



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

**PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE
RELÂMPAGOS ESTIMADAS POR *LIGHTNING
MAPPING ARRAY***

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Mateus Vitoriano da Silva

Itajubá, MG, Brasil

2018

PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS ESTIMADAS POR *LIGHTNING MAPPING ARRAY*

por

Mateus Vitoriano da Silva

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

2018

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

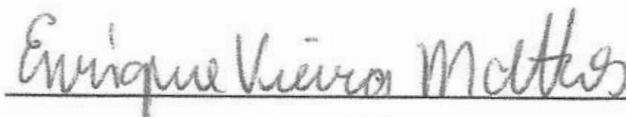
**PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS
ESTIMADAS POR *LIGHTNING MAPPING ARRAY***

elaborada por

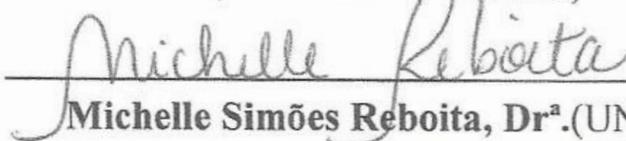
Mateus Vitoriano da Silva

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

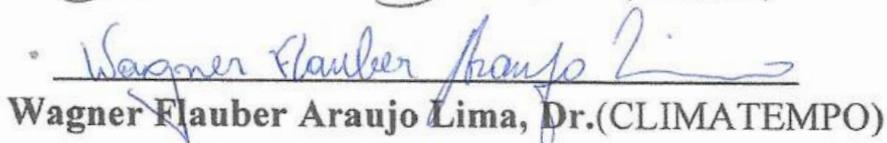
Comissão Examinadora:



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



Michelle Simões Reboita, Dr^a.(UNIFEI)



Wagner Flauber Araujo Lima, Dr.(CLIMATEMPO)

Itajubá, 30 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, saúde, sabedoria e acima de tudo pela permissão para que tudo isso pudesse ocorrer. Que ao longo de toda a vida nos mostra que decepções, frustrações e perdas as vezes fazem-se necessárias.

Aos meus amados pais, Nelson Vitoriano da Silva e Maria Goreti Venceslau da Silva, pelo apoio, carinho, sacrifício e amor incondicional. Meus irmãos Lucas Vitoriano da Silva e Marcos Vinicius Vitoriano da Silva, pelas aventuras e companheirismo. Somente vocês, pais e irmãos, têm conhecimento das minhas lutas diárias e noites sem dormir, saibam que essa vitória é de vocês também!

Ao meu orientador Dr. Enrique Vieira Mattos por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo das supervisões de minhas atividades na Universidade Federal de Itajubá. Você se mostrou um ótimo professor desde a nossa primeira aula, sobretudo, muito obrigado pela orientação deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que estiveram presentes durante toda a minha graduação, em especial a professora Dra. Michelle Simões Reboita, pelos conselhos e incansáveis incentivos. Vocês, sem dúvidas são os grandes responsáveis pela realização desta etapa na minha vida.

Agradeço também aos meus queridos amigos e colegas que se fizeram presentes nestes últimos anos, saibam que vocês nunca serão esquecidos. Meus singelos agradecimentos aos grandes amigos da graduação, Eduardo, Robson e Thales, vocês permitiram que eu não desistisse, peço que continuem presentes em minha vida.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte desta minha formação, o meu muitíssimo obrigado!

Dedico este trabalho, à memória de meu amigo e “irmão” Felipe Ferreira da Silva. Você fez tanto por mim ao longo da sua vida, onde quer que esteja, saiba que você faz muita falta.

“E quando a tempestade tiver passado, mal te lembrarás de ter conseguido atravessá-la, de ter conseguido sobreviver. Nem sequer terás a certeza de a tormenta ter realmente chegado ao fim. Mas uma coisa é certa. Quando saíres da tempestade já não serás a mesma pessoa. Só assim as tempestades fazem sentido.”

Haruki Murakami

RESUMO

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

PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DE RELÂMPAGOS ESTIMADAS POR *LIGHTNING MAPPING ARRAY*.

AUTOR: MATEUS VITORIANO DA SILVA
ORIENTADOR: Prof. Dr. ENRIQUE VIEIRA MATTOS
Local e Data da Defesa: Itajubá, 30 de novembro de 2018.

O presente estudo teve por objetivo principal analisar as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos e determinar possíveis relações com as propriedades das tempestades. A base de dados foi composta por medições de relâmpagos em duas e três dimensões, fornecidos pela rede LINET e SPLMA respectivamente, assim como, dados de refletividade provenientes do radar Banda-S de São Roque. Estas medições foram realizadas na Região Metropolitana de São Paulo e compreendem o mês de janeiro de 2012. A primeira etapa da pesquisa consistiu da avaliação das propriedades gerais dos relâmpagos. Posteriormente, foi realizada uma avaliação das diferenças entre as propriedades físicas e elétricas entre relâmpagos nuvem-solo negativos, positivos e relâmpagos intra-nuvem. Esta análise mostrou que os diversos tipos de relâmpagos podem possuir certas diferenças e semelhanças entre si, variando conforme a propriedade de interesse. Adicionalmente, foi avaliado com maior ênfase, os relâmpagos nuvem-solo negativos. Estes relâmpagos mostraram uma correlação positiva entre a duração com relação aos maiores comprimentos, multiplicidade e pico de corrente. Em seguida, avaliou-se em quais alturas os relâmpagos se iniciaram e dissiparam dentro das nuvens e foi observado um padrão semelhante entre os relâmpagos nuvem-solo positivos e relâmpagos intra-nuvem. Em relação a variável refletividade, o padrão observado sugere que os relâmpagos tendem a formar-se em regiões com refletividade de aproximadamente 15~20 dBZ. Por fim, a última etapa consistiu da análise das propriedades avaliadas ao longo desta pesquisa utilizando-se os percentis. Esta abordagem confirmou a hipótese de que os relâmpagos nuvem-solo positivos se formam em regiões mais estratiformes das nuvens, enquanto que os relâmpagos nuvem-solo negativos tendem a se formar em regiões mais convectivas. O processo de formação e dissipação dos relâmpagos ainda continua sendo desafiador e estimulante, porém estes resultados fomentam uma nova abordagem sobre o processo de eletrificação das nuvens e trouxeram resultados importantes para possíveis trabalhos futuros.

Palavras-chave: relâmpagos, mapeamento, tridimensional.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1 - Nuvem Cumulonimbus com estrutura elétrica tripolar. Contém o esquema de relâmpagos nuvem-solo positivo e negativo, bem como a distribuição de cargas no interior da nuvem. Fonte: adaptado de Krehbiel (1986)5
- Figura 2. 2 - Tipos de relâmpagos nas nuvens e no solo. a) relâmpagos NS e SN, ambos possuem cargas negativas; b) relâmpagos NS e SN, ambos com cargas positivas; c) relâmpagos IN e EN. Fonte: adaptado de <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>>7
- Figura 3. 1 - Região de estudo. A localização do radar está indicada pelo círculo preenchido na cor preta, os círculos tracejados indicam os raios de abrangência do radar a partir do ponto central de 60 e 120 km. Os marcadores no formato de estrela representam a localização dos sensores da rede LINET e os círculos vermelhos a localização dos sensores da rede SPLMA. A RMSP está centrada na imagem e destacada em tons de oliva12
- Figura 3. 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 km²14
- Figura 3. 3 - Exemplo da propagação das fontes de VHF de um relâmpago com 1834 fontes registrado no dia 13 de março de 2012 às 20:51 UTC. Os painéis representam: a) altura versus tempo, b) altura versus longitude, c) histograma de altitude das fontes de VHF, d) latitude versus longitude e e) latitude versus altitude15
- Figura 4. 1 - Distribuição da frequência relativa (%) da duração (s) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA18
- Figura 4. 2 - Distribuição da frequência relativa (%) da área (km²) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA19

Figura 4. 3 - Distribuição da frequência relativa (%) do comprimento (km) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA	20
Figura 4. 4 - Distribuição da frequência relativa (%) da multiplicidade dos relâmpagos detectados pela rede LINET. Sendo: a) multiplicidade dos relâmpagos NS negativos e b) multiplicidade dos relâmpagos NS positivos	22
Figura 4. 5 - Distribuição da frequência relativa (%) do pico de corrente (kA) dos relâmpagos detectados pela rede LINET	23
Figura 4. 6 - Histograma da frequência relativa (%) do número de fontes por relâmpago para relâmpagos: intra-nuvem (linha na cor preta), nuvem-solo negativo (linha na cor azul) e nuvem-solo positivo (linha na cor vermelha)	24
Figura 4. 7 - Gráfico de boxplot da distribuição da duração (s) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo	25
Figura 4. 8 - Gráfico de boxplot da distribuição da área (km ²) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo	26
Figura 4. 9 - Histograma da frequência relativa (%) da área dos relâmpagos (km ²) para relâmpagos: intra-nuvem (linha na cor preta), nuvem-solo negativo (linha na cor azul) e nuvem-solo positivo (linha na cor vermelha)	27
Figura 4. 10 - Gráfico de boxplot da distribuição do pico de corrente (kA) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo	28
Figura 4. 11 - Gráfico de boxplot do comprimento (km) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s	30
Figura 4. 12 - Gráfico de boxplot da multiplicidade dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s	31

Figura 4. 13 - Gráfico de boxplot do pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s	32
Figura 4. 14 - Gráfico de boxplot do pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de áreas: i) 0-10 km ² , ii) 10-33 km ² e iii) 33-520 km ²	33
Figura 4. 15 - Histograma da frequência relativa (%) da: a) altura inicial (km) e b) altura final (km) para relâmpagos: i) intra-nuvem, ii) nuvem-solo negativo e iii) nuvem-solo positivo	34
Figura 4. 16 - Histograma da frequência relativa (%) da: a) refletividade média (dBZ) e b) refletividade máxima (dbz) para relâmpagos: i) intra-nuvem, ii) nuvem-solo negativo e iii) nuvem-solo positivo	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Percentis de 10, 50 e 90% das propriedades físicas dos relâmpagos conforme o tipo e polaridade	37
Tabela 4.2 - Percentis de 10, 50 e 90% das propriedades elétricas dos relâmpagos e altura das fontes VHF conforme o tipo e polaridade	37
Tabela 4.3 - Percentis de 10, 50 e 90% da refletividade média e máxima (dBZ) dos relâmpagos conforme o tipo e polaridade	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AR	-	Relâmpagos no Ar
BrasilDAT	-	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
CAPPI	-	<i>Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
Cb	-	<i>Cumulonimbus</i>
Cfa	-	Clima Subtropical Úmido
CHUVA	-	<i>Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: a contribution to cloud resolving modeling and to the global precipitation measurement</i>
Cwa	-	Clima Subtropical
Cwb	-	Clima Temperado Marítimo Úmido
dBZ	-	Decibéis de Z
DCEA	-	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
cm	-	Centímetro
DR	-	Descarga de Retorno
DR's	-	Descargas de Retorno
ELF	-	Extremely Low Frequency
EMPLASA	-	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A
EN	-	Entre-Nuvens
GPM	-	<i>Global Precipitation Measurement</i>
Hz	-	Hertz
IN	-	Intra-Nuvem
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KHz	-	Quilohertz
km	-	Quilômetro
LF	-	<i>Low Frequency</i>
LINET	-	<i>Lightning Detection Network</i>
LPATS	-	<i>Lightning Positioning And Tracking System</i>
MHz	-	Megahertz
ms	-	Milissegundos
NASA	-	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOx	-	Óxido de Nitrogênio

NS	-	Nuvem-Solo
-NS	-	Nuvem-Solo negativo
+NS	-	Nuvem-Solo positivo
PIB	-	Produto Interno Bruto
PPI	-	<i>Plan Position Indicator</i>
PRF	-	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
RINDAT	-	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RMSP	-	Região Metropolitana de São Paulo
s	-	Segundo
SCM	-	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SN	-	Solo-Nuvem
SP	-	São Paulo
SPLMA	-	<i>São Paulo Lightning Mapping Array</i>
T _B	-	<i>Temperatura de brilho</i>
USP	-	Universidade de São Paulo
VHF	-	<i>Very Higher Frequency</i>
VLF	-	<i>Very Low Frequency</i>

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. TIPOS DE NUVENS E ESTRUTURA ELÉTRICA	3
2.2. TIPOS DE RELÂMPAGOS E REDES DE RELÂMPAGOS	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. DADOS.....	11
3.1.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	11
3.1.2. DADOS SPLMA.....	12
3.1.3. DADOS LINET.....	13
3.1.4. DADOS DO RADAR DE SÃO ROQUE	13
3.2. METODOLOGIA.....	13
3.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DOS RELÂMPAGOS	13
3.2.2. PROPRIEDADES DOS RELÂMPAGOS E AS ASSINATURAS DO RADAR.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DOS RELÂMPAGOS	17
4.1.1. PROPRIEDADES GERAIS DOS RELÂMPAGOS	17
4.1.2. PROPRIEDADES FÍSICAS EM FUNÇÃO DO TIPO DE RELÂMPAGO.....	23
4.1.3. PICO DE CORRENTE EM FUNÇÃO DO TIPO DE RELÂMPAGO.....	27
4.1.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS EM FUNÇÃO DA DURAÇÃO.....	29
4.2. RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DOS RELÂMPAGOS E AS ASSINATURAS DO RADAR.....	33
4.3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DOS RELÂMPAGOS ATRAVÉS DOS PERCENTIS	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6. REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

Os relâmpagos são importantes componentes para o tempo e clima. Para o tempo, podem provocar diversos transtornos e fatalidades. Por outro lado, o estudo deste fenômeno torna-se relevante também para o entendimento do clima, uma vez que os relâmpagos possuem papel vital na manutenção do circuito elétrico atmosférico global e na produção de Óxido de Nitrogênio (NO_x) (DECARIA et al., 2005; OTT et al., 2007; BRUNING e MACGORMAN, 2013; MECIKALSKI et al., 2015a). Estima-se que aproximadamente 1,4 bilhões de relâmpagos ocorram anualmente no globo (CECIL et al., 2014; ALBRECHT et al., 2016), sendo 60-75 milhões apenas no Brasil (PINTO e PINTO JR., 2003; PINTO et al., 2006, 2007), causando a morte de aproximadamente 132 pessoas todos os anos no país (CARDOSO et al., 2014). Como mencionado, os relâmpagos podem ser perigosos em razão da enorme quantidade de energia que é liberada, podendo gerar também inúmeros prejuízos à economia relacionados aos setores de telefonia e sistemas de transmissão de energia.

De maneira geral, os relâmpagos são fenômenos atmosféricos que possuem intensa corrente elétrica (com valores médios de aproximadamente 30 kA), com extensão de dezenas de quilômetros de comprimento e uma típica duração da ordem de poucos segundos (aproximadamente 0,5 s). Este fenômeno atmosférico é formado no interior das nuvens de tempestades através da colisão entre granizo e partículas de gelo na presença de água líquida super-resfriada na região conhecida como fase mista das nuvens (entre 0 e -40 °C) (REYNOLDS et al., 1957). A maior parte (90 %) dos relâmpagos ocorrem dentro das nuvens, e apenas uma pequena porcentagem atingem o solo (PINTO JR. e PINTO, 2000). Embora grande avanço científico tenha ocorrido nos estudos de relâmpagos, ainda se tem pouca compreensão sobre como são formados e posteriormente quais são as diferenças físicas e elétricas entre os relâmpagos que ocorrem no interior das nuvens e aqueles que atingem o solo.

As principais fontes de informações sobre os relâmpagos são fornecidas por redes de sensores instalados em superfície que capturam a energia emitida pelos relâmpagos. Dentre estas redes, as redes de mapeamento tridimensional dos relâmpagos, conhecidas como *Lightning Mapping Array* (LMA), permitem aos pesquisadores estudar propriedades físicas presentes na estrutura vertical e horizontal das descargas elétricas na atmosfera, compreendendo desde o ponto de

formação no interior da nuvem até o de dissipação do relâmpago. Por exemplo, Bruning e Macgorman (2013) utilizando dados de LMA propuseram que a área de um relâmpago poderia ser definida pela área do polígono que conecta as fontes mais externas pertencentes a um relâmpago, método definido como *Convex Hull* (Casco Convexo). Mecikalski et al. (2015a) aplicaram esta metodologia e observaram que relâmpagos maiores ocorrem quando a taxa de relâmpagos é menor e vice-versa. Este tipo de análise, têm possibilitado a comunidade científica um maior entendimento de como as particularidades físicas (área, comprimento e duração) podem estar associadas aos demais parâmetros elétricos (polaridade, multiplicidade e pico de corrente) e dinâmicos (cisalhamento vertical do vento) regidos nas tempestades, como sugerido pelo trabalho de Montanyà et al. (2014).

