

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

DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DE INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E DISSIPAÇÃO DOS RELÂMPAGOS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Pedro Ygor Carvalho Correa

Itajubá, MG, Brasil 2020

DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DE INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E DISSIPAÇÃO DOS RELÂMPAGOS

por

Pedro Ygor Carvalho Correa

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: Enrique Vieira Mattos

Itajubá, MG, Brasil 2020

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DE INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E DISSIPAÇÃO DE RELÂMPÁGOS

elaborada por

Pedro Ygor Carvalho Correa

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

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

Michelle S. Kelvita

Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)

Rachel Ifanger Albrecht, Dra. (USP)

Itajubá, 03 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço imensamente todas as pessoas presentes nessa etapa de minha vida. Dentre todos agradeço com grande honra os familiares e amigos.

Agradeço ao meus queridos e amados pais, Marilea de Carvalho Corrêa e Luthero Alves Corrêa pelo amor incondicional em todos os momentos da vida. Vocês representam a minha base e com profundo respeito venho agradecer por iluminarem e guiarem a minha vida até aqui.

Aos meus amigos Vitor Hugo de Almeida Marrafon e Kelvem Rodrigo de Oliveira expresso a minha eterna gratidão. Que me mostraram o verdadeiro sentido da amizade. Que todos os dias agradeço incontáveis vezes pelas ajudas nos momentos mais difíceis que passei.

A palavra que expressa a admiração, respeito e carinho por meus professores é o agradecimento. Agradeço a todos que conheci pela paciência, por passar o conhecimento adiante e principalmente pelos ensinamentos para a vida.

Ao meu orientador e professor Enrique Vieira Mattos sou grato pela imensa paciência, respeito e humildade nesse tempo que estive presente. Você revelou ser um grande professor e quero agradecer por todos os ensinamentos e conselhos que aprendi com você.

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

A todos que não foram mencionados aqui, saibam que todos estão dentro do meu coração e que cada um de vocês faz parte desta conquista. Aos amigos, companheiros de república, familiares e professores os meus sinceros agradecimentos.

Dedico este trabalho aos meus pais pelo eterno amor que tenho por vocês. Que em todos os momentos da minha vida eu vou sempre lembrar de vocês.

"Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver." Dalai Lama.

RESUMO

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

DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DE INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E DISSIPAÇÃO DOS RELAMPAGOS.

AUTOR: PEDRO YGOR CARVALHO CORREA ORIENTADOR: ENRIQUE VIEIRA MATTOS Local e Data da Defesa: Itajubá, 03 de julho de 2020.

O presente estudo tem como objetivo avaliar as regiões onde os relâmpagos se iniciam, propagam e dissipam no interior das nuvens. Em adição, este trabalho visa também avaliar as diferenças físicas (duração, área e comprimento) e elétricas (pico de corrente, polaridade, multiplicidade e intervalo de tempo entre descargas de retorno) entres os relâmpagos nas regiões de precipitação estratiforme, convectiva e mista. Os dados utilizados são provenientes da campanha CHUVA-Vale que ocorreu entre novembro de 2011 e março de 2012 abrangendo a Região Metropolitana de São Paulo e Vale do Paraíba. Foram utilizados dados inéditos de uma rede de medição em três dimensões de relâmpagos denominada São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA). Dados adicionais como as descargas de retorno fornecidas pela rede Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) e os Constant Altitute Plan Position Indicator (CAPPI) de refletividade do radar banda-S da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) também foram utilizados. Ao todo foram mapeados e avaliados 81.365 relâmpagos. A maioria dos relâmpagos foram formados e dissiparam na região convectiva das nuvens de tempestade. Os relâmpagos iniciados na região convectiva são formados em alturas maiores quando comparados a altura de formação dos relâmpagos estratiformes (10,1 km versus 8,9 km). Em relação a classificação geral dos relâmpagos nas regiões de precipitação (convectiva, estratiforme e mista), os relâmpagos convectivos apresentaram menor tamanho (área e comprimento) (19,6 km² e 4,4 km), maior duração (374 ms), multiplicidade (# 2) e intervalo de tempo entre as descargas de retorno (86 ms). Em contrapartida, os relâmpagos estratiformes são menos frequentes e a sua formação ocorre em altitudes mais baixas (8.9 km) em relação aos demais tipos de relâmpagos. Além disso, os relâmpagos estratiformes possuem as maiores áreas (62,6 km²) e consequentemente as maiores variações no comprimento dos relâmpagos. Em termos das propriedades elétricas, os relâmpagos convectivos (estratiformes) são predominantemente negativos (positivos) (97,8 % e 52,6 %). Estes resultados podem ser úteis para indicar quais propriedades dos relâmpagos são mais importantes, de modo a servirem como dados de entrada em modelos de previsão imediata do tempo, para previsão de relâmpagos e precipitação.

Palavras-chave: relâmpago, monitoramento, tridimensional.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 2 – Classificação do campos de refletividade de radar do FCTH em: convectivo (região na cor vermelha), estratiforme (região na cor azul) e transição (região na cor roxa). A figura é referente ao CAPPI de 6 km de altura para o dia 06 de janeiro de 2012 às 20:40 UTC. A localização do radar está indicada pelo diamante na cor

preta.....11

Figura 3.2 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da área (km2) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação......**18**

Figura 3.4 - Gráfico de *boxplot* da distribuição do comprimento (km) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação...**19**

Figura 3.6 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da duração (ms) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação......21

Figura 3.10 – Distribuição da frequência relativa (%) da polaridade positivo (barras na cor vermelha) e negativo (barras na cor azul) dos relâmpagos em função do tipo de relâmpago (convectivo, estratiforme e misto) considerando a polaridade (a) de todas

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Número de ca	asos das fonte	s da S	SPLMA p	ara	as três reg	giõ	es classifica	idas
(Convectiva,	Estratiforme	e Transição)	nos	estágio	de	iniciação	е	dissipação	dos
relâmpagos.									15

BrasilDAT - Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas CAPPI - Constant Altitude Plan Position Indicator Cb - Cumulonimbus CHUVA - Cloud processes of tHe main precipitation systems in Brazil: a contribution to cloud resolving modeling and to the global precipitation measurement dBZ - Decibéis de Z DR Descarga de Retorno EM - Entre-Nuvens FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica Hz - Hertz IN - Intra-Nuvem INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais KHz - Quilohertz Km - Quilômetro LINET - Lightning Detection Network MHz - Megahertz - Milissegundos Ms NASA - National Aeronautics and Space Administration NS - Nuvem-Solo PPI - Plan Position Indicator PRF - Pulse Repetition Frequency RMSP - Região Metropolitana de São Paulo S - Segundo SCM Sistema Convectivo de Mesoescala SN - Solo-Nuvem SP São Paulo -SPLMA -São Paulo Lightning Mapping Array STEPS -Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study TOA - Time-of-Arrival USP - Universidade de São Paulo VHF - Very Higher Frequency

SUMÁRIO

ISTA DE FIGURASv	ii
ISTA DE TABELASx	K
ISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOSx	í

