorol. Monogr.**, v. 59, n. 18, p. 1-41, 2018.

BRUNING, E. C.; MACGORMAN, D. R. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 70, p. 4012-4029, 2013.

CARDOSO, I.; PINTO JR. O.; PINTO, I. R. C. A.; HOLLE, R. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135-136, p. 374-379, 2014.

CRIVELARO, M. B. 2010. **Uma análise do desempenho de métodos de classificação aplicados a imagens de descargas atmosféricas**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário da FEI.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. An overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.51, p.499-518, 2009.

DECARIA, A. J., K. E. PICKERING, G. L. STENCHIKOV, OTT, L. E. Lightning-generated NOX and its impact on tropospheric ozone production: A three-dimensional modeling study of a Stratosphere-Troposphere Experiment: Radiation, Aerosols and 41 Ozone (STERAO-A) thunderstorm, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A. Sobre a Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2019. Disponível em: < <https://emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: jun. de 2020.

ELSTER, J.; GEITEL, H. Bemerkungen über den electrischen Vorgang in den Gewitterwolken. **Annalen Der Physik**, v. 261, n. 25, p. 116-120, 1885.

ELSTER, J.; GEITEL, H. Über die Electricitätsentwicklung bei der Regenbildung. **Annalen Der Physik**, v. 261, n. 25, p. 121-131, 1885.

FONTÃO, P. A. D., 2018. **Variações do Ritmo Pluvial na Região Metropolitana de São Paulo: Reflexos no Armazenamento Hídrico e Impactos no Abastecimento Urbano**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1988.

GIMENEZ, D. F. S., 2017. **Análise da Precipitação Pluvial e Ocorrências de Desastres Naturais no Estado de São Paulo (1976 – 2012)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Campinas.

GIN, R. B. B., 1996. **Estudo das Características de Relâmpagos no Sudeste do Brasil no Verão de 1992-93**. Tese (Doutorado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

GOODMAN, S. J.; BLAKESLEE, R.; CHRISTIAN, H.; KOSHAK, W.; BAILEY, J.; HALL, J.; MCCAUL, E.; BUECHLER, D.; DARDEN, C.; BURKS, J.; BRADSHAW, T.; GATLIN, P. The North Alabama Lightning Mapping Array: Recent observations of severe storms and future prospects. **Atmos. Res.**, v. 76, p. 423 – 437, 2005.

HILL, J. D.; PILKEY, J.; UMAN, M. A.; JORDAN, D. M.; RISON, W.; KREBHIEL, P. R.; BIGGERSTAFF, M. I.; HYLAND, P.; BLAKESLEE, R. Correlated lightning mapping array and radar observations of the initial stages of three sequentially triggered Florida lightning discharges. **Geophys. Res. Lett.**, v. 118, p. 8460-8481, 2013.

LANG, T., PÉDEBOY, S., RISON, W., CERVENY, R., MONTANYÀ, J., CHAUZY, S., MACGORMAN, D. R.; HOLLE, R. L.; ÁVILA, E. E.; CARBIN, Y. Z. G.; MANSELL, E. R.; KULESHOV, Y.; PETERSON, T. C.; BRUNET, M.; DRIOUECH, F.; KRAHENBUHL, D. S. WMO world record lightning extremes: Longest reported flash distance and longest reported flash duration. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 6, p. 1153-1168, 2016.

LIMA, K.C.; GOMES, R.G. Detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos com dados do SIMEPAR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 5-16, 2009.

LÓPEZ, J. A.; PINEDA, N.; MONTAYÀ, J.; VELDE, O, V, D. V.; FABRÓ, F.; ROMERO, D. Spatio-temporal dimension of lightning flashes based on three-dimensional Lightning Mapping Array. **Atmospheric Research**, v. 197, p. 255-264, 2017.

LUDLAM, F. H. Cumulus and cumulonimbus convection. **Tellus**, v. 18, n. 4, p. 687-698, 1966.

LUND, N. R.; MACGORMAN, D. R.; SCHUUR, T. J.; BIGGERSTAFF, M. I.; RUST, W. D. Relationships between lightning location and polarimetric radar signatures in a small mesoscale convective system. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 12, p. 4151-4170, 2009.