Embora estes estudos mostrem um importante avanço científico, ainda são ausentes estudos com uma grande quantidade de dados avaliando a relação entre as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos. Estas análises poderão revelar importantes indicadores a serem inseridos em modelos de previsão imediata de tempo e também a serem utilizados na assimilação de dados de parâmetros visando melhorar a previsão do tempo e do clima.

1.1. Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo caracterizar e avaliar as diferenças entre as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo, bem como entender suas relações com algumas propriedades das nuvens. Para tanto, serão utilizados os relâmpagos identificados pelas redes LMA e *Lightning Detection Network* (LINET), bem como os campos de refletividade do radar de São Roque. As medições foram realizadas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e o período analisado compreende o mês de janeiro de 2012.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar as relações entre as propriedades físicas (área, comprimento e duração) e elétricas (multiplicidade, pico de corrente e polaridade) dos relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo;
- b) Determinar como algumas das propriedades presentes nas tempestades impactam as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As condições presentes no planeta dos dias atuais é completamente diferente daquele quando as primeiras formas de vida surgiram. Porém, alguns pesquisadores acreditam ainda 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).

Conforme citado, estas teorias apontam que os relâmpagos também tiveram um importante papel na evolução química e biológica da vida humana. De fato, as condições meteorológicas e geológicas presentes neste período de tempo eram exorbitantemente diferentes das quais conhecemos hoje em dia, entretanto, ainda assim, os relâmpagos eram também formados no interior de nuvens de tempestades e conseqüentemente desempenhavam um importante papel na interação de energia terra-atmosfera. A seguir, será feita uma revisão dos conceitos teóricos básicos no qual tangem os estudos sobre os processos de eletrificação e ocorrência de relâmpagos nas nuvens.

2.1. Tipos de Nuvens e Estrutura Elétrica

A formação de nuvens é um processo que depende fundamentalmente da existência de umidade (vapor d'água), instabilidade (gradiente vertical de temperatura) e mecanismos forçantes (frentes, brisas, regiões montanhosas e etc.) (WALLACE e HOBBS, 2006). De modo geral, a formação de uma nuvem ocorre quando uma parcela de ar ascende na atmosfera (deslocando-se para um nível onde a pressão é menor). Este processo impõe uma diminuição da pressão e acarreta na expansão da parcela à medida que aquece e conseqüentemente realiza trabalho no ar sobre o ambiente.

Posteriormente a formação das nuvens, as mesmas podem ser classificadas conforme sua dimensão e altura de sua base em: i) baixas, ii) médias, iii) altas e iv) com desenvolvimento vertical (ABERCROMBY, 1887). Por exemplo, Ahrens (2009) utilizou dois critérios para definir a tipologia de nuvens, são eles: altura da base e extensão. No que se refere à altura da base, as nuvens podem ser subdivididas em baixas (< 2 km), médias (2 a 8 km) e altas (6 a 18 km), com relação a extensão das nuvens, estas podem ser fragmentadas nos tipos estratiformes (nuvens com maior desenvolvimento horizontal) ou convectivas (nuvens com maior desenvolvimento vertical).

Os processos microfísicos envolvendo a formação dos diferentes tipos de nuvens é distinto e complexo, de modo que, padrões como formato, dimensão, distribuição espacial, constituintes, estrutura elétrica e até mesmo a cor observada varia muito de nuvem para nuvem. Pinto Jr. e Pinto (2000) definiram as nuvens convectivas de tempestade como aquelas capazes de produzir significativo número de relâmpagos e trovões, nuvens estas conhecidas na literatura como *Cumulonimbus* (Cb). Entretanto, os autores enfatizam que nuvens do tipo *Cumulus Congestus*, *Stratocumulus*, *Altostratus*, *Nimbostratus*, tempestades de areia/neve e erupções vulcânicas também são capazes de produzir relâmpagos eventualmente.

A literatura apresenta que existem três mecanismos mais aceitos com relação aos métodos de eletrificação das nuvens, sendo: i) carregamento convectivo (Grenet, 1947; Vonnegut, 1953), ii) carregamento de precipitação indutivo (Mason, 1988) e iii) carregamento não indutivo, também conhecido como carregamento por colisão cristal-graupel (Reynolds et al., 1957; Takahashi, 1978; Kuettner et al., 1981; Jayaratne et al., 1983; Saunders et al., 1991). Conforme é observado, a literatura mostra uma maior variedade de trabalhos com base no carregamento colisão cristal-graupel no interior das tempestades. Para este caso, a formação dos relâmpagos dentro das nuvens está fortemente relacionado aos hidrometeoros (cristais de gelo, granizo, gotículas de água líquida super-resfriada e gotas de chuva) existentes no interior das tempestades. Este processo de eletrificação tem possibilitado a identificação de três tipos de estrutura de cargas elétricas no interior das nuvens: i) dipolar, ii) tripolar e iii) multipolar.

Os primeiros estudos caracterizando a estrutura elétrica das nuvens abordaram a classificação de dipolos positivos e negativos como sendo aqueles com presença de cargas positivas acima de negativas e cargas negativas sobre as positivas, respectivamente. Diversos trabalhos têm abordado este tipo de distribuição, entre eles, podemos citar Wormell (1930; 1939), Jacobson (1976), Krehbiel et al. (1979) e Krehbiel (1986). Posteriormente, estudos como os de Williams (1989), Takahashi (1996) e Williams (2001) constataram e sugeriram a existência de estruturas tripolares. Neste caso, geralmente a configuração de dois centros de cargas positivas bem definidos é observado sobre um centro de cargas negativas, conforme ilustrado na Figura 2.1.

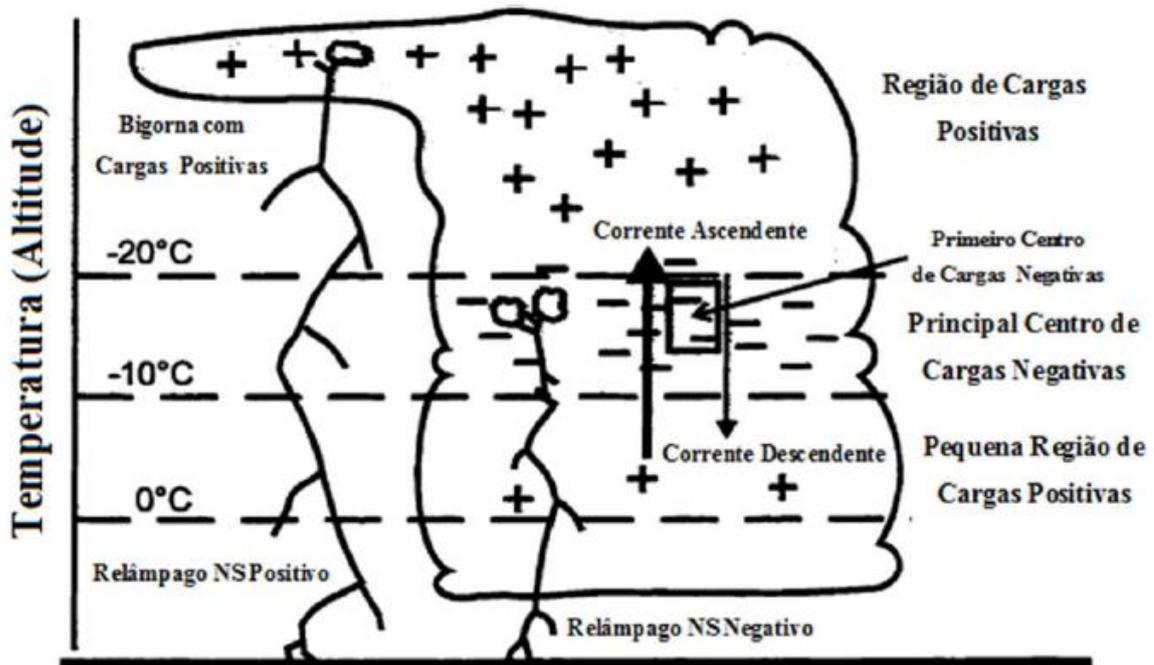


Figura 2. 1 - Nuvem Cumulonimbus com estrutura elétrica tripolar. Contém o esquema de relâmpagos nuvem-solo positivo e negativo, bem como a distribuição de cargas no interior da nuvem. Fonte: adaptado de Krehbiel (1986).

Em contrapartida, estruturas multipolares estão associadas aos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e super-células. Esta configuração de distribuição das cargas elétricas foi descrita primeiramente por Stolzenburg et al. (1998c). Estes pesquisadores analisaram diversas radiossondagens e verificaram que a polaridade destas tempestades poderia ser subdividida em dois modelos conforme as regiões de correntes ascendentes e descendentes. Neste caso, para regiões de correntes predominantemente ascendentes verificaram-se quatro camadas alternadas de cargas elétricas, enquanto que nas regiões de correntes descendentes seis camadas sobrepostas de cargas alternadas foram observadas.

Do ponto de vista de radares e satélites meteorológicos, Workman e Reynolds (1950) realizaram um dos primeiros estudos envolvendo características de tempestades. As análises visuais das tempestades e dos dados de radares mostraram que os primeiros relâmpagos ocorreram cerca de seis minutos posteriores aos primeiros relâmpagos Intra-Nuvem (IN). Goodman et al. (1988) por exemplo, verificaram uma maior taxa de relâmpagos associado a uma taxa negativa de temperatura de Brilho (T_B) no topo de nuvens frias. Usualmente, a estrutura elétrica

das tempestades vem sendo avaliada através da coleta de dados de balões estratosféricos e modelos de eletrificação de nuvens por exemplo. Como salientado anteriormente, os processos envolvidos na formação de nuvens e em particular a estrutura elétrica das tempestades é tema de muitas incertezas no meio científico, porém ainda assim, diversos trabalhos têm sugerido a existência destas estruturas verticais multipolares no interior das tempestades.

2.2. Tipos de Relâmpagos e Redes de Relâmpagos

Diversas terminologias são utilizadas ao referir-se aos relâmpagos em eletricidade atmosférica, portanto, torna-se importante defini-las. Neste âmbito, uma descarga elétrica é definida doravante como uma fonte de *Very Higher Frequency* (VHF) emitida por uma Descarga de Retorno (DR) ao se propagar na atmosfera. Em contrapartida, o termo descarga de retorno (*return stroke*, do inglês) refere-se à composição de várias fontes de VHF, desde o início até o término das Descargas de Retorno (DR's). Por fim, relâmpago (*flash*, do inglês) representa a composição de várias descargas de retorno. A quantidade de descargas de retorno por relâmpagos é denominada multiplicidade.

Os relâmpagos podem ser definidos como correntes elétricas intensas que ocorrem na atmosfera com típica duração de meio segundo e típica trajetória com comprimento de 5 a 10 km (PINTO Jr. e PINTO, 2000). É importante salientar ainda que a maioria dos relâmpagos ocorrem no interior de nuvens, entretanto existem também relâmpagos que atingem a superfície. Com base nisso, os relâmpagos podem ser separados fundamentalmente em dois grupos: relâmpagos nas nuvens e relâmpagos no solo (vide Figura 2.2).

Ogawa (1995) considerou que os relâmpagos nas nuvens podem ser subdivididos em outros três tipos, são eles: relâmpagos que ocorrem dentro da própria nuvem, também conhecidos como relâmpagos intra-nuvem (IN); relâmpagos que ocorrem entre duas ou mais nuvens, denominados entre-nuvens (EN) e por fim os que ocorrem de nuvens para a atmosfera, familiarizados como relâmpagos no ar (AR). Do mesmo modo, o grupo de relâmpagos no solo pode também ser subdividido em outros dois tipos: relâmpagos nuvem-solo (NS), aqueles formados em nuvens que se propagam em direção ao solo e de maneira oposta temos os relâmpagos solo-nuvem (SN), este último definido como evento relativamente raro, de modo a apresentar uma

maior quantidade de cargas sendo transportada do solo em direção a nuvem do que os relâmpagos NS negativos (PINTO Jr. e PINTO, 2000).

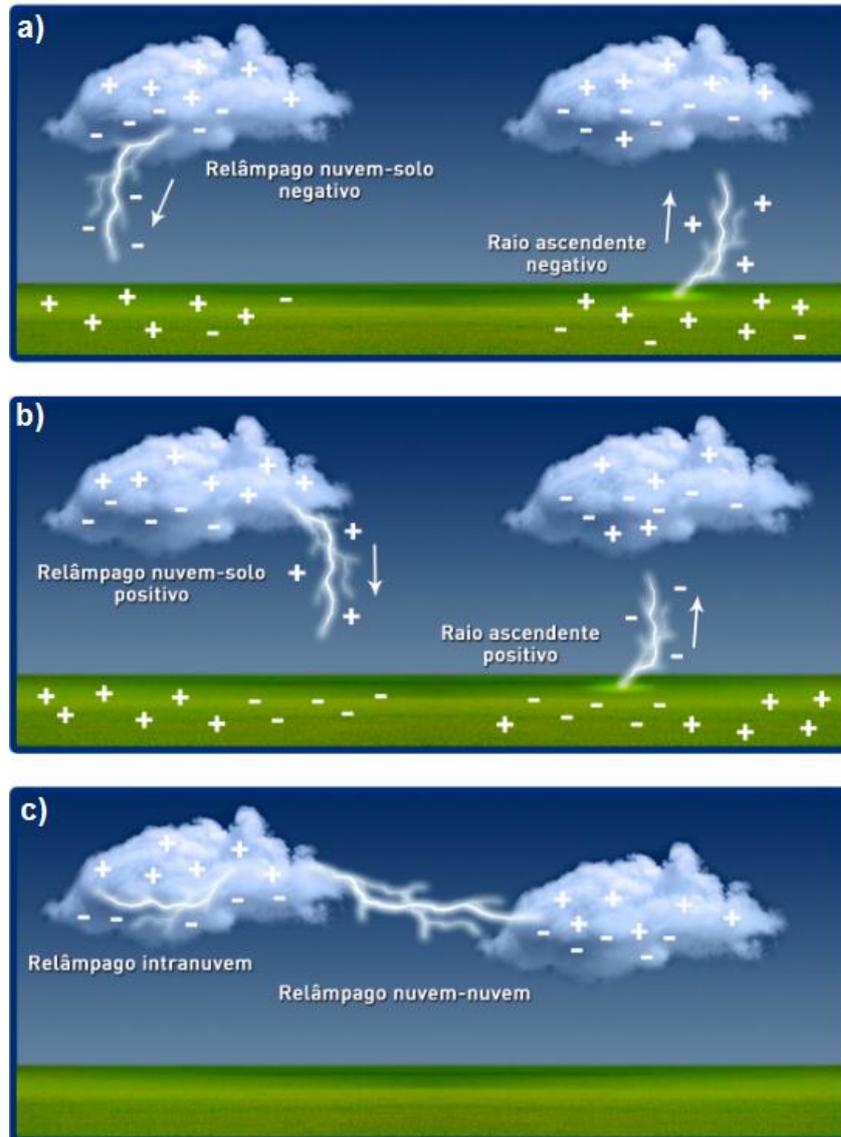


Figura 2. 2 - Tipos de relâmpagos nas nuvens e no solo. a) relâmpagos NS e SN, ambos possuem cargas negativas; b) relâmpagos NS e SN, ambos com cargas positivas; c) relâmpagos IN e EN. Fonte: adaptado de <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>>.