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos Gerais	6
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2. MATERIAIS E MÉTODOS	7
2.1. DADOS	7
2.1.1 CAMPANHA CHUVA-VALE DO PARAÍBA	7
2.1.2. DADOS SPLMA	8
2.1.3. DADOS BRASILDAT	9
2.1.4. DADOS DO RADAR DA FCTH	9
2.2 Metodologia	10
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS REGIÕES DE PRECIPITAÇÃO	10
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS RELÂMPAGOS	11
2.2.3. COMBINAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS RELÂMPAGOS DA SPLMA E BRASILDAT	.13
2.2.4. CLASSIFICAÇÃO DA REGIÃO DE INICIAÇÃO E DISSIPAÇÃO DOS RELÂMPAGOS	
CONVECTIVOS, ESTRATIFORMES E MISTOS	13
2.2.5. DIFERENÇAS FÍSICAS E ELÉTRICAS ENTRES OS RELÂMPAGOS CONVECTIVOS,	
ESTRATIFORMES E MISTOS	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
3.1. INICIAÇÃO E DISSIPAÇÃO DOS RELÂMPAGOS	15
3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E ELÉTRICAS DOS RELÂMPAGOS: CLASSIFICAÇÃO GERAL	17
3.2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RELÂMPAGOS	17
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma camada constituída por gases que envolve toda a superfície do planeta Terra. Os gases mais presentes são o nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio, dióxido de carbono e gases traços (VAREJÃO, 2006). A atmosfera pode ser dividida em 4 camadas principais: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A troposfera corresponde a porção mais próxima à superfície e possui uma extensão média de 10 km de altura. O entendimento dos processos físicos da troposfera são de grande interesse no ambiente científico, principalmente por ser o local onde há a presença de vida. Um dos eventos desencadeados e estudados na atmosfera são as nuvens.

As nuvens são manifestações visíveis da condensação e deposição de vapor d'água na atmosfera. São definidas como conjuntos visíveis de minúsculas gotículas de água ou cristais de gelo, ou uma mistura de ambos. Sua formação ocorre quando uma parcela de ar ascende verticalmente na atmosfera (a um nível de menor pressão), a pressão exercida sobre a parcela reduz a pressão no interior e promove a expansão à medida que realiza trabalho sobre o ambiente. Existem três fatores importantes para a formação das nuvens, que são: i) vapor d'água na atmosfera (umidade), ii) gradientes de temperatura (instabilidade) e mecanismos forçantes (frentes, brisas, cadeia de montanha e etc) (WALLACE e HOBBS, 2006).

As nuvens assim formadas são classificadas baseado nos critérios de aparência e altitude. Na aparência se distinguem as nuvens do tipo: i) *Cumulus,* ii) *Stratus* e iii) *Cirrus.* As nuvens *Cumulus* são porções de massas individuais arredondadas, com domos visíveis; enquanto as nuvens do tipo *Stratus* são camadas que cobrem grande parte ou todo o céu e por fim, as nuvens *Cirrus* são nuvens fibrosas, altas, brancas e finas. Qualquer variação de nuvem é uma combinação desses três tipos. Em relação a altitude da base da nuvem elas são agrupadas em quatro grupos: as baixas (base da nuvem abaixo de 2000 m), médias (base entre 2000 e 6000 m), altas (base acima de 6000 m), e com desenvolvimento vertical (AHRENS, 2009). Nuvens com desenvolvimento vertical cobrem grandes extensões verticais e estão associadas com intensas correntes ascendentes e um ambiente instável, como por exemplo, as *nuvens Cumulonimbos*. As nuvens *Cumulonimbus* estão associadas a eventos de precipitação intensa, descargas elétricas e em casos severos a queda de granizo.

Ao longo das últimas décadas foram propostos três tipos de estrutura de cargas elétricas para as nuvens de tempestade que são: i) dipolar, ii) tripolar e iii) multipolar. Estruturas dipolares foram amplamente estudadas, em trabalhos como Jacobson (1976), Krehbiel et al. (1979) e Krehbiel (1986). Neste tipo de estrutura é postulado um centro de cargas positivas próximo ao topo da nuvem e um negativo entre -10 e - 20°C. Os centros de cargas positivas são encontrados a cerca de 1 km do topo da nuvem e variam de acordo com a extensão vertical da nuvem (WILSON, 1916). Em concordância Krehbiel (1986) observou cargas positivas em suspensão na região superior da nuvem suspensos pelos movimentos ascendentes no interior da nuvem. Neste sentido os centros de cargas negativas foram avistadas em alturas estáveis próximas a isoterma de -15°C. As alturas dos centros de cargas observadas sob alturas constantes são presenciados e reforçados pelos estudos de Krehbiel et al. (1983). Neste trabalho, foram considerados tempestades de diferentes locais do globo e observaram que as regiões de centros negativos estavam restritos a faixa de -10°C

A estrutura tripolar postula a existência de um centro de carga negativa em médios níveis, um positivo acima e uma pequena região de carga na base da nuvem (WILLIAMS, 1989). O principal centro negativo desta estrutura elétrica localiza-se em torno de 6 km de altura (temperatura de -15°C) e possui um formato alongado com extensão vertical menor que 1 km e horizontal de dezenas de quilômetros (KREHBIEL et al., 1979). No entanto, estruturas multipolares foram descritas por Stolzenburg et al. (1998). Esse modelo de estrutura de cargas elétricas foi documentado em Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e super-células. Neste modelo a configuração de cargas elétricas é formada por quatro e seis camadas alternadas de cargas em regiões com correntes majoritariamente ascendentes e descendentes no interior da nuvem, respectivamente.

De maneira geral, existem três mecanismos principais responsáveis pela formação da estrutura de cargas elétricas das nuvens de tempestade: 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). Cada um destes mecanismos explica algum aspecto das estruturas de carga elétricas observadas. O mecanismo não indutivo, por exemplo, tem sido fortemente aceito pela comunidade científica pela coerência com experimentos e simulação de colisões na ausência de um campo elétrico externo.

Como observado na literatura, diversos trabalhos envolvem os mecanismos de formação das estruturas elétricas durante a evolução de uma tempestade. Neste sentido a formação dos relâmpagos no interior das tempestades deve-se ao carregamento pela colisão entre cristais de gelo e *graupel* num ambiente com gotículas de água super-resfriada. A região no interior da nuvem onde esses processos ocorrem compreende a fase mista da nuvem (entre 0°C e -40°C) (REYNOLDS et al. 1957). Nessa perspectiva, a formação dos relâmpagos está relacionada com a presença de hidrometeoros (granizo, cristais de gelo, gotículas de água super-resfriada e gotas de chuva) no interior das tempestades. Os relâmpagos ocorrem quando a intensidade das cargas elétricas no interior das nuvens torna-se alta o suficiente, e rompe a rigidez dielétrica do meio, e desencadeia a movimentação de cargas elétricas. A duração típica dos relâmpagos são 0,5 s e percorrem distâncias de 5 a 10 km na atmosfera (PINTO Jr. e PINTO, 2000).