LYONS, W. A.; BRUNING, E.C.; WARNER, T. A.; MACGORMAN, D. R.; EDGINGTON, S.; TILLIER, C.; MLYNARCZYK, J. *MegaFlashes: Just How Long Can a Lightning Discharge Get?* **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2020.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The Electrical Nature of Storms**. Oxford Univ. Press, New York, 1998.

MACHADO, L. A. T.; DIAS, M. A. F. S.; MORALES, C.; FISCH, G.; VILA, D.; ALBRECHT, R.; GODMAN, S. J.; CALHEIROS, A. J. P.; BISCARO, T.; KUMMEROW, C.; COHEN, J.; FITZJARRALD, D.; NASCIMENTO, E. L.; SAKAMOTO, M. S.; CUNNINGHAM, C.; CHABOUREAU, J. P.; PETERSEN, W. A.; ADAMS, D. K.; BALDINI, L.; ANGELIS, C. F.; SAPUCCI, L. F.; SALIO, P.; BARBOSA, H. M. J.; LANDULFO, E.; SOUZA, R. A. F.; BLAKESLEE, R.J.; BAILEY, J.; FREITAS, S.; LIMA, W. F. A.; TOK, A. The CHUVA project: How does convection vary across Brazil. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 95, n. 9, p. 1365–1380, 2014.

MAGINA, F. C., 2016. **Sistema de alerta de ocorrência de raios utilizando rede de sensores de campo elétrico atmosférico**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MARSHALL, J.S.; PALMER, W. The distribution of Raindrops with Size. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 5, n. 4, 1948.

MATTOS, E. V., 2009. **Relações das propriedades Físicas das nuvens Convectivas com as Descargas Elétricas**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

MATTOS, E. V., 2016. **Relações entre assinaturas Polarimétricas de radar e atividade Elétrica das tempestades**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

MECIKALSKI, R. M.; BAIN, A. L.; CAREY, L. D. Radar and Lightning Observations of Deep Moist Convection across Northern Alabama during DC3: 21 May 2012. **Mon. Weather Rev.**, v. 143, p. 2774-2794, 2015.

MONTANYÀ, J.; PINEDA, N.; SOULA, S.; MARCH, V. Total Lightning Activity and Electrostatic Field in a Hail-Bearing Thunderstorm in Catalonia. International Lightning Detection Conference, 19., 2006. Arizona. **Anais...** Arizona, 2006.

MONTANYÀ, J.; SOULA S.; PINEDA, N.; VELDE, O. V. D.; CLAPERS, P.; SOLÀ, G.; BECH, J.; ROMERO, D. Study of the total lightning activity in a hailstorm. **Atmospheric Research**, v. 91, p.430-437, 2009.

MONTANYÀ, J.; VAN DER VELDE, O.; SOLÀ, G.; FABRÓ, F.; ROMERO, D.; PINEDA, N.; ARGEMÍ, O. Lightning flash properties derived from Lightning Mapping Array data. In: International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014), v. 2, 2014, Shanghai. **Anais...** Shanghai, 2014. p. 974–978.

NACCARATO K. P., 2001. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

NACCARATO, K. P.; PINTO Jr., O. **Readme do Projeto CHUVA-Vale**: RINDAT\_README\_level\_1b. 2011.

ODA, P. S. S., 2019. **Características dos relâmpagos não CGEE no Brasil estimados pelo satélite goes-16**. Dissertação (Monografia de Graduação em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.7

OLIVEIRA, C., 2014. **Identificação e Correção da Banda Brilhante em Dados de Radar Meteorológico**, 2014. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

OPARIN, A. I. **The origin of life on the Earth**. New York: Academic Press Inc., 1957.

PAULUCCI, T. B., 2017. **Caracterização espaço-temporal de descargas atmosféricas e tempestades elétricas na região metropolitana do rio de janeiro entre 2001 e 2016**. Dissertação (Monografia de Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro- Rio de Janeiro.

PEREIRA, R. F.; ALBRECHT, R. Evolução temporal da precipitação e atividade elétrica de uma tempestade com ocorrência de tempo severo. **Ciência e Natura**, v.38, p. 532 – 542, 2016.

PETERSON, M. J., RUDLOSKEY, S., & DEIERLING, W. The evolution and structure of extreme optical lightning flashes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 24, p. 13.370-13.386, 2017.