Os relâmpagos NS são também comumente conhecidos como raios. Podem ser classificados conforme o sinal da carga líquida (polaridade) conduzida para o solo, tais como relâmpagos positivos ou relâmpagos negativos (Figura 2.2a e 2.2b). Sobretudo, relâmpagos NS com cargas positivas transportam cargas positivas para o solo, assim como relâmpagos NS negativos transferem cargas negativas em direção ao solo. Pinto Jr. e Pinto (2000) por exemplo, detectaram em seu trabalho que cerca

de 90 % dos relâmpagos ocorridos apresentam o sinal de carga negativa e que, ambos relâmpagos positivos e negativos possuem duração de aproximadamente 0,25 s.

Como mencionado anteriormente, estudos sobre a polaridade dos relâmpagos tem aumentado ao longo dos últimos anos (RUST, 2005; VELDE, 2013; SARAIVA, 2010; SARAIVA et al., 2014; MONTANYÀ, 2014; MECIKALSKI et al., 2015a). Esta propriedade e característica dos relâmpagos, bem como pico de corrente, multiplicidade, duração, área, comprimento entre diversas outras, têm ilustrado bons resultados acerca do diagnóstico de eventos severos conforme trabalhos recentes demonstram (BRUNING e MACGORMAN, 2013; MONTANYA, 2014; MECIKALSKI et al., 2015a). As redes de monitoramento de relâmpagos possibilitam a coleta destas informações e exercem papel fundamental no entendimento acerca das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos.

As redes de relâmpagos capturam a radiação eletromagnética emitida por estas descargas ao se propagarem pela atmosfera. De maneira geral, os relâmpagos emitem radiação em um largo range de frequência do espectro eletromagnético, desde 1 KHz (*Extremely Low Frequency*, ELF) até 300 MHz. Atualmente redes com capacidade de mapear em duas e três dimensões o canal do relâmpago tem sido extensivamente utilizadas, como é o caso das redes LINET e LMA, respectivamente. Dentre outras, podemos citar a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) e a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT).

Redes como a LINET operam na faixa de frequência de *Very Low Frequency* (VLF, 3-30 KHz) e *Low Frequency* (LF, 30-300 KHz) e fornecem informações sobre a detecção de descargas de retorno IN e NS (BETZ et al., 2008). A rede LINET permite determinar características dos relâmpagos, tais como a multiplicidade, parâmetro este responsável por determinar quantas descargas de retorno pertencem à um único relâmpago. Williams et al. (2016) sugeriram que em tempestades com centros de cargas negativas compacto existe a predominância de relâmpagos com baixa multiplicidade devido à pouca carga existente no interior da tempestade para ser reposta no canal do relâmpago pré-ionizado.

Montanyà et al. (2014) utilizaram informações das redes LINET e LMA na Catalunha e documentaram que a maioria dos relâmpagos apresentam curta duração. Os resultados mostraram também que o tempo médio de duração destes relâmpagos segundo a LINET foi de 35 ms, enquanto que o relâmpago com maior duração

apresentou 1 s. Em contrapartida, o tempo mediano de vida dos relâmpagos identificados pelos dados da LMA foi de 0,4 s, com duração máxima de até 4,2 s. Os autores sugeriram que estas diferenças entre as duas redes se devem principalmente aos processos de detecção e eficiência envolvidas na captura dos relâmpagos.

Os sensores da rede LMA identificam as descargas elétricas através da energia eletromagnética observada e detectada em frequências maiores comparadas a rede LINET, intervalo este de frequências conhecido como VHF (30-300 MHz). Albrecht et al. (2014) por exemplo, agruparam as fontes de VHF de uma rede LMA durante uma campanha de campo na Região Metropolitana de São Paulo usando um intervalo temporal de 330 ms. Os autores verificaram que a maior frequência de ocorrência de durações foi de aproximadamente 0,42 s. Os resultados ainda mostraram que a maioria dos relâmpagos detectados possuem menos que 100 fontes de VHF, porém em alguns casos, relâmpagos apresentaram até mais de 1000 fontes. Vale ressaltar que o uso do termo “fontes”, também denominado na literatura como fontes VHF, descreve o número de emissões discretas e capturadas pelos sensores propriamente utilizados.

A predominância de correntes ascendentes e descendentes, mais fracas ou mais intensas, também é objeto de estudo por parte de cientistas que buscam estabelecer relações entre estas características e a distribuição física e elétrica das tempestades. Para tanto, alguns destes trabalhos tem demonstrado que a presença de correntes ascendentes possui forte conexão com a quantidade e comprimento dos relâmpagos observados. Para o caso de tempestades com fortes correntes ascendentes, os relâmpagos identificados dispõem de pequeno comprimento, porém uma maior taxa de eventos é observada neste período do ciclo de vida das tempestades. De maneira análoga, o oposto também é verificado em regiões mais distantes de fortes correntes ascendentes (BRUNING e MACGORMAN, 2013; MECIKALSKI et al., 2015a), como em regiões estratiformes das nuvens. Por exemplo, Mecikalski et al. (2015a) avaliaram a relação entre o comprimento dos relâmpagos e a distribuição de cargas no interior de nuvens. Os autores concluíram que o predomínio de relâmpagos maiores (isto é, predominantes em regiões com fraco movimento ascendente) estiveram associados a regiões dentro das tempestades com cargas positivas inferiores enfraquecidas combinadas a regiões de cargas positivas superiores mais fortes.

A combinação de informações sobre relâmpagos e radares podem trazer benefícios à sociedade como um todo, uma vez que a compreensão do comportamento dos elementos meteorológicos deve introduzir importantes informações para o enriquecimento das previsões de tempo acerca das descargas elétricas (JUNIOR, 2004). Embora grande avanço tenha sido possível com o desenvolvimento destas redes de relâmpagos, pouco ainda é conhecido sobre as relações entre comprimento, área e duração associadas as informações de pico de corrente, polaridade e multiplicidade dos relâmpagos. Esse entendimento tem potencial para mostrar quais parâmetros dos relâmpagos são mais importantes e podem ser possivelmente utilizados em modelos de previsão imediata de tempo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo sintetiza uma descrição dos dados e metodologias aplicadas durante a realização deste estudo.

3.1. Dados

3.1.1. Descrição da área de estudo

A área do presente estudo compreende a Região Metropolitana de São Paulo (Figura 3.1). A RMSP abriga cerca de 21,4 milhões de habitantes, sendo caracterizada como a região metropolitana mais populosa do Brasil segundo a Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (EMPLASA, 2017). Esta região é composta pelos municípios de Arujá, Barueri, Biritiba Mirim, Caieiras, Cajamar, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guararema, Guarulhos, Itapeçerica da Serra, Itapevi, Itaquaquecetuba, 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. A região possui desenvolvimento econômico elevado, o Produto Interno Bruto (PIB) é de aproximadamente R\$ 1.057 bilhões, representando cerca de 17,63 % do PIB nacional (EMPLASA, 2015).

Segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*, esta região contém clima dividido entre Clima Subtropical Úmido (Cfa), Clima Subtropical (Cwa) e Clima Temperado Marítimo Úmido (Cwb) (PEEL et al., 2007). Possui os maiores volumes pluviométricos na estação do verão e mínimos no inverno (REBOITA et al., 2012).

Os dados a serem utilizados neste trabalho compreendem o mês de janeiro de 2012. Estes dados são provenientes das redes de detecção de relâmpagos *São Paulo Lightning Mapper Array* (SPLMA) e LINET e os dados do Radar banda-S de São Roque. Os dados foram obtidos durante a campanha CHUVA-Vale que ocorreu entre novembro de 2011 e fevereiro de 2012 na cidade de São José dos Campos e regiões vizinhas. Esta campanha foi o quarto experimento realizado associado ao projeto *Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: a contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement)* (CHUVA, MACHADO et al., 2014) e teve como objetivo principal compreender como as nuvens evoluem para tempestades que produzem relâmpagos.

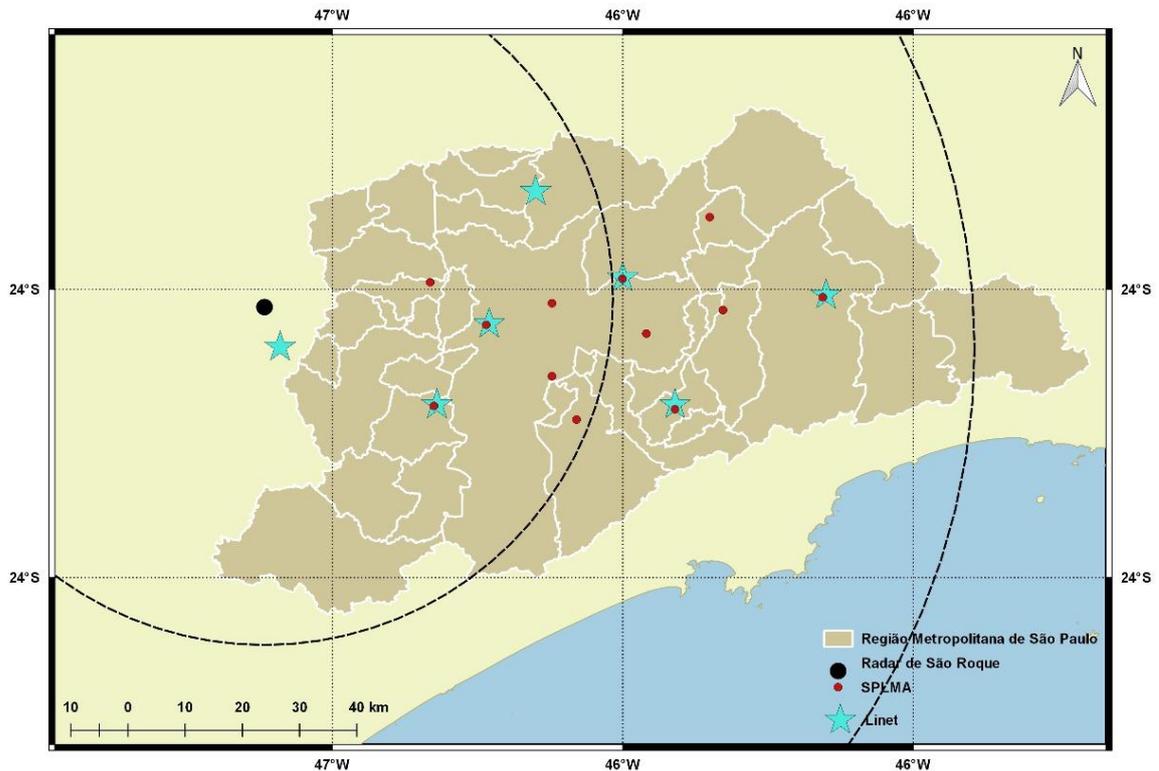


Figura 3. 1 - Região de estudo. A localização do radar está indicada pelo círculo preenchido na cor preta, os círculos tracejados indicam os raios de abrangência do radar a partir do ponto central de 60 e 120 km. Os marcadores no formato de estrela representam a localização dos sensores da rede LINET e os círculos vermelhos a localização dos sensores da rede SPLMA. A RMSP está centrada na imagem e destacada em tons de oliva.

3.1.2. Dados SPLMA

A rede SPLMA foi instalada na Região Metropolitana de São Paulo e esteve em operação entre o período de novembro de 2011 e março de 2012. Este sistema de detecção de relâmpagos foi desenvolvido pelo *New Mexico Institute of Mining and Technology* e instalado através de uma colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e possui a capacidade de detectar as fontes emitidas em VHF pelos relâmpagos ao se propagarem na atmosfera. Estes sensores identificam as emissões de radiação emitida por relâmpagos na faixa de 30-300 MHz e são capazes de mapear a propagação do canal principal do relâmpago em três dimensões tipicamente até 150 km de distância (RISON et al., 1999). A rede foi composta por 12 sensores que foram instalados ao longo da RMSP (Figura 3.1, pontos na cor vermelha). Como descrito por Bailey et al. (2014), as redes LMA operam

conforme os canais de TV 8 e 10 com frequência de 180-186 MHz e 192-198 MHz, respectivamente. Este banco de dados é denominado de *Level 2* e contém as fontes agrupadas em relâmpagos. Assim sendo, as informações mais importantes contidas nestes arquivos de dados são: data, horário, latitude, longitude e altitude das fontes de VHF dos relâmpagos.

3.1.3. Dados LINET

A rede de relâmpagos LINET é capaz de detectar descargas de retorno intra-nuvem e nuvem-solo (BETZ et al., 2008). Diferentemente da LMA, a detecção de relâmpagos realizada pela LINET se dá em duas dimensões. Estes sensores operam em *Very Low Frequency* e *Low Frequency*, frequências estas, variando de 3-30 KHz e 30-300 KHz, respectivamente. No total 7 destes sensores foram instalados, compreendendo a RMSP e municípios vizinhos (Figura 3.1, estrelas na cor azul). As informações importantes para este estudo e presentes nos dados da rede LINET são: data, horário, latitude, longitude, altitude, tipo de relâmpago (IN ou NS) e pico de corrente.

3.1.4. Dados do Radar de São Roque

Dados no formato *Plan Position Indicator* (PPI) de refletividade do radar de São Roque foram utilizados para estimar as propriedades físicas dos sistemas precipitantes. Este é um radar Banda-S (10 cm de comprimento de onda) instalado no município de São Roque (SP) a 1147 m de altitude e pertencente ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA). A distância máxima de atuação do radar é de 240 km e durante a campanha CHUVA-Vale esteve operando com uma resolução temporal de 15 min. Este radar possui uma largura do feixe de 2° e operou com uma máxima *Pulse Repetition Frequency* (PRF) de 1200 Hz. Assim sendo, a variável de interesse neste conjunto de dados corresponde aos campos de refletividade do radar referente ao mês de janeiro de 2012.

3.2. Metodologia

3.2.1. Propriedades Físicas e Elétricas dos Relâmpagos

Esta etapa teve o objetivo de identificar as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos. Neste intuito, o primeiro passo consistiu na seleção dos relâmpagos que possuem mais de 10 fontes de VHF. A aplicação deste critério é bastante consolidado

na literatura (WIENS et al., 2005; MURPHY, 2006; SCHULTZ et al., 2009; GATLIN e GOODMAN, 2010; ALBRECHT et al., 2015; MECIKALSKI et al., 2015) e visa eliminar ruídos dos dados da SPLMA, representado tipicamente por relâmpagos que possuem poucas fontes de VHF. Após esta pré-seleção dos relâmpagos, avaliou-se a relação entre as propriedades físicas dos relâmpagos (duração, área e comprimento) e as propriedades elétricas (como pico de corrente, polaridade e multiplicidade). Para tanto foi calculado a área (em km²) dos relâmpagos, que consiste basicamente na utilização das fontes de VHF mais externas dos relâmpagos, conforme ilustrado na Figura 3.2. Esta metodologia é definida na literatura como *Convex Hull* (casco convexo) e foi proposta pelos autores Bruning e Macgorman (2013). Recentemente, estes mesmos procedimentos foram empregados por Mecikalski et al. (2015a) em um estudo diagnóstico sobre tempestades localizadas no norte do Alabama.

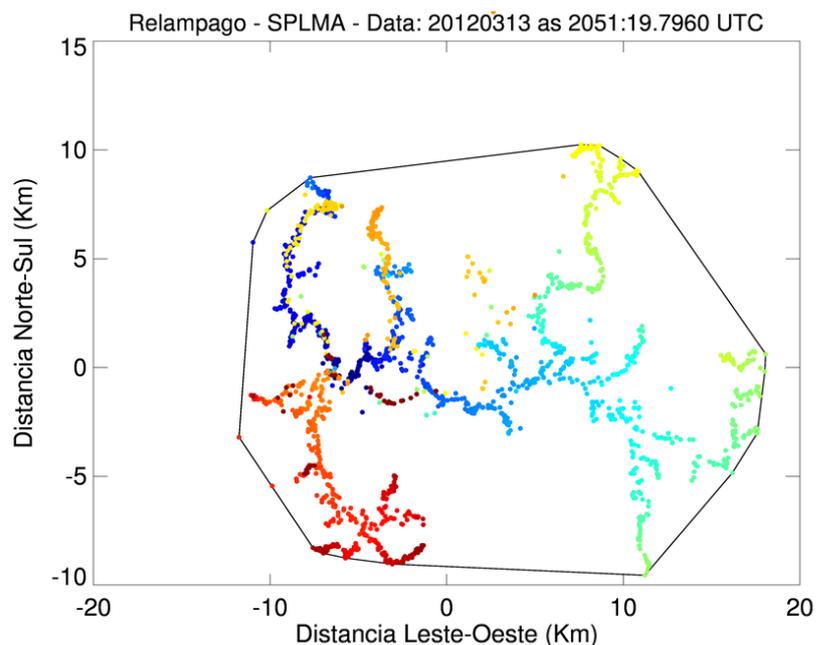


Figura 3. 2 - Exemplo da determinação da área de um relâmpago através do método *Convex Hull* (casco convexo) que ocorreu no dia 13 de março de 2012 às 20:51 UTC. A área calculada foi de 436,14 km².