De maneira geral, os relâmpagos podem ser divididos em duas classes: relâmpagos no solo e relâmpagos na nuvem. Relâmpagos no solo possuem dois pontos de origem: dentro da nuvem (relâmpago nuvem-solo, NS) ou no solo (relâmpago solo-nuvem, SN) (OGAWA, 1995). A maioria dos relâmpagos no solo registrados são do tipo NS. Os relâmpagos NS emitem vários pulsos de corrente elétrica, esses pulsos são conhecidos como descargas de retorno (DR). O número de descargas de retorno de um relâmpago é denominado de multiplicidade. Os relâmpagos SN ocorrem em menor frequência em relação aos relâmpagos NS e são geralmente observados em regiões de superfície elevada, como estruturas e altas e montanhas. Dentre os mais frequentes relâmpagos, estão os relâmpagos na nuvem, que podem ser divididos em: intra-nuvem (IN), entre nuvens (EN) e nuvem para o ar (NA). Com a maior ocorrência do que os relâmpagos NS, os eventos IN são pouco visíveis e oferecem menor risco a sociedade. Relâmpagos IN costumam ser os primeiros a ocorrer em uma tempestade, precedendo os relâmpagos no solo por várias dezenas de minutos (WILLIAMS et al., 1989; WILLIAMS et al., 2005).

O mapeamento dos relâmpagos pode ser realizado através de redes de sensores de relâmpagos em superfície ou sensores óticos a bordo de satélites. Embora os satélites possuam a habilidade de mapear os relâmpagos sobre uma região extensa e aquelas de difícil acesso, redes de localização de relâmpagos em

superfície possuem alta eficiência de detecção, e a capacidade de diferenciar relâmpagos IN e NS (BOCCIPPIO et al., 2001). No Brasil desde 2011 está em operação a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT). Esta rede captura a radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos na faixa de frequência entre 1 Hz até 12 Hz. Nessa faixa é possível compor os relâmpagos NS e IN através das descargas de retornos emitidas pertencentes a esses relâmpagos. Os sensores da rede BrasilDAT utilizam o método *time-of-arrival* (TOA) para detecção das descargas de retorno (LEWIS et al., 1960, CUMMINS et al., 1998). Todas as informações obtidas pela rede são analisadas por algoritmos específicos, e esse processo elimina qualquer informação que não tenha origem nas descargas atmosféricas. A grande vantagem dessa rede é a possibilidade de determinar o pico de corrente, polaridade, multiplicidade e intervalo entre descarga de retorno com alta eficiência de detecção e precisão de localização, principalmente em regiões do Brasil onde existe uma alta densidade de sensores.

A partir da década de 90 surgiram no mundo as redes de relâmpagos de superfície capazes de capturar a energia dos relâmpagos em Very High Frequency (30 a 300 MHz, VHF). Essas redes denominadas Lightning Mapping Array (LMA) possuem o diferencial de mapear tridimensionalmente detalhadamente a propagação do canal dos relâmpagos. Diversos estudos têm empregado dados de redes LMA para estimar as propriedades físicas e a estrutura de cargas elétricas das nuvens de tempestades (LANG e RUTLEDGE, 2008; LUND et al., 2009; ALBRECHT et al., 2014; MONTANYÀ et al., 2014; MECIKALSKI et al. 2015). Por exemplo, Albrecht et al. (2014) avaliaram as propriedades de relâmpagos através de dados da rede São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) durante a campanha CHUVA-Vale na Região Metropolitana de São Paulo. Os relâmpagos apresentaram uma duração média de aproximadamente 0,42 s e grande parte dos relâmpagos analisados apresentaram uma quantidade de fontes de VHF inferior a 100, enquanto em alguns casos o valor ultrapassou 1000 fontes de VHF por relâmpago. Silva (2018) combinou as informações das redes São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) e Lightning Detection Network (LINET). O objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos ocorridos em janeiro de 2012 durante a campanha CHUVA-Vale. Alguns dos resultados encontrados mostraram as diferenças entre os tipos de relâmpagos avaliados e a região de maior frequência na iniciação. Os relâmpagos NS negativos apresentaram correlações positivas com as propriedades

duração, comprimento, multiplicidade e pico de corrente. No mesmo trabalho, foi observado que a região da maioria das iniciações dos relâmpagos estava entre os valores de refletividade de 15 à 20 dBZ.

Wang et al. (2019) documentaram através de observações, que as fontes de VHF iniciais de relâmpagos estratiformes ocorreram próximo da camada de carga elétrica no topo da nuvem, com valores de refletividade entre 0 e 5 dBZ e em altitudes maiores de 9 km. Em um estudo sobre Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) durante a campanha Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study (STEPS), Lang e Rutledge (2008) observaram que 99 % das fontes de VHF encontravam dentro de uma região de intensa convecção. As regiões onde as fontes foram observadas compreendem as regiões classificadas como convectivas. Lang et al. (2004) avaliaram as regiões de propagação de diferentes tipos de relâmpagos. Nesse estudo foi considerados 39 relâmpagos de um SCM assimétrico no Colorado em julho de 2000. Os resultados foram construídos a partir de uma base de dados tridimensional (LMA) e campos de refletividade de radares banda-S. Os resultados mostraram que os relâmpagos NS positivos originaram nas regiões estratiformes, contabilizando 9 dos 39 relâmpagos positivos observados. Tais relâmpagos estenderam sob camadas finas de cargas elétricas e percorrendo longas distâncias horizontalmente. Em adição, Lund et al. (2009) analisaram um pequeno SCM combinando informações de LMA e sondagens de campo elétrico. O SCM apresentou uma estrutura tripolar durante a fase de maturação da tempestade. Duas regiões no interior das nuvens foram favoráveis a iniciação de relâmpagos: de 7-10 km e outra em 3-6 km. Na região superior, sob a influência de graupel e cristais de gelo, os relâmpagos iniciaram próximo a regiões possuindo refletividades entre 35 e 47 dBZ. Por outro lado, a região inferior onde os relâmpagos iniciados estavam localizados no topo da camada de derretimento foi caracterizada por uma refletividade acima de 50 dBZ.

Embora diversos trabalhos tenham contribuído para o avanço no conhecimento científico sobre as características de formação e propagação dos relâmpagos; estudos no Brasil visando esse entendimento através do mapeamento tridimensional de relâmpagos ainda é ausente. Além disso, como supracitado as nuvens de tempestades são compostas por regiões estratiformes e convectivas. Essas regiões das nuvens possuem características microfísicas e dinâmicas bastante distintas, impactando dessa forma, as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos

dessas regiões. Embora essa hipótese seja plausível e tenha sido abordada de maneira residual na literatura, ainda é inexistente um conhecimento profundo sobre as propriedades das regiões convectivas e estratiformes das nuvens de tempestade usando um extenso banco de dados. Nesse contexto, compreender sobre as caraterísticas físicas e elétricas das regiões em que são formados e propagam-se os relâmpagos pode revelar importantes indicadores para serem introduzidos em modelos de previsão de curtíssimo prazo de tempo.