PETERSON, M. J. Research Applications for the Geostationary Lightning Mapper (GLM) Operational Lightning Flash Data Product. **J. Geophys. Res. Atmos**, v.124, n.18, p. 10205-10231, 2019.

PETERSON, M. J.; LANG, T. J.; BRUNING, E. C.; ALBRECHT, R.; BLAKESLEE, R. J.; LYONS, W. A.; PÉDEBOY, S.; WILLIAM, R.; ZHANG, Y.; BRUNET, M.; CERVENY, R. S. New WMO Certified Megaflash Lightning Extremes for Flash Distance (709 km) and Duration (16.73 seconds) recorded from Space. **Geophys. Res. Atmos**, 2020.

PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A. **Relâmpagos**. INPE, São Paulo, SP, Ed. Brasiliense, 1996.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil** - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p.193, 2000.

PINTO JR., O.; CARDOSO, I. Brasil: que raio de história. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2015.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

REYNOLDS, S. E.; BROOK M.; GOURLEY, M. F. Thunderstorm charge separation. **Journal of Meteorology**, v. 14, p. 426-436, 1957.

RISON, W.; THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P. R.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. A GPS-based three- dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. **Geophysical Research Letters**, v. 26., p. 3573-3576, 1999.

ROCHA, P. F., 2019. **Análise de Metodologias de Determinação da Viabilidade de Implantação de Tecnologias, Técnicas e Práticas, Para Gerenciamento de Emissões de Material Particulado, na Região Metropolitana de São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SALDANHA, T. A., 2018. **Análise da Correlação de Desligamento de Linhas Aéreas de Transmissão por Descargas Atmosféricas.** Dissertação (Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANTOS, J. A. S., 2012. **Análise de Eventos de Precipitação Extrema na Costa Leste do Nordeste Brasileiro Utilizando Conexão de Imagens de Satélites e Radar Meteorológico.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.

SANTOS, A. P. P.; PINTO JR, O.; DE SOUZA, E. B.; AZAMBUJA, R.; SANTOS, S. R. Q. Variabilidade espaço-temporal e identificação de Eventos Extremos de Descargas Atmosféricas no Estado de São Paulo durante o Verão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 346-352, 2016.

SCHULTZ, C. J.; LANG, T. J.; BRUNING, E.C.; CALHOUN, K. M.; HARKEMA, S.; CURTIS, N. Characteristics of Lightning Within Electrified Snowfall Events Using Lightning Mapping Arrays, **J. Geophys. Res. Atmos**, v.123, n.4, p. 2347-2367, 2018.

SILVA, M. T. F., 2009. **Estudo das Descargas Elétricas Atmosféricas associadas a Sistemas Convectivos de Mesoescala para a região Sudeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Pelotas.

SILVA, L. A., 2014. **Comparação de Características Visíveis de Relâmpagos Nuvem-Solo Negativos para Diferentes Dias de Tempestade no Sudeste do Brasil, Observados por uma Rede de Câmeras de Alta Velocidade.** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SILVA, M. V. **Propriedades Físicas E Elétricas De Relâmpagos Estimadas Por Lightning Mapping Array**, 2018. 61f. Dissertação (Monografia de Graduação em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

STOLZENBURG, M; RUST, W. D.; MARSHALL, T. C. Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 14,097-14,108, 1998.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. 1a ed. Sand Diego, CA: Academic Press, 1987.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia. Versão digital 2**. Recife, Pernambuco, Brasil, 2006.

VONNEGUT, B. Possible mechanisms for the formation of thunderstorm electricity. **Proc. Conf. Atmos. Electr. Portsmouth**, n. 42., p. 169-181,1955.

WILLIAMS, E. R.; WEBER, M. E.; ORVILLE, E. E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 13213-13220, 1989.

WILLIAMS, E. R. The electrification of severe storms. In: DOSWELL III, C. A. **Severe Convective Storms**, Meteorological Monographs, Ed. Amer. Meteor. Soc., vol. 28, n. 50, Boston, Mass., 2001.

WILLIAMS, E. R.; MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Stroke multiplicity and horizontal scale of negative charge regions in the underclouds, **Geophys. Res. Lett.**, v.43, p.5460–5466, 2016.