A segunda etapa esteve focada no cálculo do comprimento (em km) dos relâmpagos. Para tanto, foi calculado a distância euclidiana entre as fontes consecutivas de um mesmo relâmpago e depois determinado a distância total. O próximo passo constitui-se na determinação da duração dos relâmpagos. Neste âmbito considera-se a definição de duração de um relâmpago como a diferença entre

o momento da última fonte de VHF registrada e o instante da fonte inicial do relâmpago. O tempo de vida de um relâmpago ocorrido no dia 13 de março de 2012 pode ser observado na Figura 3.3a, neste caso o relâmpago durou aproximadamente 1 s.

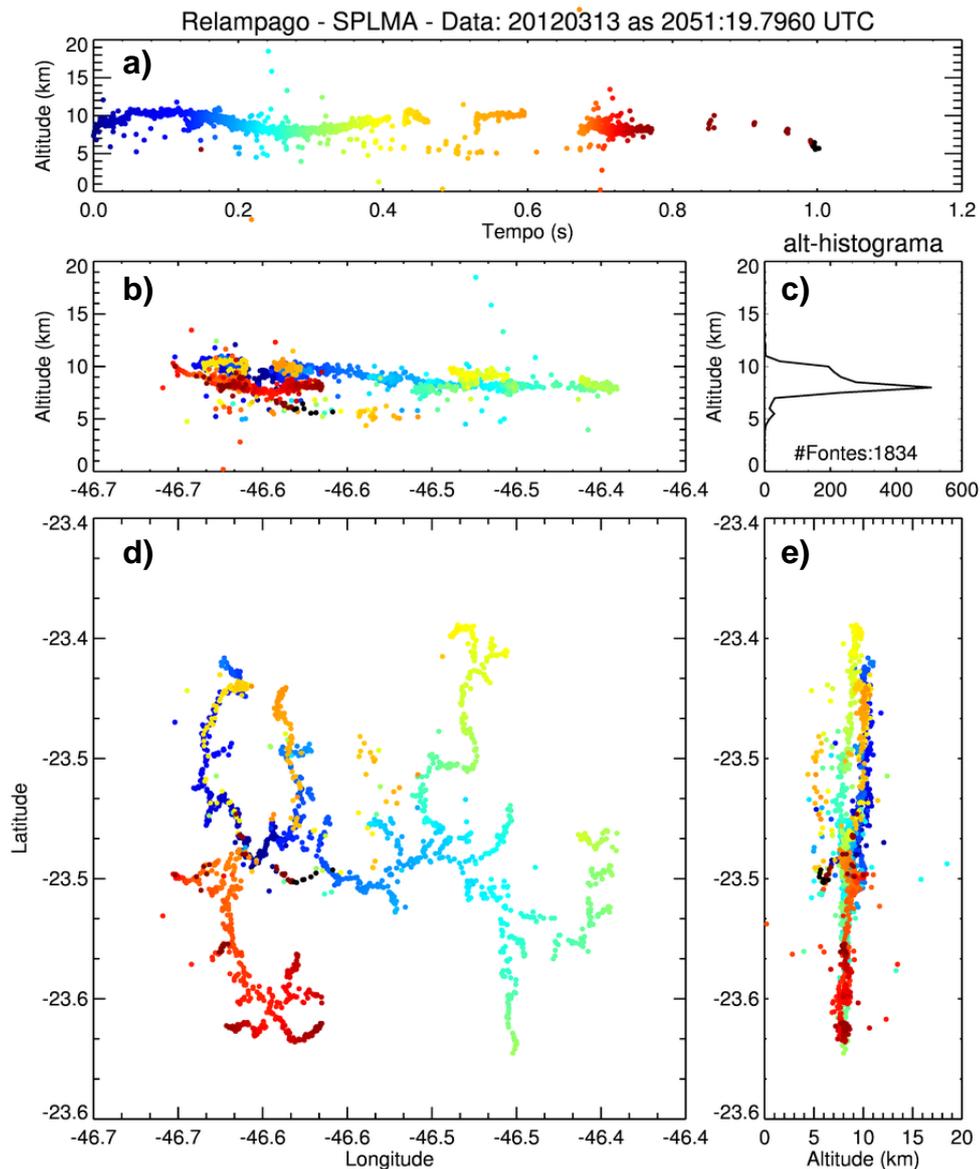


Figura 3.3 - Exemplo da propagação das fontes de VHF de um relâmpago com 1834 fontes registrado no dia 13 de março de 2012 às 20:51 UTC. Os painéis representam: a) altura versus tempo, b) altura versus longitude, c) histograma de altitude das fontes de VHF, d) latitude versus longitude e e) latitude versus altitude.

Na próxima etapa realizou-se a combinação dos dados de relâmpagos da rede SPLMA com os relâmpagos detectados pela rede LINET. Primeiramente os dados de descarga de retorno da LINET foram agrupados em relâmpagos. Este agrupamento

foi baseado na metodologia descrita por Albrecht et al. (2014) e Albrecht et al. (2016). Esta metodologia considera que descargas de retorno de um mesmo relâmpago precisam obedecer a um critério temporal de 0,330 s. O número de descargas de retorno de um relâmpago, representa a multiplicidade.

Posteriormente, para cada relâmpago da SPLMA foi identificado o respectivo relâmpago identificado pela LINET, assim como sua multiplicidade, pico de corrente e polaridade. A partir deste banco de dados formado com as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos foi possível associar os relâmpagos detectados em ambas as redes de monitoramento. Os relâmpagos então foram divididos em i) relâmpagos NS negativo, ii) relâmpagos NS positivo e iii) relâmpagos IN e analisados conforme algumas análises estatísticas em função do comprimento, área, duração, pico de corrente e multiplicidade para cada um destes três grupos de relâmpagos.

3.2.2. Propriedades dos Relâmpagos e as Assinaturas do Radar

A etapa final deste trabalho foi composta da análise entre as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos e as características observadas nas imagens do radar de São Roque. O objetivo desta etapa visou avaliar os padrões identificados nas imagens de radar associados a formação dos relâmpagos, ou seja, objetivou-se compreender as relações entre o local de iniciação e dissipação com os valores de refletividade. Para esta análise, primeiramente os dados do radar, dispostos inicialmente em coordenadas polares no formato PPI foram transformados para coordenadas cartesianas. Desta forma, foram produzidos *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) com resolução espacial horizontal e vertical de 1 km, totalizando 13 níveis de altura entre 3 e 15 km de altura.

Os dados de refletividade foram associados temporalmente e espacialmente aos dados de relâmpagos e avaliados em termos dos valores de refletividade para os momentos de iniciação e dissipação dos relâmpagos. Para tanto, a metodologia aplicada consistiu em encontrar os pixels do radar mais próximos, isto é, temporalmente e espacialmente ao local da primeira fonte do relâmpago. O critério espacial considerou um raio de rastreamento de 2 km ao redor da localização da fonte para identificar os pixels do radar. Estas análises foram realizadas separadamente para os relâmpagos IN, NS negativos e NS positivos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades Físicas e Elétricas dos Relâmpagos

Nesta seção serão apresentadas as características verificadas das análises das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos referentes ao mês de janeiro de 2012 da campanha CHUVA-Vale.

4.1.1. Propriedades Gerais dos Relâmpagos

A primeira propriedade analisada neste estudo, trata-se da duração dos relâmpagos. Nesta etapa foram analisados 91.732 relâmpagos. A Figura 4.1 mostra a distribuição da duração de todos os relâmpagos, isto é, relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo. Esta análise apresenta um típico comportamento de uma distribuição gaussiana. Este tipo de distribuição é bastante recorrente em diversos tipos de fenômenos naturais.

Conforme elucidado, a delimitação do tempo de vida dos relâmpagos através do mapa de frequência relativa, mostra que o pico de ocorrência dos relâmpagos analisados, tem duração de aproximadamente 0,25 s (Figura 4.1). A duração média encontrada para este estudo foi de 0,351 s, valor coerente ao encontrado por Albrecht et al. (2014) para esta mesma região, que foi de aproximadamente 0,42 s. Importante ressaltar que, o diagnóstico do valor médio leva em conta o tempo de vida dos relâmpagos com menores e maiores durações, como por exemplo os valores mínimos e máximos encontrados, de 0,001 e 2,734 s, respectivamente.

A mediana encontrada para o conjunto de dados foi de aproximadamente 0,308 s. Em um trabalho similar a este para a região do norte da Espanha, Montanyà et al. (2014) verificou um valor mediano de aproximadamente 0,4 s. Embora os autores tenham trabalhado com uma amostra de dados bastante menor comparada a deste estudo, o relâmpago mais duradouro encontrado por eles teve duração de aproximadamente 4,2 s, tempo de vida este, bastante superior ao máximo encontrado para este estudo (2,7 s). Estas diferenças podem estar associadas as diferenças na eficiência de detecção das redes e nas diferenças entre as tempestades analisadas em ambos estudos.

De maneira geral, observa-se que o tempo de vida dos relâmpagos varia bastante. Ainda assim, nota-se que a ocorrência deste fenômeno no interior das nuvens ocorre em curtíssimas durações de segundos ao se propagar na atmosfera.

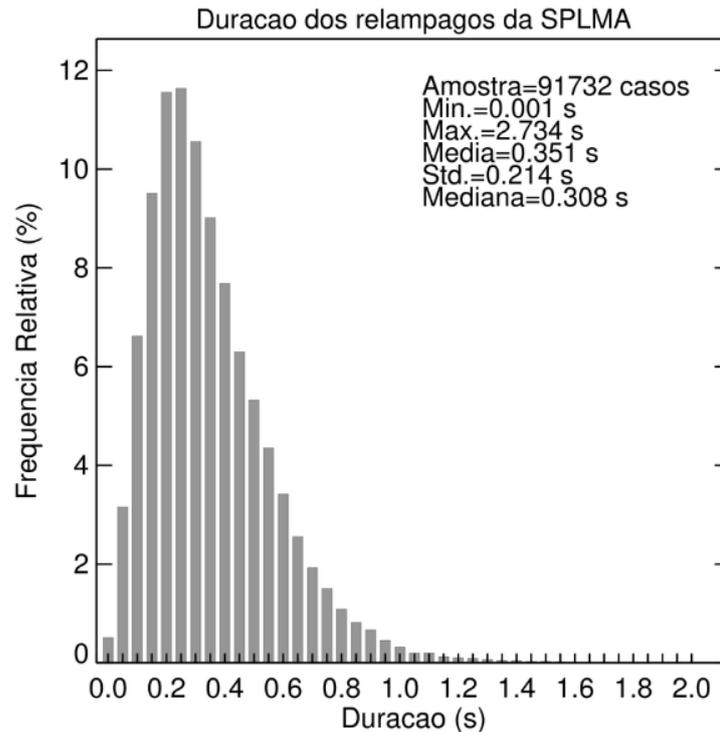


Figura 4. 1 – Distribuição da frequência relativa (%) da duração (s) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA.

A próxima etapa avaliada neste trabalho, trata-se da caracterização da área dos relâmpagos. A Figura 4.2 mostra que as maiores ocorrências (25 %) estão associadas a relâmpagos que possuem área de aproximadamente 20 km². O desvio padrão alto encontrado (± 122 km²), indica que a área de um relâmpago pode variar bastante. De fato, nesta análise levamos em consideração os relâmpagos IN, NS positivos e negativos, o que poderia ser esperado, visto que este tipo de propriedade supostamente varia de acordo com o tipo de relâmpago.

A maior área encontrada dentre todos os casos estudados foi de 4861,04 km². Em contrapartida, o relâmpago com menor área, cobriu uma área de 0,03 km². Mecikalski et al., (2015) também demonstraram que as áreas dos relâmpagos podem possuir grandes variações. Eles verificaram que em um intervalo de quase 2 horas, as áreas dos relâmpagos variaram desde 50 km² até cerca de 1000 km².

Os valores médio e mediano das áreas calculadas foram 55,50 e 20,59 km², respectivamente (Figura 4.2). Beltran (2017), por exemplo, encontrou uma área média de 17 km² utilizando todo o período de dados da Campanha CHUVA-Vale (incluindo dados referentes aos meses de novembro de 2011 a março de 2012). Do mesmo modo, o autor obteve uma mediana de 6 km² utilizando este conjunto de dados. Essa

diferença deve-se ao período de dados analisados e também a metodologia utilizada no cômputo das áreas para ambos os trabalhos. Embora os resultados mostrem que a grande parte dos relâmpagos possuem áreas pequenas, observa-se que as áreas entre os relâmpagos podem variar bastante. Este resultado está diretamente ligado com o local de formação dos relâmpagos no interior das nuvens, conforme será discutido mais adiante.

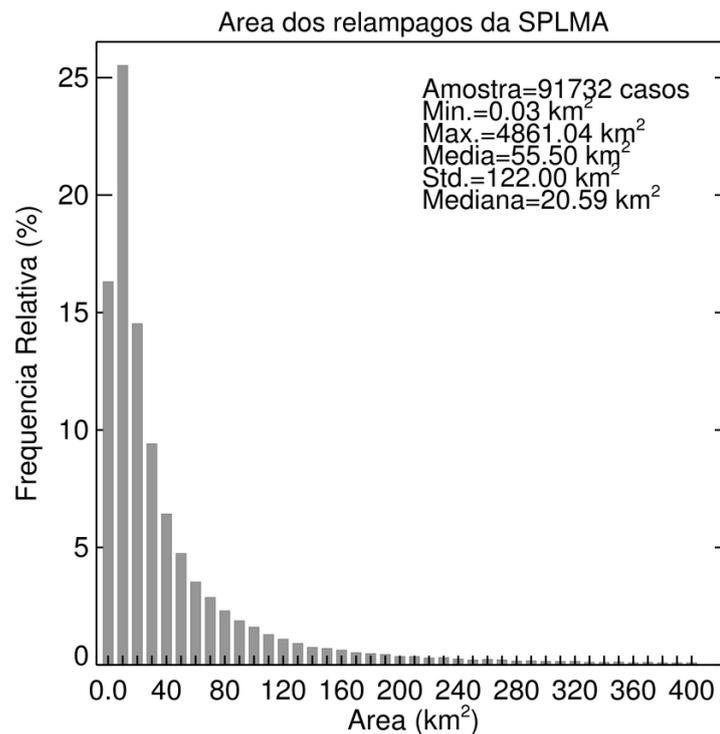


Figura 4. 2 - Distribuição da frequência relativa (%) da área (km²) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA.

Assim como reportado anteriormente para a área, o comprimento dos relâmpagos também variou bastante. Uma breve análise da Figura 4.3, nos permite observar que o desvio padrão de $\pm 696,33$ km fortalece a ideia de que cada relâmpago possui realmente um comportamento aleatório, a respeito desta propriedade física. Dentre todos os casos estudados, o menor comprimento encontrado foi de aproximadamente 1,64 km, por outro lado, o maior relâmpago avaliado teve um comprimento de aproximadamente 23.393,19 km. A frequência relativa verificada dentre os relâmpagos, mostra que a maior parte dos relâmpagos, isto é, cerca de 18 %, possuem extensão de ~25 km de comprimento.

Como verificado, alguns casos particulares tiveram grande extensão observada. Estes valores influenciam diretamente o alto valor médio encontrado, algo em torno de 273 km. Montanyà et al. (2014) por exemplo, identificou através de uma metodologia diferente um comprimento médio de 20 km. Entretanto, o comprimento mais frequente observado em seu trabalho (~15 km) possui certa similaridade com o observado para este estudo. Importante salientar que o comprimento neste estudo representa o comprimento total do relâmpago, isto é, inclui o comprimento do ramo principal e as ramificações secundárias de um relâmpago.