1.1. Objetivos Gerais

Este estudo tem como objetivo avaliar as regiões onde os relâmpagos se iniciam, propagam e dissipam no interior das nuvens. Para tanto, são utilizados dados da campanha CHUVA-Vale, através de observações feitas pelas redes LMA e BrasilDAT e campos de refletividade fornecido pelo radar da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). O local de estudo está centrado na Região Metropolitana de São Paulo e Vale do Paraíba no período de dezembro de 2011 a março de 2012.

1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

 a) Caracterizar a região de iniciação dos relâmpagos nas regiões de precipitação estratiforme, convectiva e mista;

 b) Avaliar as diferenças físicas (duração, área e comprimento) entre os relâmpagos nas regiões de precipitação estratiforme, convectivo e mista;

c) Avaliar as diferenças elétricas (pico de corrente, polaridade, multiplicidade e intervalo entre descargas de retorno) entres os relâmpagos nas regiões de precipitação estratiforme, convectiva e mista.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados durante a campanha CHUVA-Vale que ocorreu entre novembro de 2011 e março de 2012 no estado de São Paulo - Brasil. Os dados utilizados compreendem os campos de refletividade de radar meteorológico e relâmpagos provenientes de redes de detecção de superfície. Abaixo serão descritos detalhadamente cada uma das fontes dos dados.

2.1.1 Campanha CHUVA-Vale do Paraíba

A campanha CHUVA-Vale foi um experimento de campo que ocorreu entre novembro de 2011 e dezembro de 2012 e teve como principal objetivo o entendimento da evolução das nuvens para tempestades. O experimento abrangeu a Região Metropolitana de São Paulo, Região Metropolitana do Vale do Paraíba e cidades vizinhas. Esse experimento foi a quarta campanha realizada associado ao projeto CHUVA (*Cloud processes of tHe main precipitation systems in Brazil: A contribUtion to cloud resolVing modeling and to the GPM (GlobAl Precipitation Measurement*)) (MACHADO et al., 2014). Os dados do projeto CHUVA são de livre acesso e estão disponiveis em: http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/admin.login.logic. Dentre os dados obtidos pelo experimento que serão utilizados neste estudo são: i) refletividade do radar banda S proveniente operado pela Fundação Centro Tecnológico Hidráulico (FCTH), ii) fontes de VHF identificadas pela rede São Paulo *Lightning Mapping Array* (SPLMA), e iii) descargas de retorno provenientes da rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT). A Figura 3.1 mostra a localização dos instrumentos utilizados neste estudo.



Figura 2.1 - Região de estudo. A localização do radar está indicada pelo diamante preenchido na cor preta, o círculo contínuo indica o raio de abrangência do radar (190 km). Os marcadores no formato de estrela (em vermelho) representam os sensores da rede SPLMA, enquanto os marcadores no formato triângular na cor verde representam os sensores da BrasilDAT. O círculo centrado na rede SPLMA foi empregado neste estudo e define a área de melhor eficiência de detecção da rede SPLMA (< 100 km de distância ao centro da rede SPLMA).

2.1.2. Dados SPLMA

A Rede de detecção de relâmpagos SPLMA esteve em operação no período de novembro de 2011 a março de 2012 e foi instalada na região metropolitana de São Paulo. Esse sistema foi elaborado pelo *New Mexico Institute do Mining and Technology*, e implementado através de uma colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade de São Paulo (USP). As redes de LMAs detectam a radiação emitida por relâmpagos na faixa de 30 a 300 MHz podendo mapear os relâmpagos em três dimensões (latitude, longitude e altura) até 150 km de distância do centro da rede (RISON et al., 1999). A rede operou na frequência dos canais de televisão 8 (180-186 MHz) e 10 (192-198 MHz) e foi composta na média por 12

sensores ao longo da RMSP (Figura 3.1, estrelas na cor vermelha). Os dados utilizados são nível 2 de processamento e compreendem as fontes de VHF agrupadas em relâmpagos. Em relação aos relâmpagos da rede SPLMA foram utilizados apenas aqueles com mais de 10 fontes. Como discutido por Lund et al. (2009) esta limitação visa eliminar possíveis relâmpagos ruidosos associados com baixa quantidade de fontes de VHF. Para garantir uma maior eficiência da rede SPLMA foram utilizados apenas os relâmpagos que estiveram numa distância menor que 100 km do centro da rede SPLMA. A partir dessas limitações foram utilizadas as seguintes informações desses relâmpagos: data, horário, latitude, longitude e altitude das fontes de VHF dos relâmpagos.

2.1.3. Dados BrasilDAT

A BrasilDAT é a terceira maior rede de detecção e monitoramento de relâmpagos no mundo. Operada desde 2011 pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, a rede conta com sensores instalados nas regiões Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste do Brasil (ELAT, 2020). Os sensores registram precisamente o instante e a localização do ponto de colisão dos relâmpagos ao atingirem o solo e informando as características físicas (polaridade e pico de corrente). Para os relâmpagos IN, apenas a posição média da ocorrência é informada. Neste estudo a BrasilDAT forneceu os dados coletados durante a campanha CHUVA-Vale com informações de descargas de retorno para relâmpagos IN e NS. As descargas de retorno (return stroke, do inglês) da BrasilDAT foram agrupadas em relâmpagos (flashes, do inglês). Durante a campanha, a rede disponha de 56 sensores espalhados por 11 estados da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil (NACARATO et al., 2012). As informações usadas neste estudo são compostas da localização (latitude e longitude), polaridade (positiva ou negativa) e pico de corrente. Estes dados foram todos reprocessados pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE.

2.1.4. Dados do Radar da FCTH

O Radar utilizado neste estudo é um radar Banda S (comprimento de onda de 10 cm) operado pela FCTH e está localizado no município de Biritiba-Mirim, em São Paulo. Ao longo da campanha CHUVA-Vale o radar operou com uma resolução temporal de 5 minutos com uma varredura volumétrica de 190 km de alcance, abrangendo toda a região leste do estado de São Paulo, sul do Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais (Figura 2.1). A varredura volumétrica do radar fornecia informações em 20 ângulos de elevação, de 1° a 30,8°. Cada elevação corresponde a um campo de refletividade, denominado *Plan Position Indication* (PPI). A resolução radial variou de acordo com a distância do radar, com: 0,5 km (distâncias menores que 60km), 1,0 km (entre 60-120 km do radar) e 2,0 km (acima de 120km). A resolução azimutal do radar foi de 1° e a largura do feixe foi de 2.1°. A partir dos dados de PPI foram produzidos *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) com um 1 km de resolução espacial entre 2 e 15 km de altura. Devido a ruídos nos dados no mês de novembro e a existência de *clutter* produzido pela Serra da Mantiqueira no setor norte, foram utilizados apenas os dados entre dezembro de 2011 e março de 2012 e compreendendo as regiões fora da área de atuação do *clutter*. Sendo assim, os dados encontrados dentro da área de clutter foram removidos das análises.

2.2 Metodologia

2.2.1. Classificação das regiões de Precipitação

A primeira etapa empregada neste estudo foi agrupar temporalmente os dados de refletividade, fontes de VHF da SPLMA e as informações das descargas de retorno da BrasilDAT. Os relâmpagos foram agrupados considerando um intervalo de 5 min, iniciando com a varredura do radar. Por exemplo, para uma varredura do radar das 16:00:00 h UTC foram agrupados os dados das redes SPLMA e BrasilDAT entre 16:00 e 16:04:59.999 h UTC.

Após o agrupamento, o próximo passo foi classificar os *pixels* dos campos de refletividade do radar em i) estratiforme, ii) convectivo e iii) transição. Utilizando a metodologia empregada por Lang e Rutledge (2008), a classificação foi baseada na utilização da refletividade em 6 km (próximo a isoterma de -10°C). Esta região é uma boa aproximação da localização do centro de cargas negativas encontrado em típicas tempestades (KREHBIEL, 1986). Nessa classificação uma região convectiva é definida quando o *pixel* do radar possui refletividade acima de 30 dBZ. Se esta condição não é satisfeita, porém o perfil estiver numa distância menor que 10 km de um perfil convectivo, o perfil será definido como uma região de transição. Se nenhuma das condições anteriores forem satisfeitas o perfil será definido como estratiforme. A Figura 2.2 mostra um exemplo de classificação para uma campo de refletividade do CAPPI de 6 km para o radar do FCTH do dia 06 de janeiro de 2011 às 20:40 UTC



Figura 2.2 – Classificação do campo de refletividade do radar do FCTH em: convectivo (região na cor vermelha), estratiforme (região na cor azul) e transição (região na cor roxa). A figura é referente ao CAPPI de 6 km de altura para o dia 06 de janeiro de 2012 às 20:40 UTC. A localização do radar esta indicado pelo diamante na cor preta.

2.2.2. Classificação dos Relâmpagos

Na próxima etapa foi realizada a classificação dos dados relâmpagos das redes SPLMA e BrasilDAT. Baseado na metodologia empregada por Lang e Rutledge (2008) os relâmpagos foram classificados em estratiformes, convectivos e mistos. Para essa classificação foram utilizados como referência as os campos de refletividade do radar classificados e discutidos na seção 2.2.1.

Para os dados da rede SPLMA um relâmpago foi definido como convectivo, quando mais de 80 % das suas fontes de VHF ocorrerem em *pixels* pré-definidos (seção 2.2.1) como convectivos. Em contrapartida, os relâmpagos estratiformes são aqueles em que mais de 80 % das suas fontes estão alocadas em *pixels* estratiformes. Os demais relâmpagos são classificados como mistos. Na Figura 2.3 são mostrados exemplos da classificação dos relâmpagos da SPLMA. Seguindo a mesma metodologia, a região onde os relâmpagos iniciaram e dissipam também foram classificadas em estratiforme, transição e convectiva. Para isto foi calculado a posição aritmética média dos primeiros 10 % das fontes observadas para cada relâmpago (LANG e RUTLEDGE, 2008; LUND et al., 2009). Como métrica adicional, também foram contabilizados a iniciação e dissipação considerando a posição da primeira e última fonte dos relâmpagos. Em seguida ao processo de seleção dos relâmpagos, análises identificaram a distribuição geral vertical das localidades de iniciação e dissipação dos relâmpagos estratiforme, mistos e convectivos.



Figura 2.3 – Classificação geral das fontes de VHF dos relâmpagos proveniente da rede SPLMA para relâmpago: (a) convectivo, (b) estratiforme e (c) misto. As fontes em tons mais claros representam as primeiras fontes do relâmpago (na cor branco a primeira) e em tons mais escuros as últimas fontes registradas (na cor preto para a última fonte).

A classificação dos dados da rede BrasilDAT foi realizada de maneira similar ao realizado para as fontes da SPLMA. Para este caso, os dados foram determinados utilizando a posição da primeira descarga de retorno dos relâmpagos NS e do relâmpago IN e comparando com os campos de refletividade já classificados (seção 2.2.1). Os relâmpagos identificados pela rede BrasilDAT que foram associados a cada tempestade também foram classificados como estratiformes, convectivo e mistos.

2.2.3. Combinação espacial e temporal dos relâmpagos da SPLMA e BrasilDAT

Para cada relâmpago identificado pela rede SPLMA foi determinado o relâmpago correspondente fornecido pela rede BrasilDAT. Baseado na metodologia empregada por Williams et al. (2016) e Beltran (2017) foi empregado um limiar temporal e espacial de 500 ms e 20 km, respectivamente, para combinar os relâmpagos da SPLMA com a BrasilDAT. Apenas foram utilizados aqueles relâmpagos que foram detectados por ambas redes. Essa metodologia permitiu separar para cada campo de precipitação do radar os relâmpagos encontrados e ainda as informações para cada tipo de relâmpago. Ao todo foram avaliados 81.365 relâmpagos. Sendo assim, as características dos relâmpagos que foram avaliadas são: 1) duração, 2) área, 3) comprimento, 4) pico de corrente, 5) polaridade, 6) multiplicidade e 7) intervalo de tempo entre as descargas de retorno de um mesmo relâmpago. A partir desta etapa, com os dados agrupados e classificados, a interpretação das informações dos relâmpagos foi realizada.

2.2.4. Classificação da região de iniciação e dissipação dos relâmpagos convectivos, estratiformes e mistos

Nesta etapa foram determinadas as características da região de iniciação e dissipação dos relâmpagos dentro das nuvens. Para isto foram utilizados os relâmpagos detectados pela rede SPLMA. Baseado na metodologia empregada por Lund et al. (2009) a localização de iniciação e dissipação dos relâmpagos foram definidas como a localização (latitude e longitude) média entre a posição dos 10 % das primeiras fontes e 10 % das últimas fontes, respectivamente (conforme discutido na seção 2.2.2). Os relâmpagos foram separados naqueles que iniciaram em regiões i) convectivas, ii) estratiforme e iii) transição. Essa classificação foi realizada tanto para a localidade de iniciação quando para a dissipação dos relâmpagos. As fontes iniciais e finais que foram classificadas como "não-classificadas" foram excluídas das análises. Foram realizadas análises sobre a distribuição vertical da localização de iniciação e dissipação para todos os relâmpagos durante o período de estudo.

2.2.5. Diferenças físicas e elétricas entres os relâmpagos convectivos, estratiformes e mistos

Nesta etapa foram avaliadas as diferenças entre as as propriedades elétricas e físicas dos relâmpagos estratiformes, convectivos e mistos das tempestades. Para cada grupo desses relâmpagos foi analisado as seguintes propriedades: duração, comprimento, polaridade, pico de corrente, multiplicidade e intervalo entre descargas de retorno. Estes relâmpagos são aqueles detectados simultaneamente pela rede SPLMA e BrasilDAT. Esta análise é muito importante porque atualmente não é totalmente compreendido como as regiões estratiformes e convectivas impactam as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Iniciação e dissipação dos relâmpagos

Ao todo foram identificados e avaliados 283.414 relâmpagos detectados pela rede SPLMA ao longo da campanha CHUVA-Vale. Deste total de relâmpagos, apenas 81.365 enquadraram nos critérios discutidos na seção anterior. A Tabela 3.1 apresenta o número e a porcentagem relativa de relâmpagos detectados pela rede SPLMA separados naqueles em que a região de iniciação e dissipação foram classificadas como: convectiva, estratiforme e transição. Na tabela são mostrados a classificação utilizando como referência a localização da primeira fonte do relâmpago e considerando a localização média da posição dos 10 % das primeiras fontes dos relâmpagos. Da mesma maneira foram calculados a posição da dissipação dos relâmpagos. Os resultados mostram que a maioria dos relâmpagos tem sua iniciação na região convectiva (83 %). A diminuição dos valores da primeira (última) fonte quando comparados com o conjunto das 10 % primeiras (10 % últimas) se dá pela classificação não definida em casos com um número relativamente baixo de fontes. Ao comparar as ocorrências entre a iniciação e a dissipação das fontes estratiformes observa-se que as fontes dissiparam mais em regiões estratiformes do que de iniciação. Essa evidência mostra que em mais de 100 relâmpagos convectivos/mistos tem o seu transporte de cargas em direção as regiões estratiformes da nuvem.