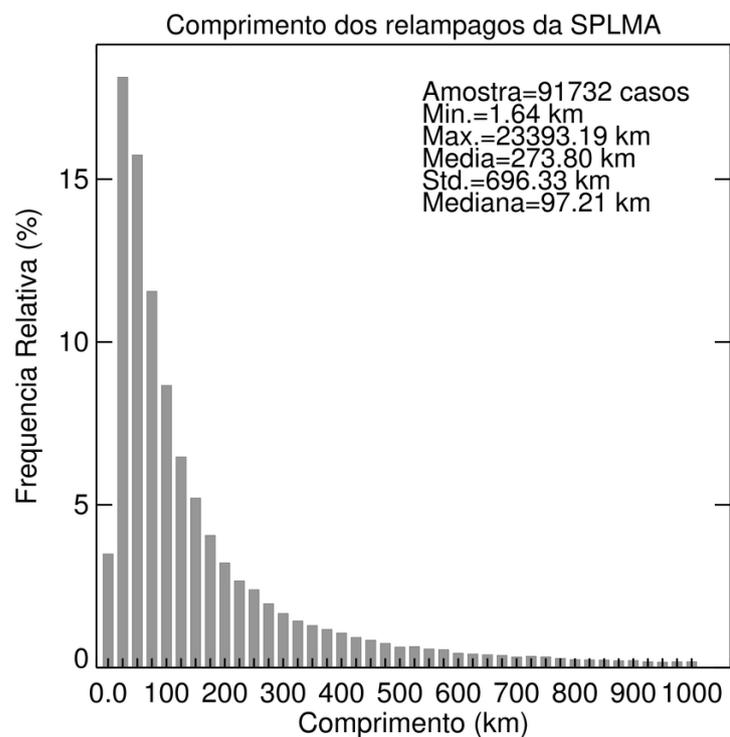


Figura 4.3 - Distribuição da frequência relativa (%) do comprimento (km) dos relâmpagos detectados pela rede SPLMA.

Os relâmpagos possuem uma propriedade importante que é a multiplicidade. Os valores da multiplicidade podem indicar em quanto passos de tempos são depositados cargas elétricas na superfície. Via de regra estas análises são tradicionalmente realizadas para relâmpagos nuvem-solo, divididos naqueles positivos e negativos. A Figura 4.4 mostra a distribuição de multiplicidade para os relâmpagos nuvem-solo negativos (a) e positivos (b).

Os resultados mostram que em média, ocorrem aproximadamente 5 descargas de retorno por relâmpago para ambas polaridades, porém suavemente maior para

relâmpagos nuvem-solo negativos (5,27 versus 4,89). O número de DR's mediano encontrado foi 4, este valor mostra com mais eficiência o valor médio de DR's, uma vez que este tipo de análise não é tão distorcido pelos valores extremos. Neste quesito, a menor multiplicidade encontrada para os relâmpagos NS positivos dentre toda a amostra de dados foi de 1 DR, enquanto que a maior 31 DR's. A Figura 4.4 também mostra que a maior frequência relativa observada foi de 1 DR, com cerca de 19 % dos casos em análise.

Os resultados mostram que as DR's dos relâmpagos NS negativos possuem certas semelhanças com relação as DR's dos NS positivos. Como podemos verificar na Figura 4.4, as estatísticas aplicadas revelaram não haver muita diferença entre os valores médios, medianos, desvios padrões, mínimos e máximos das amostras. Ressalta-se que, os valores médios, máximo e desvio padrão encontrados para os relâmpagos NS negativos tem maior magnitude comparados aos relâmpagos NS positivos. Pinto et al. (1999) também analisaram a multiplicidade dos relâmpagos através de sensores *Lightning Positioning And Tracking System* (LPATS) para a região Sudeste do Brasil, nesta ocasião, os autores também encontraram uma maior média de multiplicidade dentre os relâmpagos NS negativos (2,9) comparados aos NS positivos (2,2). Estes resultados possuem bastante semelhanças ao número médio de DR's encontrados para os relâmpagos NS negativos pelos autores Kitagawa et al. (1962), Miranda (2000) e Saba et al. (2004).

A Figura 4.4 também evidencia uma maior detecção de DR's dentre os relâmpagos NS positivos (18.053 casos) confrontados aos NS negativos (17.200 casos). Este resultado possui certa divergência aos obtidos por Mattos (2015), em seu trabalho, o autor observou uma maior predominância de relâmpagos negativos comparados aos relâmpagos de polaridade positiva. Essa diferença deve-se a metodologia da seleção de dados de multiplicidade empregada nestes estudos. Especificamente para este trabalho, a combinação entre ambos os relâmpagos detectados pelas redes LINET e LMA pode ter modificado esta proporcionalidade entre relâmpagos negativos e positivos.

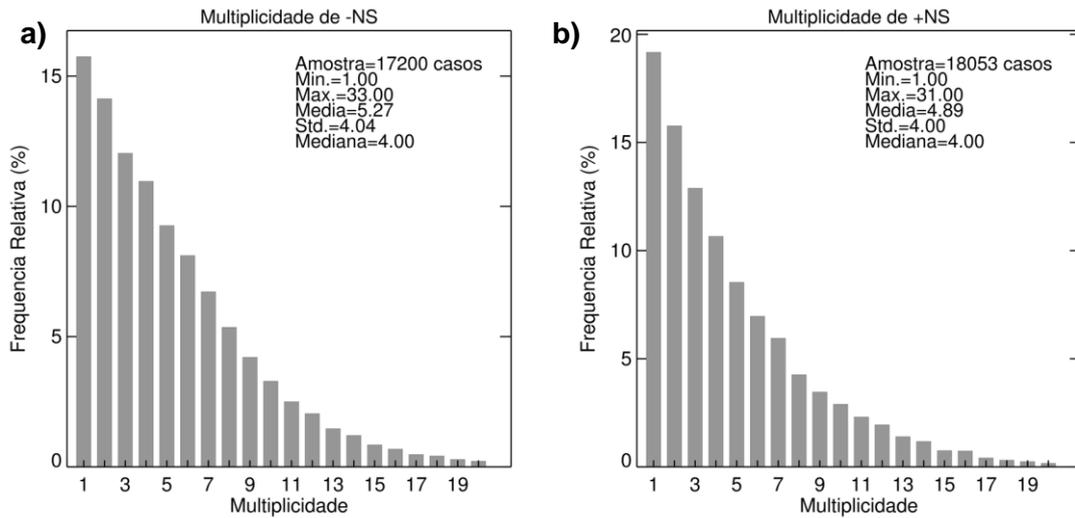


Figura 4. 4 – Distribuição da frequência relativa (%) da multiplicidade dos relâmpagos detectados pela rede LINET. Sendo: a) multiplicidade dos relâmpagos NS negativos e b) multiplicidade dos relâmpagos NS positivos.

Os relâmpagos podem ser classificados também em função da intensidade do pico de corrente ao se propagarem na atmosfera. Valores negativos (positivos) representam o transporte de cargas negativas (positivas) para a superfície e estão associados aos relâmpagos nuvem-solo negativos (positivos). A Figura 4.5 apresenta a distribuição do pico de corrente (kA) dos relâmpagos sendo estudados. A análise do comportamento desta propriedade verificada na Figura 4.5, revela uma maior frequência de ocorrência para intensidade de aproximadamente +/- 5 kA, isto é, para os relâmpagos NS positivos e negativos. É observado também uma maior distribuição dessa variável dentre os relâmpagos NS negativos (gráfico a esquerda do eixo zero) quando comparados aos NS positivos (gráfico a direita do eixo zero). O pico de corrente máximo observado para os relâmpagos NS positivos foi de 133,50 kA, enquanto que o mínimo 0,50 kA. Fisicamente, estes resultados mostram que os relâmpagos NS negativos possuem maiores intensidades de cargas quando comparados aos NS positivos, resultado este, bastante discorrido na literatura, conforme Mattos (2015), por exemplo. Isto pode ser explicado conforme o local da formação dos respectivos relâmpagos, ou seja, regiões com maior densidade de cargas, presentes no interior destas tempestades, podem conter indicativos de possíveis relâmpagos com maior intensidade na descarga de retorno.

Como citado, o arranjo dos dados referentes aos relâmpagos NS negativos apresenta uma maior disposição das cargas dentre os dados (Figura 4.5). A maior

magnitude negativa observada foi de -143,90 kA, ao mesmo tempo que, a menor conferida foi -0,50 kA. Em seu estudo, Willett et al. (1998) verificaram que os relâmpagos ocorridos sobre o mar, apresentaram um valor médio para o pico de corrente de relâmpagos negativos igual a -29 kA, com desvio padrão de ± 15 kA. Por outro lado, Mattos (2015) verificou que a maioria dos relâmpagos analisados possuem um pico de corrente de $-10,90 \pm 5,8$ kA. As diferenças entre os valores encontrados por este estudo e os anteriores deve-se em parte, a utilização de diferentes redes de detecção de relâmpagos e também a microfísica dos relâmpagos envolvendo os diferentes tipos de aerossóis presentes sobre estas áreas de estudo.

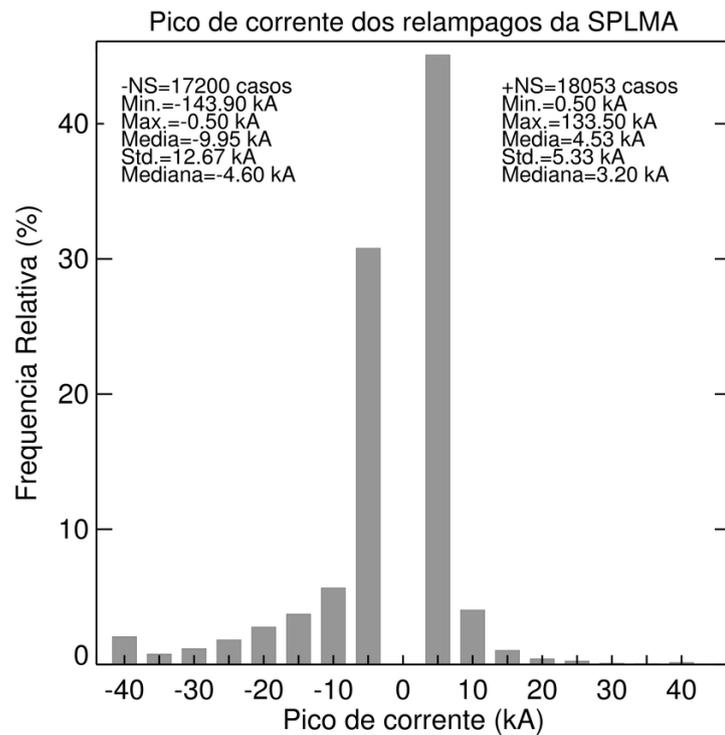


Figura 4.5 - Distribuição da frequência relativa (%) do pico de corrente (kA) dos relâmpagos detectados pela rede LINET.

4.1.2. Propriedades Físicas em Função do tipo de Relâmpago

As análises anteriores mostraram uma grande variabilidade nos parâmetros avaliados. Esse resultado pode estar associado aos diferentes tipos de relâmpagos existentes, que foram considerados juntos, como: relâmpagos nuvem-solo negativo e positivo e relâmpago intra-nuvem. Neste sentido, torna-se importante neste momento avaliar esses parâmetros em função do tipo de relâmpago com o objetivo de determinar suas diferenças.

Neste âmbito, a primeira investigação desta seção compreende a comparação do número de fontes de VHF dos relâmpagos fornecidos pela rede SPLMA (Figura 4.6). Numa primeira abordagem, os resultados observados demonstram certa semelhança dentre os relâmpagos IN com os raios NS positivos. Isto é verificado tanto pela proximidade entre o pico da frequência relativa observada, quanto pela proximidade das linhas que representam estes relâmpagos no gráfico (aproximadamente 50 fontes/relâmpago). Por outro lado, os relâmpagos NS negativos possuem uma porcentagem de ocorrência menor para classes acima de 80 fontes. É notável também que poucos relâmpagos possuem mais que 300 fontes VHF.

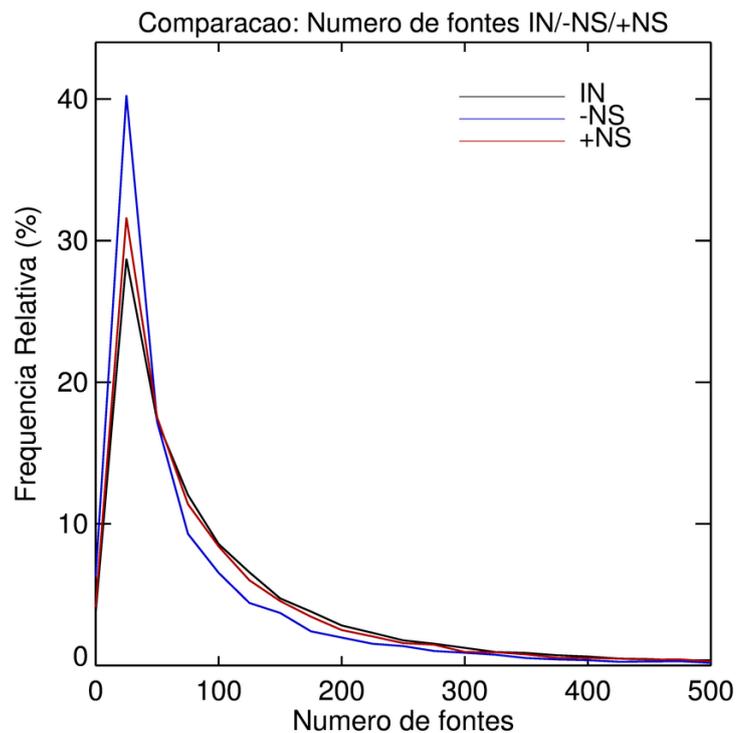


Figura 4. 6 - Histograma da frequência relativa (%) do número de fontes por relâmpago para relâmpagos: intra-nuvem (linha na cor preta), nuvem-solo negativo (linha na cor azul) e nuvem-solo positivo (linha na cor vermelha).

O comportamento da duração dos relâmpagos mostrou-se bastante semelhante dentre os três tipos de relâmpagos analisados. Conforme é observado na Figura 4.7, o valor mediano encontrado para ambas as amostras é de aproximadamente 0,3 s. Nota-se também que os relâmpagos tiveram como eventos de menor duração, durações de aproximadamente 0,001 s, conforme já verificado anteriormente na Figura 4.1. O intervalo interquartil apresentou valor de

aproximadamente 0,25 s e contribui para a verificação de que mais da metade dos relâmpagos possuem tempo de vida maior ou igual a 0,25 s. Esses valores possuem certa similaridade com os encontrados por Saba et al. (2006) (0,04 s) e Saraiva et al. (2010) (0,23 s), usando câmera rápida. No entanto, esta discreta diferença na duração dos relâmpagos pode estar associada ao modo de captura das fontes pelas diferentes redes de monitoramento, Saba et al. (2006), por exemplo, utilizou dados detectados pela rede RINDAT. Nota-se também a existência de uma quantidade expressiva de valores *outliers*, com alguns relâmpagos apresentando durações de até aproximadamente 2,8 s.

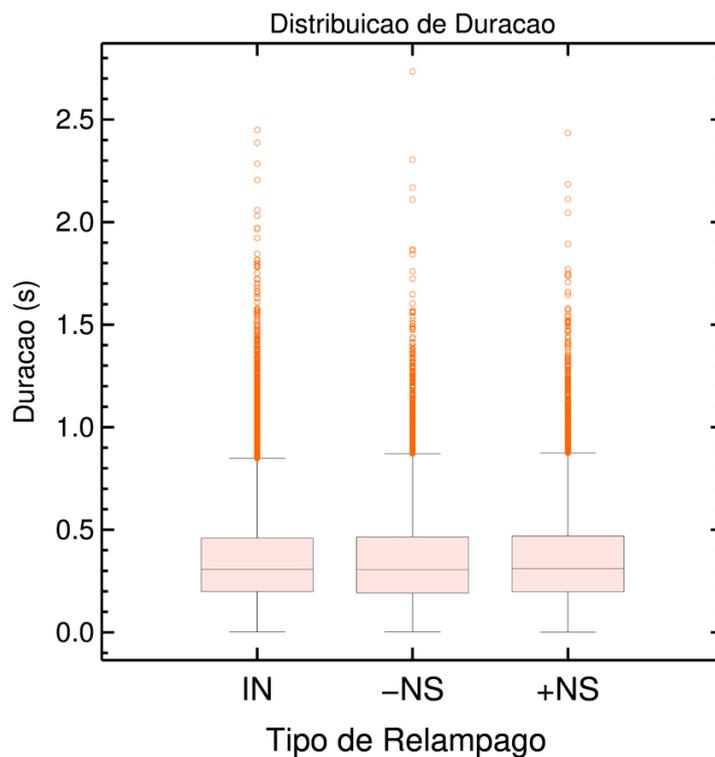


Figura 4. 7 - Gráfico de boxplot da distribuição da duração (s) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo.