Tabela 3.1 - Relâmpagos detectados pela rede SPLMA em função da característica do local da sua
iniciação e maturação separados para os casos definidos como: i) convectivo, ii) estratiforme e iii
transição.

Região da	Inicia	ação	Dissipação		
Classificação	Primeira	10% Primeiras	Última	10% Últimas	
Convectivo	60965 (83,2%)	57498 (86,8%)	56355 (77,8 %)	50563 (83,9 %)	
Estratiforme	63 (0,08 %)	43 (0,06 %)	256 (0,35%)	146 (0,24%)	
Transição	12241 (16,7 %)	8699 (13,13 %)	15791 (21,8 %)	9564 (15,86 %)	

Além da determinação da região de iniciação dos relâmpagos, informações a respeito da altura em que os relâmpagos são iniciados é muito importante. A Figura 3.1 mostra a distribuição da altura média das primeiras fontes de VHF dos relâmpagos.

Os resultados mostram que os casos de relâmpagos convectivos e mistos foram semelhantes. Os valores dos limiares inferiores para ambos foram de 2,6 km e 2,8 km, mas diferiram em relação à altura máxima encontrada, apresentando valores de aproximadamente 16,8 km para os relâmpagos convectivos e 16,1 km para os relâmpagos mistos. No entanto, os valores encontrados para as medianas foram relativamente diferentes: 10,1 km para os relâmpagos convectivos e 8,9 km para os estratiformes e 9,3 km para os relâmpagos mistos. Esses resultados são semelhantes aos resultados encontrados por Wang et al. (2019), que encontraram a região de preferência das fontes de VHF iniciais dos relâmpagos estratiformes próximos de 9 km de altitude. De fato, torna-se evidenciado que os relâmpagos iniciados na região convectiva das nuvens são formados em alturas maiores em relação aos estratiformes. Esses resultados sugerem que relâmpagos convectivos são predominantes em nuvens profundas e com intenso desenvolvimento vertical.



Figura 3.1 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da altura (km) média das primeiras fontes de VHF dos relâmpagos. São mostrados a distribuição para aqueles relâmpagos que a sua iniciação foi classificada nas regiões de precipitação em: convectivo, estratiforme e transição. A caixa na cor cinza representa o número de amostras encontradas para cada classificação.

3.2 Propriedades Físicas e Elétricas dos relâmpagos: Classificação geral

As análises anteriores foram importantes para entender em maior profundidade as características das regiões de iniciação e dissipação dos relâmpagos em função dos diferentes tipos de classificações. Contudo, análises sobre as propriedades físicas (área, comprimento e duração) e elétricas (polaridade, pico de corrente, multiplicidade e intervalo de tempo entre descargas de retorno) podem contribuir no entendimento sobre as diferenças entre essas propriedades em função da classificação geral dos relâmpagos em: convectivo, estratiforme e misto.

3.2.1 Propriedades Físicas dos Relâmpagos

Nessa seção serão apresentadas e discutidas as características físicas dos relâmpagos. A primeira característica física analisada neste estudo será a área total dos relâmpagos (km²). A Figura 3.2 mostra a distribuição dos valores da área dos relâmpagos que foram classificados em convectivo, estratiforme e misto. Importante salientar que esta classificação considera, por exemplo, relâmpagos convectivos sendo aqueles em que mais de 80 % das fontes de VHF desse relâmpago pertencem aos *pixels* classificados como convectivo pelos dados de radar (como discutido na seção 2.2.2).

A distribuição da área mostrou-se bastante distinta entre os diferentes tipos de relâmpagos. Os relâmpagos convectivos possuem uma menor variação entre as distribuições; além disso, mais de 75 % das amostras dos relâmpagos convectivos estão localizados entre o intervalo de área entre 0,02 km² e 50 km². Em contrapartida, os relâmpagos estratiformes possuem as maiores áreas entres os relâmpagos em estudo. Na Figura 3.2 observa-se que o limite superior da área para este tipo de relâmpago foi de aproximadamente 297 km² e sua mediana de 62,6 km². Em consistência a Figura 3.3 indica que as ocorrências da distribuição das áreas estão concentradas entre 200 e 400 km². Esses resultados indicam que os relâmpagos estratiformes possuem uma dimensão horizontal maior em relação aos demais relâmpagos, o que provavelmente deve-se ao fato da sua ocorrência ser predominante nas regiões estratiformes das nuvens de tempestade. Semelhante aos relâmpagos convectivos, a curva de frequência dos relâmpagos mistos possui uma pequena divergência nos valores acima de 200 km², o que mostrou-se diferente para a distribuição encontrada e possibilitando uma amplitude maior (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da área (km²) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.



Figura 3.3 - Frequência relativa (%) da área (km²) dos relâmpagos classificados como: convectivo (linha na cor vermelha), estratiforme (linha na cor azul) e misto (linha na cor roxa).

A Figura 3.4 mostra a distribuição da propriedade física comprimento (km) dos relâmpagos. Esses resultados são semelhantes aos encontrados para a distribuição da área dos relâmpagos (Figura 3.2). Nota-se que os relâmpagos estratiformes possuem os maiores comprimentos; em contrapartida os relâmpagos mistos são os que apresentam maior variação na distribuição. Os casos estratiformes podem alcançar valores maiores que 15 km de comprimento. A Figura 3.5 mostra a frequência relativa (%) dos relâmpagos em relação ao comprimento. Na figura observa-se que as maiores frequências ocorrem para os menores intervalos de comprimento. Os relâmpagos estratiformes possuem as maiores frequências nos comprimentos acima entre 10 e 20 km.



Figura 3.4 - Gráfico de *boxplot* da distribuição do comprimento (km) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.



Figura 3.5 - Frequência relativa (%) do comprimento (km) dos relâmpagos classificados como: convectivo (linha na cor vermelha), estratiforme (linha na cor azul) e misto (linha na cor roxa).

A propriedade duração é uma importante característica dos relâmpagos. A duração dos relâmpagos foi calculada empregando-se as fontes de VHF dos relâmpagos identificados pela rede SPLMA. A duração do relâmpago foi calculada contabilizando o intervalo de tempo transcorrido entre a ocorrência da primeira e a última fonte de VHF de um mesmo relâmpago. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a distribuição da propriedade duração (ms) e a frequência de ocorrência (%) para os três diferentes tipos de relâmpagos, respectivamente. Ao observar a Figura 3.6 notase que os relâmpagos convectivos possuem as maiores durações. A mediana calculada para os relâmpagos convectivos apresenta valor de aproximadamente 374 ms e são similares ao encontrados por Montanyà et al. (2014). Em um estudo com uma rede LMA no Norte da Espanha, os autores encontraram valores médios de aproximadamente 400 ms. A distribuição mais ampla dos convectivos permitem encontrar casos acima de 1000 ms. Os relâmpagos estratiformes apresentam uma variação menor em relação aos demais e os casos não ultrapassam a duração de 770 ms. A Figura 3.7 evidencia que os relâmpagos estratiformes possuem a menor duração entre os demais tipos de relâmpagos. A maior duração observada para os relâmpagos convectivos provavelmente esteja associada a maior disponibilidade de cargas elétricas no interior das nuvens, na camada mista para estes tipos de relâmpagos.



Figura 3.6 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da duração (ms) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.



Figura 3.7 - Frequência relativa (%) da duração (ms) dos relâmpagos classificados como: convectivo (linha na cor vermelha), estratiforme (linha na cor azul) e misto (linha na cor roxa).

3.2.1 Propriedades Elétricas dos relâmpagos

Nesta etapa do trabalho foram avaliadas as propriedades elétricas dos relâmpagos (multiplicidade, intervalo de tempo entre descargas de retorno, polaridade e pico de corrente) em função do tipo de relâmpago (isto é, convectivo, estratiforme e misto). Essas informações dos relâmpagos são provenientes da rede BrasilDAT. A propriedade multiplicidade representa o número de descargas de retorno pertencentes a um mesmo relâmpago. Para esta análise foram utilizadas as informações provenientes da rede BrasilDAT para determinar a multiplicidade e os dados da rede SPLMA para a classificação dos relâmpagos em convectivos, estratiformes e mistos. A Figura 3.8 mostra que os relâmpagos convectivos possuem os maiores valores de multiplicidade, apresentando uma mediana com valor de 2 descargas de retorno por relâmpago. Em 75 % das amostras dos relâmpagos convectivos prevaleceram multiplicidade com valores entre 1 e 3. O valor máximo encontrado foi de 43 descargas de retorno para um mesmo relâmpago. Os relâmpagos estratiformes apresentaram a menor variação da multiplicidade. Esses resultados são consistentes com a Figura 3.6 (maior duração para os relâmpagos convectivos) e sugerem uma maior disponibilidade de cargas elétricas para serem repostas mais rapidamente na base do canal dos relâmpagos convectivos no interior das nuvens.



Figura 3.8 - Gráfico de *boxplot* da distribuição da multiplicidade (número de descargas de retorno por relâmpago) dos relâmpagos para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.

A próxima propriedade analisada neste estudo foi o intervalo de tempo entre as descargas de retorno de um mesmo relâmpago. Essa propriedade foi calculada considerando o intervalo de tempo transcorrido entre uma descarga de retorno e a subsequente descarga de um mesmo relâmpago. Assim, se um relâmpago possui três descargas de retorno, serão contabilizados o intervalo de tempo entre a primeira e a segunda descarga, e entre a segunda e a terceira descarga de retorno do relâmpago. As distribuições dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno são apresentadas na Figura 3.9. A distribuição dos valores do intervalo de tempo entre descargas de retorno é semelhante para os relâmpagos convectivos e mistos. Os limites superiores para ambas as distribuições foram de aproximadamente 295 ms e 289 ms e a mediana encontrada foram de 86 ms e 83 ms, respectivamente. Esses resultados estão em consonância com aquele encontrado por Williams et al. (2016). Esses autores encontraram uma duração média de aproximadamente 72 ms para os relâmpagos NS para a campanha CHUVA-Vale. Os relâmpagos estratiformes apresentaram as menores variações na distribuição desta propriedade. Ao analisar conjuntamente essa figura e as demais figuras discutidas anteriormente pode-se observar que os relâmpagos convectivos apresentaram as maiores durações entre as demais séries. Essa ocorrência pode ter como justificativa a observação que os relâmpagos convectivos possuem o maior número de descargas de retorno e o maior intervalo entre descargas de retorno. Essa observação sugere que os relâmpagos convectivos demoram mais tempo para repor as cargas elétricas na base do canal antes de iniciar a subsequente descarga de retorno do relâmpago.



Figura 3.9 - Gráfico de *boxplot* da distribuição do intervalo de tempo (ms) entre descargas de retorno de um mesmo relâmpago para os relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.

Os valores da polaridade dos relâmpagos serão separados de acordo com o valor do pico de corrente, em positivos e negativos. A Figura 3.10 mostra a distribuição da polaridade dos relâmpagos para as três classificações: convectivo, estratiforme e misto. A Figura 3.10 (a) mostra a distribuição considerando a polaridade de todas as descargas de retorno do relâmpago, enquanto a Figura 3.10 (b) mostra a distribuição considerando o pico de corrente da primeira descarga de retorno do relâmpago.

Os resultados mostram que os relâmpagos convectivos e mistos são predominantemente negativos. Os valores encontrados são superiores a 90 % da amostra dos eventos em ambos os gráficos. Em contrapartida, os relâmpagos estratiformes possuem uma predominância de polaridade positiva. A predominância da existência de relâmpagos convectivos com polaridade negativa, provavelmente esteja associado ao local de origem desses relâmpagos. Provavelmente esses relâmpagos são formados na camada mista da nuvem; camada qual está compreendida entre às isotermas de -10°C a -40°C, sendo o local de concentração das cargas elétricas negativas no interior da nuvem. Em contrapartida, os relâmpagos estratiformes têm origem em regiões estratiformes das sua nuvens. consequentemente o transporte cargas positivas deve predominar entre os relâmpagos dessa natureza (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Distribuição da frequência relativa (%) da polaridade positivo (barras na cor vermelha) e negativo (barras na cor azul) dos relâmpagos em função do tipo de relâmpago (convectivo, estratiforme e misto) considerando a polaridade (a) de todas as descargas de retorno do mesmo relâmpago e (b) da primeira descarga de retorno do relâmpago.

A próxima etapa deste trabalho foi avaliar o comportamento do pico de corrente em função dos tipos de relâmpagos, como indicado na Figura 3.11. A maior variação e intensidade nos valores de pico de corrente ocorreu entre os relâmpagos estratiformes. Os valores máximo e mínimo identificados na distribuição foram de aproximadamente +50 kA e -49,9 kA, respectivamente. Esses resultados são coerentes com o apresentado na Figura 3.10, em foi encontrado que ambas polaridades positiva e negativa pode ocorrer para os relâmpagos estratiformes. Considerando o módulo, os relâmpagos estratiformes possuem valores maiores de pico de corrente. Esta observação é nítida ao notar que os valores da mediana são de aproximadamente -15 kA e +30 kA para os relâmpagos convectivos e estratiformes, respectivamente. Estes resultados são bastantes consistentes com a literatura. Por exemplo, os resultados apresentados neste estudo mostram que os relâmpagos estratiformes em sua maioria possuem polaridade positiva; e na literatura é reconhecido que tipicamente relâmpagos positivos possuem pico de corrente em módulo maior que os relâmpagos negativos. Em contrapartida, entre os relâmpagos mistos e convectivos percebe-se a semelhança entre as distribuições de pico de corrente. Os resultados correspondem aos apresentados na Figura 3.10. A diferença no valor do pico de corrente das medianas foi de aproximadamente 0,9 kA. Entretanto, a presença de *outliers* verificada para ambos os tipos de relâmpagos em análise, indica que relâmpagos com maiores magnitudes podem ser encontrados dentro da amostra.