A Figura 4.8 mostra a distribuição da propriedade física área (km^2) para os três tipos de relâmpagos. Ao analisar a figura observa-se uma moderada diferença entre a área dos relâmpagos, sendo os maiores relâmpagos, os NS positivos. Esta observação é notada ao verificar um valor maior da mediana e pelo traço superior estar deslocado para maiores valores de área, conforme o eixo do gráfico. Em alguns destes casos, certos relâmpagos possuíram áreas que superaram os 100 km^2 .

Tradicionalmente, relâmpagos positivos ocorrem nas regiões estratiformes das nuvens, percorrendo uma extensa região horizontalmente.

A distribuição dos valores das áreas dos relâmpagos NS negativos aparentam certa semelhança entre as áreas dos relâmpagos IN. Esta maior semelhança pode ser notada pela simetria das caixas do gráfico e também por meio da validação com os intervalos interquartis de 25, 24 e 38 km² para os relâmpagos IN, NS negativos e NS positivos, respectivamente. Provavelmente, tem-se uma indicação que tanto os relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo negativos ocorram em regiões mais convectivas das nuvens, sendo essas áreas bastante compactas em termos de tamanho.

Novamente, a delimitação do comprimento e área dos relâmpagos permite a validação de que relâmpagos NS positivos se formam em regiões mais estratiformes das nuvens. Aliado com a distribuição de cargas presentes nesta região, estes relâmpagos acabam percorrendo maiores regiões espacialmente quando comparados aos relâmpagos NS negativos que no geral, formam-se em regiões mais convectivas das nuvens.

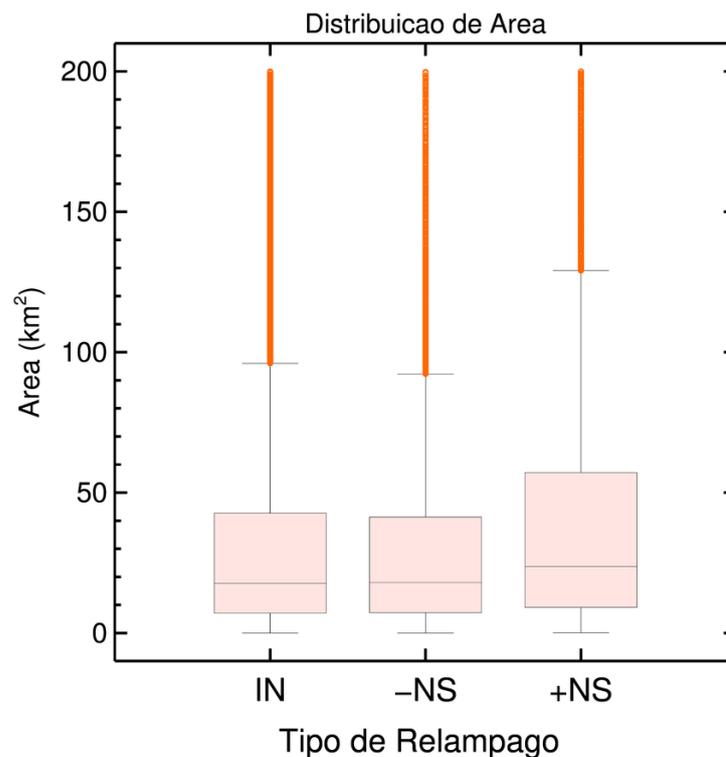


Figura 4. 8 - Gráfico de boxplot da distribuição da área (km²) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo.

A análise visual do gráfico apresentado anteriormente, mostrou grandes semelhanças entre as áreas dos relâmpagos IN e NS negativos. No entanto, uma nova análise mostra que as áreas observadas para os raios NS positivos também apresentam certas similaridades dentre os três tipos de relâmpagos, analogia essa verificada na Figura 4.9. Este novo gráfico, sugere uma pequena divergência entre as áreas dos relâmpagos NS positivos com os demais, com exceção para as áreas compreendendo aproximadamente 100-400 km².

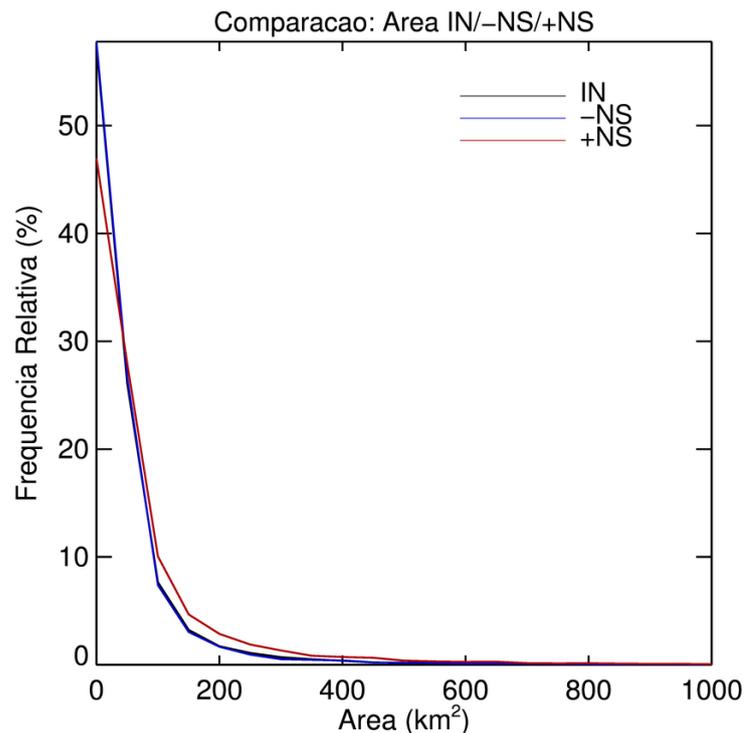


Figura 4. 9 - Histograma da frequência relativa (%) da área dos relâmpagos (km²) para relâmpagos: intra-nuvem (linha na cor preta), nuvem-solo negativo (linha na cor azul) e nuvem-solo positivo (linha na cor vermelha).

4.1.3. Pico de Corrente em Função do Tipo de Relâmpago

Nesta etapa do trabalho será avaliado como uma das propriedades elétricas dos relâmpagos (isto é, o pico de corrente) varia em função do tipo de relâmpago estudado (ou seja, IN, NS negativo e NS positivo). Os valores de pico de corrente representam a máxima corrente elétrica atingida pelo relâmpago ao propagar-se na atmosfera e foi obtido pelos dados da rede LINET. O pico de corrente dentre os relâmpagos IN analisados, sugere um valor mediano de aproximadamente 3 kA (Figura 4.10). Os máximos picos de correntes encontrados para este tipo de

relâmpago foram de 12 kA, enquanto que os mínimos -10 kA. Dentre os raios NS positivos e negativos, foram verificados valores medianos de aproximadamente 4 kA e -5 kA, nesta ordem. Estes resultados indicam que relâmpagos NS negativos podem transportar uma quantia maior (em módulo) de cargas para a superfície quando comparados aos NS positivos. Esta diferença entre as cargas pode estar relacionada por conta da distribuição dos hidrometeoros presentes nas regiões onde os relâmpagos são formados, bem como pelas regiões por onde se deslocam.

O maior intervalo interquartil dentre os tipos de relâmpagos analisados, sugere uma predominância de uma maior distribuição de cargas dentre os relâmpagos NS negativos (Figura 4.10). Para estes casos, nota-se situações onde o pico de corrente diagnosticado foi de até -25 kA. O valor mediano de aproximadamente -5 kA em conjunto ao traço inferior, revela que grande parte destes raios possuem pico de corrente com maiores magnitudes. Entretanto, a presença de *outliers* verificada para ambos os tipos de relâmpagos em análise, indica que DR's com maiores magnitudes podem ser encontradas dentro das amostras de dados.

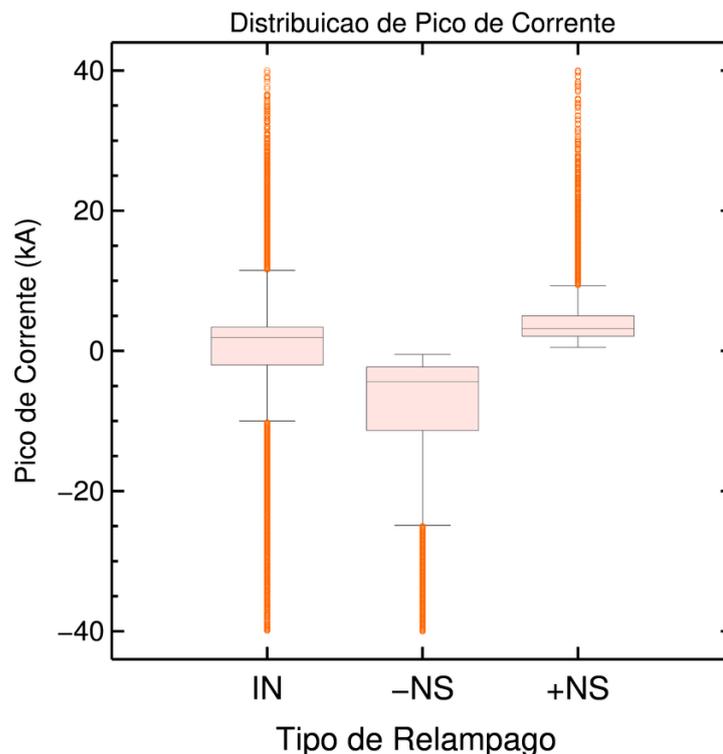


Figura 4. 10 - Gráfico de boxplot da distribuição do pico de corrente (kA) conforme o tipo dos relâmpagos: intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo.

4.1.4. Propriedades Físicas e Elétricas dos Relâmpagos Nuvem-Solo Negativos em Função da Duração

Devido ao fato que os relâmpagos NS transportam cargas elétricas para superfície, estes são os que mais impactam a sociedade diretamente, seja no setor elétrico e telefonia, quanto na ocorrência de mortes. Dentre eles, os relâmpagos NS negativos são os mais frequentes, e tem merecido devida atenção em pesquisas científicas. Adicionalmente, como mostrado na Figura 4.1 foi observado que podem ocorrer relâmpagos com diferentes durações. Seria importante entender se existem diferenças entre as propriedades físicas e elétricas entre os relâmpagos NS negativos de curta, média e longa duração. Neste sentido, uma análise mais detalhada acerca da duração dos relâmpagos NS negativos será discutida e apresentada nas próximas análises deste trabalho. Os relâmpagos foram separados em três grupos de duração com base nos percentis, que representam a mesma quantidade de eventos para cada classe: i) 0-33 % (0,0 – 0,2 s), ii) 33-66 % (0,2 – 0,4 s) e iii) 33-99 % (0,4 – 1,1 s).

A primeira análise a ser realizada foi avaliar o comprimento dos relâmpagos associado a duração (Figura 4.11). Torna-se importante, novamente salientar que o comprimento representa a soma total dos comprimentos do ramo principal e dos ramos secundários dos relâmpagos. A observação mais marcante, consiste da pertinência de que os relâmpagos com os maiores comprimentos possuem maior tempo de vida. A observação de diversos *outliers* também é aferida dentre os três intervalos de tempo, porém o comprimento máximo dentro da significância estatística para o último intervalo de tempo ocorre em aproximadamente 780 km. A mediana observada para a terceira classe de tempo de vida (0,4-1,1 s), atesta a hipótese de que a grande maioria dos relâmpagos estudados possuem extensões de até cerca de 150 km. Esses resultados mostram que relâmpagos com maiores durações podem deslocar-se por regiões mais extensas.

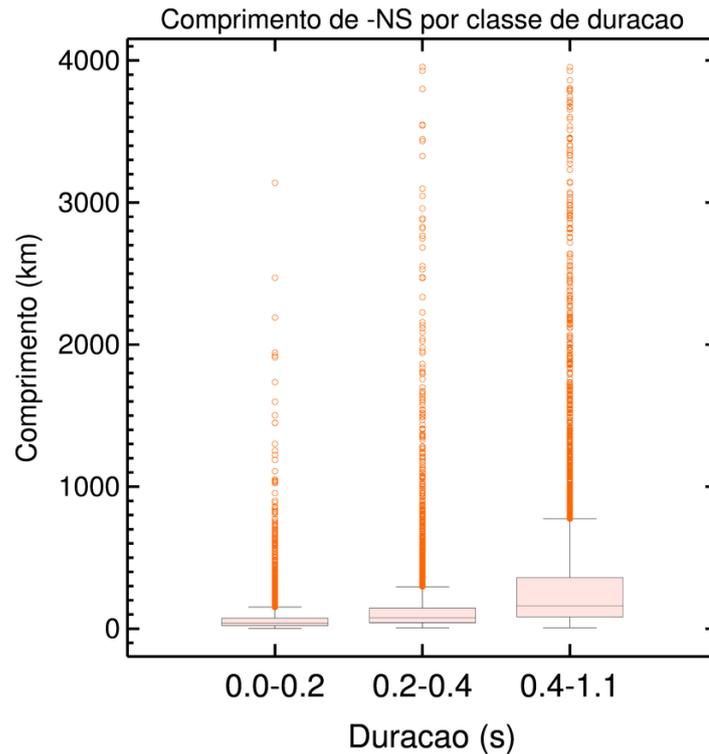


Figura 4. 11 - Gráfico de boxplot do comprimento (km) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s.

A multiplicidade representa o número de DR's por relâmpago. A Figura 4.12 mostra que os relâmpagos NS negativos também possuem comportamento semelhante ao observado anteriormente para a duração, ou seja, relâmpagos com menores valores de multiplicidade estão associados a relâmpagos com menor tempo de vida, o oposto também é averiguado. De maneira similar a figura anterior, a Figura 4.12 também apresenta baixos valores para as medianas entre ambas as classes de tempos. Os máximos valores de DR's observados para os respectivos intervalos de tempo crescentes foram 9, 14 e 18. Novamente, atenta-se para os valores extremos observados no gráfico. Fisicamente, estes resultados mostram que relâmpagos com maiores durações podem ter um maior número de descargas de retorno para um único relâmpago, resultado bastante concreto, visto que quão mais duradouro o relâmpago, maiores são as possibilidades deste percorrer maiores regiões e possivelmente, tocar o solo mais vezes.

Saraiva et al. (2010) computaram diversas características dos relâmpagos NS negativos e observaram por exemplo, uma multiplicidade média de 3,9 DR's para toda sua amostra de dados. Notavelmente, estas observações indicam que relâmpagos de longa duração podem descarregar cargas elétricas em solo em múltiplas vezes em

comparação com relâmpagos de curta duração. Essa relação crescente entre multiplicidade e duração poderia ser utilizada para estimar uma possível duração dos relâmpagos desde que se seja conhecido a sua multiplicidade, mostrando-se como um método indireto.