Figura 3.11 - Gráfico de *boxplot* da distribuição do pico de corrente (kA) dos relâmpagos classificados como: convectivo, estratiforme e misto. A caixa na cor cinza representa o número de relâmpagos pertencentes a cada classificação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou as propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos convectivos, estratiformes e mistos. A base de dados incluiu as observações obtidas durante a campanha CHUVA-Vale ocorrida entre novembro de 2011 e março de 2012 compreendendo a Região Metropolitana de São Paulo, Vale do Paraíba e cidades vizinhas. Esses dados incluíram as informações sobre os relâmpagos identificados pelas redes SPLMA e BrasilDAT e os campos de refletividade proveniente do radar banda-S do FCTH. O mapeamento tridimensional dos relâmpagos pela rede SPLMA permitiu a união entre as informações das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos fornecidos pela rede BrasilDAT. Este estudo mostra-se pioneiro no Brasil ao avaliar um extenso (81 mil relâmpagos) banco de dados de registros de relâmpagos combinando redes de relâmpagos em duas e três dimensões na região mais importante economicamente para o Brasil.

A maior amostra de relâmpagos ocorreu para os relâmpagos convectivos, correspondendo a 83 % do total de relâmpagos analisados. A formação dos relâmpagos convectivos esteve concentrada em regiões abaixo de 10 km de altura e esses relâmpagos são relativamente menores em comprimento e área entre os demais tipos de relâmpagos analisados. Adicionalmente, os relâmpagos convectivos são os que possuem a maior duração e possuem a maior quantidade de descargas de retornos e intervalo de tempo entre as descargas de retorno. Os relâmpagos convectivos analisados são predominantemente negativos e carregam as características de sua região de origem. Os relâmpagos estratiformes são menos frequentes em relação aos demais e a sua formação ocorre em altitudes mais baixas em relação aos demais tipos de relâmpagos. Além disso, os relâmpagos estratiformes possuem as maiores áreas e consequentemente as maiores variações no comprimento dos relâmpagos. Diferentemente dos relâmpagos convectivos, esses possuem uma multiplicidade menor. Em adição, os relâmpagos estratiformes possuem em sua maioria polaridade positiva e pico de corrente maiores em módulo em relação aos convectivos.

Não obstante, os relâmpagos mistos apresentaram características semelhantes aos relâmpagos convectivos. Caracterizados pela transição das fontes em regiões distintas da nuvem, este tipo de relâmpago foi menos frequente em relação

aos convectivos, mas possuem a mesma assinatura elétrica e transporte predominante de cargas negativas.

Os resultados mostraram que os relâmpagos carregam fortes traços das suas regiões de formação. Suas propriedades físicas e elétricas apresentadas exibiram as características dos relâmpagos durante a campanha CHUVA-Vale na região do Vale do Paraíba e cidades vizinhas. Como o número de amostras de relâmpagos estratiformes foi menor em relação aos convectivos e mistos, as análises mostradas poder sofrer influências. No entanto, os resultados encontrados neste estudo serão úteis para indicar quais propriedades dos relâmpagos são mais importantes, de modo a servirem como dados de entrada em modelos de previsão imediata do tempo, para previsão de relâmpagos e precipitação.

Para estudos futuros sugere-se a análise da evolução do ciclo das propriedades físicas e elétricas por tempestade e para os diferentes tipos de relâmpagos baseando-se em estudos de casos. Esta avaliação poderia ser realizada considerando diferentes tipos de tempestades, que possuem diferentes graus de organização. Adicionalmente, seria importante avaliar as propriedades dos hidrometeoros fornecidas por radar polarimétrico. Espera-se que nas próximas décadas o Brasil possa ter redes LMAs operacionais em diferentes regiões, para assim ser possível uma intercomparação entre as propriedades elétricas e físicas tridimensionais das nuvens de diferentes localidades.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.; 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.

BELTRAN, R. P. Características da precipitação e atividade elétrica de tempestades severas da Região Metropolitana de São Paulo. 2017. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

BOCCIPPIO, D. J.; CUMMINS, K. L.; CHRISTIAN, H. J.; GOODMAN, S. J. Combined satellite-and surface-based estimation of the intracloud–cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 1, p 108-122, 2001.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, A. E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal Of Geophysical Research**, v.103, n.D8, p.9035–9044, 1998.

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. São José dos Campos, 1995. Disponível em: <(http://www.ccst.inpe.br/projetos/brasildat/)>. Acesso em: 07 de junho de 2020.

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

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.

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-indutive or non-inductive. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.38, p.2470-2484, 1981.

LANG, Timothy J.; RUTLEDGE, Steven A.; WIENS, Kyle C. Origins of positive cloudto-ground lightning flashes in the stratiform region of a mesoscale convective system. **Geophysical research letters**, v.31, n.10, 2004.

LANG, T. J.; RUTLEDGE, S. A. Kinematic, microphysical, and electrical aspects of an asymmetric bow-echo Mesoscale Convective System observed during STEPS 2000. **Journal of Geophysical Research**, v.113, n.D8, 2008.

LEWIS, E. A.; HARVEY, R. B.; RASMUSSEN J. E. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin, **Journal of Geophysical Research**, v.65, n.7, p.1879-1905, 1960.

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

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.

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.

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.

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

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.

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

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

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.

SILVA, M. V de. Propriedades físicas e elétricas de relâmpagos estimadas por lightning mapping array. 2018. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

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. Riming electrification as a charge generation mechanism in Thunderstorms. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.35, p.1536-1548, 1978.

VAREJÃO, Mário Adelmo. Meteorologia e climatologia. Recife, 2006. 121 p.

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.

WANG, F., LIU, H., DONG, W., ZHANG, Y., YAO, W., ZHENG, D. Radar Reflectivity of Lightning Flashes in Stratiform Regions of Mesoscale Convective Systems. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**. V. 124, p.14,114–14,132, 2019.

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

WILLIAMS, E. R.; WEBER, M. E.; ORVILLE, E. E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.D11, p.13213-13220, 1989.

WILLIAMS, E.; MUSHTAK, V.; ROSENFELD, D.; GOODMAN, S.; BOCCIPPIO, D. Thermodynamic conditions favorable to superlative thunderstorm updraft, mixed phase microphysics and lightning flash rate. **Atmospheric Research**, v.76, p.288-306, 2005.

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, 2016.

WILSON, C. T. R. On Some Determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v.92, p.555-574, 1916.