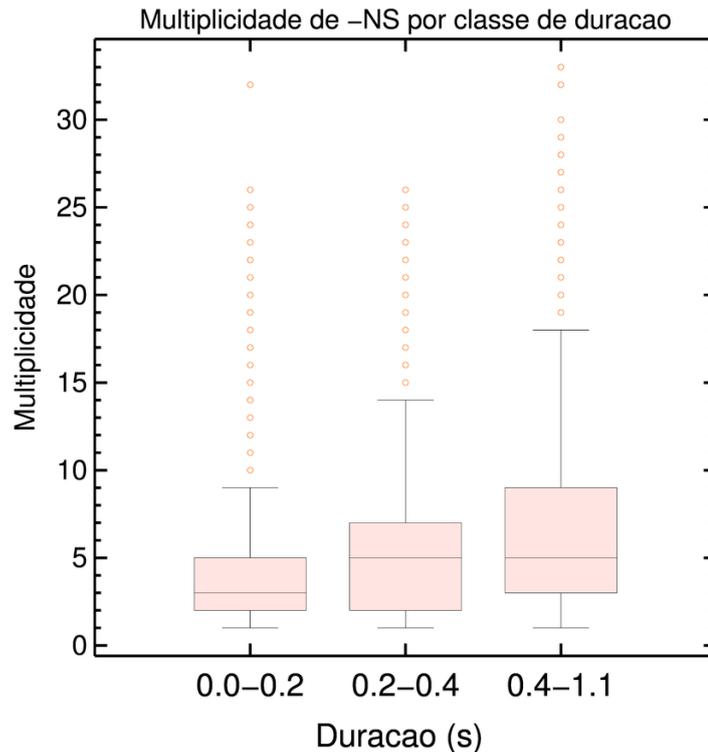


Figura 4. 12 - Gráfico de boxplot da multiplicidade dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s.

Novamente, a hipótese esperada de que relâmpagos mais duradouros apresentam maiores comprimentos e número de DR's também é verificada para a variável pico de corrente. A distribuição observada na Figura 4.13 exibe valores medianos de -4, -4,5 e -5 kA referentes aos três intervalos de tempos. Esta informação indica que metade dos dados dentro cada amostra possui pico de corrente menor ou igual a este valor mediano. Em alguns eventos, relâmpagos com pico de corrente de até 40 kA são observados dentro todas as distribuições. Estes resultados indicam que relâmpagos longos podem se propagar a longas distâncias, de modo a procurar por mais cargas elétricas visando repor o canal do relâmpago, assim fornecendo mais carga e conseqüentemente um maior pico de corrente.

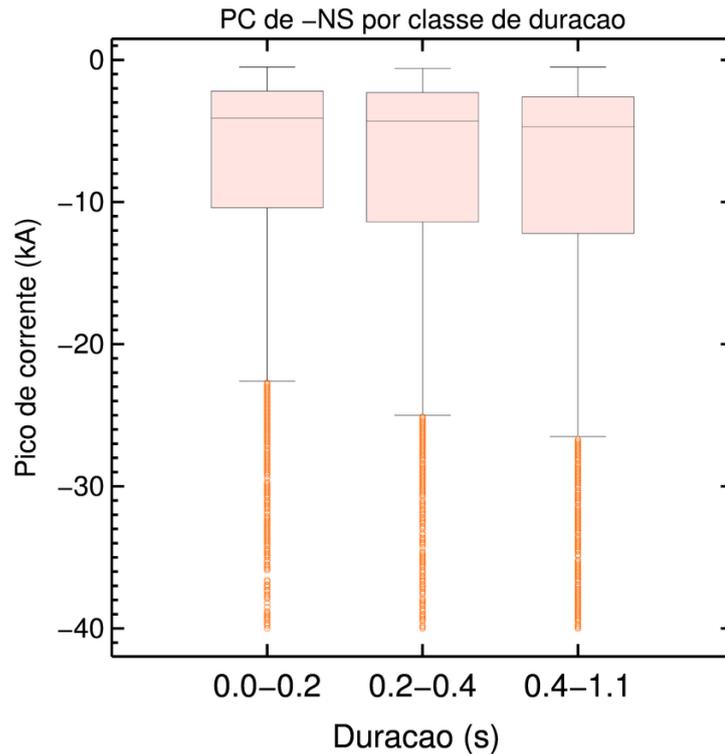


Figura 4. 13 - Gráfico de boxplot do pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de duração: i) 0,0-0,2 s, ii) 0,2-0,4 s e iii) 0,4-1,1 s.

Como o pico de corrente mostrou uma correlação positiva com a duração, torna-se importante neste momento averiguar uma possível relação em função da área dos relâmpagos NS negativos. Esta avaliação foi realizada considerando a divisão da área em três classes com a mesma quantidade de eventos: i) 0-10 km², ii) 10-33 km² e iii) 33-520 km².

A Figura 4.14 indica que a propriedade pico de corrente não é tão diretamente influenciada pela área do relâmpago. Nota-se ainda, uma menor variação na distribuição do pico de corrente para os relâmpagos que possuem uma área maior.

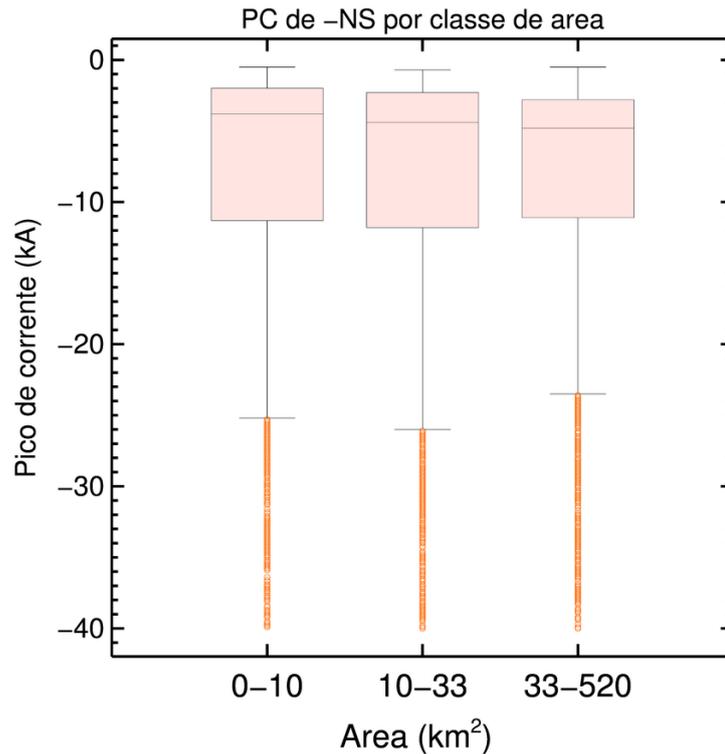


Figura 4. 14 - Gráfico de boxplot do pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS negativos, divididos em três classes de áreas: i) 0-10 km², ii) 10-33 km² e iii) 33-520 km².

4.2. Relações entre as Propriedades dos Relâmpagos e as Assinaturas do Radar

Nesta etapa será realizada uma comparação entre as características observadas no momento de ocorrência das fontes de VHF iniciais e finais dos relâmpagos, separados conforme o tipo e sua polaridade. Esta análise, permitirá um breve entendimento a respeito das condições no momento exato de iniciação dos relâmpagos e posteriormente na dissipação dos mesmos. As condições citadas anteriormente incluem: i) análise da altura das fontes VHF detectadas e ii) refletividade média e máxima observada.

O diagnóstico contendo a altura inicial dos relâmpagos, indica novamente uma grande afinidade entre os relâmpagos IN com os relâmpagos NS positivos (Figura 4.15). As observações revelaram uma máxima ocorrência de detecções para estes dois tipos de relâmpagos a uma altitude de aproximadamente 8,5 km, contendo cerca de 20 % da amostra de dados. Com relação aos NS negativos, o maior pico constatado para estes relâmpagos ocorre em aproximadamente 5 km de altura. Um segundo máximo também é observado na altura de aproximadamente 8,5 km, todavia, este contém uma frequência de apenas 10 % da distribuição dos dados, cerca de 5% menor que o maior pico identificado. De fato, os relâmpagos NS negativos geralmente

iniciam-se em regiões mais baixas nas nuvens, região aproximada da camada de cargas elétricas negativas das nuvens.

A Figura 4.15b mostra também que a última fonte dos relâmpagos NS negativos ocorre frequentemente na altura de aproximadamente 6,5 km. Já os relâmpagos NS positivos e IN apresentam um padrão bimodal, com máximo em 7 e 9,5 km de altura. O resultado físico mostra que a estrutura de cargas dentro da nuvem para os centros de cargas positivo se dá em alturas maiores (regiões estratiformes das nuvens) comparadas ao centro de cargas negativo (regiões convectivas das tempestades).

Posteriormente a estas análises separadas, podemos ainda identificar uma faixa predominante para a altura inicial e final dos relâmpagos a partir da análise do histograma. Isto é, as linhas do gráfico mostram que a maior parte dos relâmpagos tem sua altura inicial e final detectadas entre ~4 a 12 km de altitude, resultado este semelhante ao documentado na literatura, como por exemplo, Dye et al. (1989), Vincent et al. (2003), Wolf (2006), Yang e King (2010). Mosier et al. (2011) por exemplo, verificaram que a altura inicial dos relâmpagos ocorre a uma altitude de aproximadamente 6 km, região esta que contém geralmente o centro de cargas negativas das tempestades (KREHBIEL, 1986). No entanto, o diferencial deste trabalho para os demais trata-se da análise de uma grande quantidade de relâmpagos combinando redes de duas e três dimensões para diferentes tipos de relâmpagos.

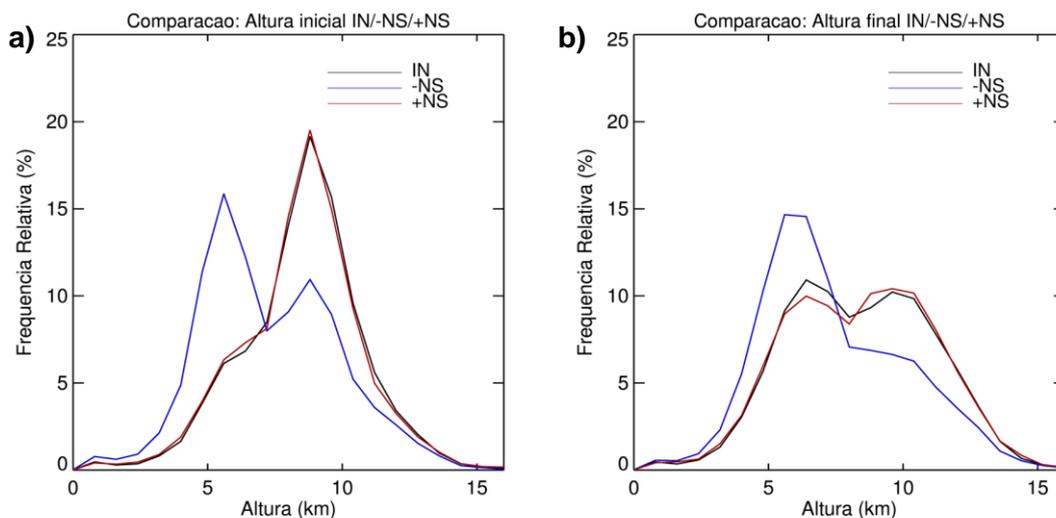


Figura 4. 15 - Histograma da frequência relativa (%) da: a) altura inicial (km) e b) altura final (km) para relâmpagos: i) intra-nuvem, ii) nuvem-solo negativo e iii) nuvem-solo positivo.

Os resultados provenientes da Figura 4.15 sugerem que as regiões onde são formados os relâmpagos podem possuir características microfísicas diferentes. O radar é um instrumento que pode ser utilizado para inferir algumas propriedades físicas e microfísicas das nuvens e a variável mais tradicionalmente utilizada para isto é a refletividade.

A Figura 4.16 mostra a frequência relativa da distribuição de refletividade encontrada no local onde os relâmpagos se iniciaram. A análise do gráfico de refletividade média (Figura 4.16a) mostra que os relâmpagos NS negativos tem sua primeira fonte de VHF detectadas em regiões com maiores refletividades (20 dBZ, curva na cor azul). Os relâmpagos NS positivos (15 dBZ, curva vermelha) por sua vez, apresentam valores de refletividade intermediários, isto é, menores comparados aos raios NS negativos, porém, maiores que as refletividades diagnosticadas para os relâmpagos IN. Os resultados para refletividade máxima são semelhantes, porém com valores de refletividade maiores.

Estes resultados mostram que a maior parte dos relâmpagos capturados pelas redes SPLMA e LINET, e posteriormente agrupados aos dados de radares, possuem um limiar mínimo de refletividade de 15-20 dBZ como condição inicial para a formação dos relâmpagos. Estes valores de refletividade correspondem a regiões com existência de água líquida super-resfriada e pequenas partículas de gelo, embora que, valores acima de 30 dBZ também indiquem a possibilidade da existência de *graupel* nestas regiões.

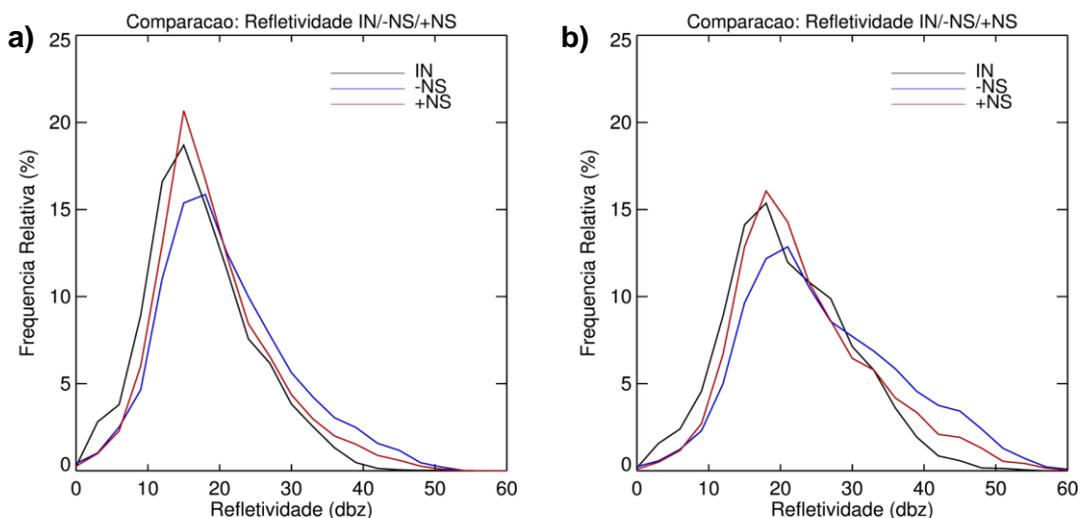


Figura 4. 16 - Histograma da frequência relativa (%) da: a) refletividade média (dBZ) e b) refletividade máxima (dBZ) para relâmpagos: i) intra-nuvem, ii) nuvem-solo negativo e iii) nuvem-solo positivo.

4.3. Análise das Propriedades Físicas e Elétricas dos Relâmpagos Através dos Percentis

Ao decorrer das etapas anteriores, foram avaliadas as principais características físicas e elétricas dos relâmpagos IN, NS negativos e NS positivos. Posteriormente, foi investigado a relação entre estas propriedades dos relâmpagos e as características identificadas no momento de iniciação e dissipação dos relâmpagos. Contudo torna-se relevante neste momento, identificar estatisticamente como as amostras de dados se mostraram divididas. Para tanto, será empregado uma análise simples na amostra de dados contendo os percentis de 10 % e 90 %, também conhecidos como primeiro decil e nono decil, respectivamente. Simultaneamente, será determinado o 50º percentil, medida correspondente a mediana.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 sintetizam os valores dos percentis encontrados para cada variável avaliada neste estudo, divididas conforme o tipo e polaridade dos relâmpagos de interesse. De modo geral, observou-se que o número de fontes pode variar bastante para ambos os tipos de relâmpagos. Entretanto, a duração não variou muito conforme o tipo e polaridade. As maiores áreas e comprimentos estiveram associados aos relâmpagos NS positivos, evidenciando que estes relâmpagos ocorrem nas regiões estratiformes das nuvens. Por outro lado, a multiplicidade não apresentou uma grande variação em função do tipo e polaridade, porém relâmpagos IN e NS negativos revelaram possuir multiplicidade mais alta que os relâmpagos NS positivos (multiplicidades 11 versus 10). Os relâmpagos NS negativos tiveram os maiores valores em módulo do pico de corrente, com valores de até 25 kA. Os valores correspondentes as alturas iniciais mostraram uma predominância de relâmpagos NS negativos em alturas menores quando comparados aos relâmpagos IN e NS positivos, com valores mínimos de aproximadamente 4,5 km de altura. As alturas finais observadas também são bastante distintas conforme o tipo dos relâmpagos. Os relâmpagos NS positivos, por exemplo, tiveram suas últimas fontes detectadas próximas aos topos (12 km) das nuvens. Com relação a refletividade média e máxima observada, nota-se que os relâmpagos NS negativos se iniciaram em regiões com maiores valores de refletividade quando comparados aos demais tipos de relâmpagos. Percebe-se também que os relâmpagos IN possuíram as menores refletividades no momento de iniciação. Como citado anteriormente, estes valores de refletividade encontrados para os relâmpagos NS negativos correspondem por exemplo, a regiões com presença de água líquida super-resfriada, partículas de gelo e possivelmente

granizo. Naturalmente, era de se esperar estes maiores valores de refletividade quando comparados a refletividade referente aos relâmpagos NS positivos, estes últimos, que se mostraram iniciar em regiões mais estratiformes das nuvens.

Tabela 4.1 - Percentis de 10, 50 e 90% das propriedades físicas dos relâmpagos conforme o tipo e polaridade.

Tipo do relâmpago	Número de fontes			Duração (s)			Área (km ²)			Comprimento (km)		
	p10	p50	p90	p10	p50	p90	p10	p50	p90	p10	p50	p90
IN	17	66	266	0,13	0,31	0,63	3,03	19,15	114,38	22,6	99,6	566,1
-NS	14	43	207	0,12	0,31	0,64	3,31	19,41	109,66	21,3	79,3	436,2
+NS	16	59	248	0,12	0,31	0,64	4,06	28,21	186,24	25,4	111,0	688,3

Tabela 4.2 - Percentis de 10, 50 e 90% das propriedades elétricas dos relâmpagos e altura das fontes VHF conforme o tipo e polaridade.

Tipo do relâmpago	Multiplicidade			Pico de corrente (kA)			Altura inicial (km)			Altura final (km)		
	p10	p50	p90	p10	p50	p90	p10	p50	p90	p10	p50	p90
IN	1	4	11	-4,9	1,9	5,9	5,6	8,7	11,2	5,0	8,4	11,9
-NS	1	4	11	-25,0	-4,6	-1,6	4,5	6,9	10,7	4,4	6,9	11,3
+NS	1	4	10	1,6	3,2	8,2	5,5	8,6	11,1	4,9	8,5	12,0

Tabela 4.3 - Percentis de 10, 50 e 90% da refletividade média e máxima (dBZ) dos relâmpagos conforme o tipo e polaridade.

Tipo do relâmpago	Refletividade média (dBZ)			Refletividade máxima (dBZ)		
	p10	p50	p90	p10	p50	p90
IN	8,79	16,26	27,59	11,17	20,21	32,75
-NS	10,81	19,27	33,75	13,68	24,22	41,91
+NS	10,55	17,63	30,18	13,05	21,46	37,15

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos em função do tipo de relâmpago através do monitoramento de relâmpagos realizado na Região Metropolitana de São Paulo. Essas análises são inéditas e foram realizadas através de uma rede de monitoramento em três dimensões de relâmpagos, implementada pela primeira vez no Brasil. Esse mapeamento tridimensional dos relâmpagos (através da SPLMA) permitiu em conjunto com dados da rede LINET um entendimento das diferenças entre as características físicas e elétricas de relâmpagos nuvem-solo negativos, positivos e relâmpagos intra-nuvem. Adicionalmente, foi realizada uma investigação visando entender a relação entre a refletividade proveniente do radar meteorológico e a altura de iniciação e dissipação dos relâmpagos.

As análises dos resultados permitiram identificar uma relação satisfatória na caracterização das propriedades envolvendo as variáveis físicas. Na Tabela 4.1 por exemplo, foi observado que quanto maiores os números de fontes VHF detectadas, maiores foram os valores encontrados para as variáveis duração, área e comprimento.

As relações entre as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos indicaram pouca relação com a variável multiplicidade. Entretanto, notou-se que as maiores áreas e comprimentos estiveram associadas a relâmpagos com menores (em módulo) picos de corrente observados. Mais especificamente, os relâmpagos NS positivos apresentaram áreas maiores comparados aos relâmpagos NS negativos, de modo que esta característica esteve associada a relâmpagos com menores cargas (em módulo) detectadas pela rede LINET.

A avaliação dos campos de refletividade incluindo os momentos de iniciação e dissipação dos relâmpagos, mostrou que as maiores frequências de ocorrência dentre os tipos de relâmpagos analisados foram encontradas para refletividades mínimas em torno de 15 dBZ. Foi verificado também que os relâmpagos NS positivos se iniciam e tem sua última fonte detectada em alturas maiores comparados aos relâmpagos NS negativos, resultado este já discutido em diversos trabalhos envolvendo a estrutura elétrica de tempestades.

Os resultados sintetizados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são inéditos e mostraram-se como um modelo conceitual mais robusto entre as diferenças físicas e elétricas dos relâmpagos IN, NS negativos e NS positivos. Estes resultados serão úteis para indicar

quais propriedades dos relâmpagos são mais importantes, de modo a servirem como dados de entradas em modelos de *nowcasting* para previsão de relâmpagos e precipitação. Sugere-se ainda para trabalhos futuros, a utilização de dados referentes a outras redes de monitoramento para efeito de comparação, validação e/ou calibração dos dados da rede LINET. Para este feito, dados da rede BrasilDAT e RINDAT podem ser agrupados no sistema de seleção dos relâmpagos, visto que, estas redes contêm dados disponíveis para o mesmo período de tempo em que a LMA esteve operando na RMSP. Além disso, estas análises podem ser expandidas para o período total da campanha CHUVA-Vale que foi de 5 meses. Em um futuro próximo, a empregabilidade destas redes em outras regiões do país poderá também contribuir para o entendimento destas relações para as demais regiões do Brasil.

6. REFERÊNCIAS

ABERCROMBY, R. On the identity of cloud forms all over the world. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 13, p. 140–146, 1887.

AHRENS, C. D. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. 9^a ed. Belmont: CA: Brooks/Coles, 2009. 549p.

ALBRECHT, R. I.; GOODMAN S. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. 2016: Where Are the Lightning Hotspots on Earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, p. 2051–2068, 2016.

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, 15., 2014. Oklahoma. **Anais...** Oklahoma, 2014.

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 Mapping Array (SP-LMA): Network assessment and analyses for intercomparison studies and GOES-R proxy activities. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 15., 2014. Norman. **Anais...** Norman, 2014.

BETZ, H. D.; SCHMIDT, K.; OETTINGER, P. LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe. **Lightning: Principles, Instruments and Applications**, Eds. H.-D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Springer, 2008.

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.

CECIL, D. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. **Atmospheric Research**, v. 135-136, p. 404-414, 2014.

DECARIA, A. J., K. E. PICKERING, G. L. STENCHIKOV, OTT, L. E. Lightning-generated NO_x and its impact on tropospheric ozone production: A three-dimensional modeling study of a Stratosphere-Troposphere Experiment: Radiation, Aerosols and

Ozone (STERAO-A) thunderstorm, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, D14303, doi: 10.1029/2004JD005556, 2005.

DYE, J. E.; WINN, W. P.; JONES, J. J.; BREED, D. W. The electrification of New Mexico thunderstorms. Part 1: Relationship between precipitation development and the onset of electrification. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 8643-8656, 1989.

EMPLASA - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. **Região Metropolitana de São Paulo, 2018.** Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: 25 de abril de 2018.

GATLIN, P. N.; GOODMAN, S. J. A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, p. 3–22, 2010.

GRENET, G. Essai d'explication de la charge électrique des nuages d'orages. **Extrait. Ann. Geophys.** v. 3, p. 306-307, 1947.

GOODMAN, S. J; BUECHLER, D. E; MEYER, P. J. Convective tendency images from a combination of lightning and satellite data. **Weather and Forecasting**, v. 3, n. 3, p. 173-188. 1988.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel, 1986.

JACOBSON, E. A.; KRIDER, E. P. Electrostatic field changes produced by Florida lightning. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, p. 103-117, 1976.

JAYARATNE, E. R.; SAUNDERS, C. P. R.; HALLETT, J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 109, p. 609-630, 1983.

JUNIOR, A. B. **Implementação de uma rede neural artificial na associação de imagens do radar meteorológico e dados de descargas elétricas**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 637-647, 1962.

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms, in **The Earth's Electrical Environment**, edited by E. P. Krider e R. G. Roble, Natl. Acad. Press. Washington, D. C., p. 90-113, 1986.

KREHBIEL, P. R.; BROOK, M.; MCCRORY, R. A. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, p. 2432-2456, 1979.

KUETTNER, J. P.; LEVIN, Z.; SARTOR, J. D. Thunderstorm electrification-inductive or non-inductive. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2470-2484, 1981.

MACHADO, L. A. T.; SILVA DIAS, M. A. F.; MORALES, C.; FISCH, G.; VILA, D.; ALBRECHT, R.; GOODMAN, S. J.; CALHEIROS, A.; BISCARO, T.; KUMMEROW, C.; COHEN, J.; FITZJARRALD, D.; NASCIMENTO, E.; SAKAMOTO, M.; CUNNINGHAM, C.; CHABOUREAU, J-P.; PETERSEN, W. A.; ADAMS, D.; BALDINI, L.; ANGELIS, C. F.; SAPUCCI, L. F.; SALIO, P.; BARBOSA, H. M. J.; LANDULFO, E.; SOUZA, R. F.; BLAKESLEE, R.; BAILEY, J.; FREITAS, S.; LIMA, W. F. A.; TOKAY, A. The CHUVA Project - how does convection vary across the Brazil? Bulletin of the **American Meteorological Society**, v. 95, p. 1365-1380, 2014.

MASON, B. J. The generation of electric charges and fields in thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 415, p. 303-315, 1988.

MATTOS, E. V. **Relações entre assinaturas polarimétricas de radar e atividade elétrica das tempestades**. 2015. 248 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

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. **Monthly Weather Review**, v. 143, p. 2774-2794, 2015.

MILLER, S. L. A production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. **Science**, v. 117, p. 528-529. DOI: 10.1126/science.117.3046.528, 1953.

MIRANDA, F. J. DE. **Estudo da Forma de Onda de Campo Elétrico de Relâmpagos**. 2000. 119p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

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.

MOSIER, R. M.; SCHUMACHER, C.; ORVILLE, R. E.; CAREY, L. D. Radar nowcasting of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. **Weather and Forecasting**, v. 26, p. 199-212, 2011.

MURPHY, M. J. When flash algorithms go bad. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 19., 2006, Tucson. **Anais...** Tucson, 2006.

OGAWA, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. Handbook of **Atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, v. 1, Cap. 4, p. 93-136, 1995.

OPARIN, A. I. **The origin of life on the Earth**. New York: Academic Press Inc., 1957. 536 p.

OTT, L. E.; PICKERING, K. E.; STENCHIKOV, G. L.; HUNTRIESER, H.; SCHUMANN, U. Effects of lightning NO_x production during the 21 July European Lightning Nitrogen Oxides Project storm studied with a three-dimensional cloud-scale chemical transport model. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-18, 2007.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, p. 1633-1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>, 2007.

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

PINTO JR.; O., PINTO, I. R. C. A.; NACCARATO, K. P. Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. **Atmospheric Research**, v. 84, p. 189-200, 2007.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR., O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 733-737, 2003.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR., O.; ROCHA, R. M. L.; DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M.; C. FILHO, A. Cloud-to-ground lightning flashes in the southeastern Brazil in 1993, 2, Time variations and flash characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v.104, p. 31,381-31,388, 1999.

PINTO, O. JR.; NACCARATO, K. P.; PINTO, I. R. C. A.; FERNANDES, W. A.; NETO, O. P. Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location systems. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L09811, 2006.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA R., P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

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.; KREHBEIL, 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.

RUST, W. D.; and Coauthors. Inverted-polarity electrical structures in thunderstorms in the Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study (STEPS). **Atmospheric Research**. v. 76, p. 247–271, doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.029, 2005.

SABA, M. M. F.; PINTO JR, O.; BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**, vol. 33, L23807, doi:10.1029/2006GL027455, 2006.

SABA, M. M. F.; PINTO JR., O; BALLAROTTI, M.G.; CABRAL, G.F. Monitoring the performance of the lightning detection network by means of a high-speed camera. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC 2004), 18., 2004, Helsinki. **Anais....** Helsinki: Vaisala, 2004.

SARAIVA, A. C. V. **Estudo de fatores determinantes das características dos raios Negativos**. 2010. 161 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SARAIVA, A. C. V.; CAMPOS, L. Z. S.; WILLIAMS, E. R.; ZEPKA, G. S.; ALVES, J.; PINTO Jr., O.; HECKMAN, S.; BUZATO, T. S.; BAILEY, J. C.; MORALES, C. A.; BLAKESLEE, R. J. High-speed video and electromagnetic analysis of two natural bipolar cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 119, p. 6105-6127, doi:10.1002/2013JD020974, 2014.

SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; CAMPOS, L. Z. S. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 115, D11102, doi:10.1029/2009JD012604, 2010.

SARAIVA, I. **Características dos Sistemas Precipitantes Observados via Radar Meteorológico de Manaus**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAUNDERS, C. P. R.; KEITH, W. D.; MITZEKA, R. P. The effect of liquid water on thunderstorm charging. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 11,007-11,017, 1991.

SCHULTZ, C. J.; PETERSEN, W. A.; CAREY, L. D. Preliminary Development and Evaluation of Lightning Jump Algorithms for the Real-Time Detection of Severe Weather. **American Meteorological Society**, v. 48, p. 2543–2563, 2009.

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.

TAKAHASHI, T. Electric charge life cycle in warm clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 123-142, 1975.

TAKAHASHI, T. Videosonde observation of winter thunderstorms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY (ICAE), 10., 1996, Osaka. **Anais...** Osaka, 1996, p. 552– 555.

VELDE, O. A.; MONTANYÀ, J. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 13, p. 504-13, 519. doi:10.1002/2013JD020257, 2013.

VINCENT, B. R.; CAREY, L. D.; SCHNEIDER, D.; KEETER, K.; GONSKI, R. Using WSR-88D reflectivity data for the prediction of cloud-to-ground lightning: A North Carolina study. **National Weather Digest**, v. 27, p. 35-44, 2003.

VONNEGUT, B. Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 34, p. 378-381, 1953.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2^a ed. Washington: University of Washington, 2006. 505p.

WIENS, K. C.; RUTLEDGE, S. A.; TESSENDORF, S. A. The 29 June 2000 Supercell Observed during STEPS. Part II: Lightning and Charge Structure. **American Meteorological Society**, v. 62, p. 4151–4177, 2005.

WILLETT, J. C.; KRIDER, E. P.; LETEINTURIER, C. Submicrosecond field variations during the onset of first return strokes in cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 9027-9034, 1998.

WILLIAMS, E. R. The electrification of severe storms, chapter 13. In: Doswell III, C.A. (Ed.), Severe Convective Storms. **Meteorological Monograph**, v. 28, n. 50, p. 527-561, 2001.

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 13,151-13,167, 1989.

WILLIAMS, E.; MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Stroke Multiplicity and Horizontal Scale of Negative Charge Regions in Thunderclouds. **Geophysical Research Letters**, v. 43, p. 5460–5466, doi:10.1002/2016GL068924, 2016.

WOLF, P. Anticipating the initiation, cessation, and frequency of cloud-to-ground lightning, utilizing WSR-88D reflectivity data. **National Weather Association Electronic Journal of Operational Meteorology**, 2006.

WORKMAN, E. J.; REYNOLDS, S. E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity. **Physical Review**, v. 78, p. 254-259, 1950.

WORMELL, T. W. The effect of thunderstorms and lightning discharges on the earth's electric field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, v. 328, p. 249-303, 1939.

WORMELL, T. W. Vertical electric currents below thunderstorms and showers. Proceedings of the Royal Society of London. **Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 127, p. 567-590, 1930.

YANG, Y. H.; KING, P. Investigating the potential of using radar echo reflectivity to nowcast cloud-to-ground lightning initiation over Southern Ontario. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 1235-1248, 2010.