



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.27.17.46-TDI

**COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VISÍVEIS DE
RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS PARA
DIFERENTES DIAS DE TEMPESTADE NO SUDESTE
DO BRASIL, OBSERVADOS POR UMA REDE DE
CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE**

Larissa Antunes da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 26 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FL6DPS>>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.27.17.46-TDI

**COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VISÍVEIS DE
RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS PARA
DIFERENTES DIAS DE TEMPESTADE NO SUDESTE
DO BRASIL, OBSERVADOS POR UMA REDE DE
CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE**

Larissa Antunes da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 26 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FL6DPS>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Larissa Antunes da.
S38c Comparação de características visíveis de relâmpagos nuvem-solo negativos para diferentes dias de tempestade no sudeste do Brasil, observados por uma rede de câmeras de alta velocidade / Larissa Antunes da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2014.
xxviii + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.27.17.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva.

1. relâmpagos. 2. câmeras de alta velocidade. 3. rede de detecção de relâmpagos. 4. radar meteorológico. I.Título.

CDU 551.594



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

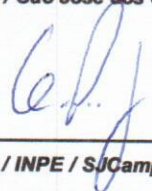
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior



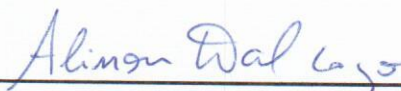
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Alisson Dal Lago



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Vandoir Bourscheidt



Convidado(a) / UFSCAR / São Carlos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Larissa Antunes da Silva**

São José dos Campos, 26 de Fevereiro de 2014

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre.”

Albert Einstein (1879 – 1955).

A meus pais, familiares e amigos que sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Rafael José da Silva e Leonilda Pereira Antunes da Silva, irmãos, Letícia Antunes da Silva Mariano e Danilo Rafael da Silva e sobrinhos, Gabriel Antunes Mariano e Samuel Antunes Mariano, pelo amor, paciência, compreensão, apoio e incentivo.

Aos amigos que fazem parte desta trajetória, sempre acreditaram em mim e me deram força para continuar. São muitos nomes para mencionar, mas cada um sabe a importância que tem na vida.

Aos meus orientadores Dr. Osmar Pinto Jr. e Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva, pelo conhecimento transferido, por acreditarem em mim, pela dedicação a minha dissertação e pelo carinho.

A todos os membros do grupo ELAT que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Aos docentes do curso de Geofísica Espacial pelo conhecimento transmitido.

Ao INPE por providenciar a estrutura de trabalho.

À FAPESP pelo auxílio financeiro através do projeto RAMMER, processo número 2010/01742-2.

Ao CNPQ, pelo auxílio financeiro sem o qual teria sido impossível realizar este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho consiste em analisar algumas das características visíveis dos relâmpagos nuvem-solo negativos, separados por dia de tempestade. Os dados foram obtidos utilizando uma rede de câmeras de alta velocidade que fazem parte projeto RAMMER (Rede Automatizada Multi-Câmera para o Monitoramento e Estudo de Raios). Muitos estudos já foram realizados utilizando câmeras de alta velocidade, porém a quantidade de câmeras observando a mesma região, utilizadas no projeto, foi inédita e proporcionou uma área de cobertura suficientemente grande para aumentar o número de relâmpagos filmados a partir da mesma tempestade. As observações foram feitas durante o verão de 2012/2013. Os cinco dias de tempestade que tiveram o maior número de relâmpagos registrados foram escolhidos para serem analisados e somaram 361 relâmpagos nuvem-solo negativos. Quando a análise foi feita por dia de tempestade, foram encontradas diferenças significativas, o dia com menor amostra teve 47 relâmpagos nuvem-solo negativos registrados e o dia com maior amostra teve 117 relâmpagos nuvem-solo negativos. Além do tamanho da amostra, as características analisadas também apresentaram diferenças, a multiplicidade média variou entre 2,8 e 5,1, a média geométrica dos intervalos entre as descargas de retorno variou entre 47,8 ms e 69,5 ms e a duração variou entre 193,1 ms e 358,5 ms. O Método de reamostragem Monte Carlo mostrou que o tamanho da amostra não teve influência nas diferenças encontradas e a análise meteorológica mostrou que as condições de tempo foram as mesmas para todos os dias. Para entender a variação entre as características dos relâmpagos nuvem-solo negativos, foram utilizados os dados da refletividade de radar, na altura de 5 km e estimada a área de contorno 35 dBZ, que foi a área considerada como uma estimativa da região principal de cargas negativas.

COMPARISON OF VISIBLE CHARACTERISTICS OF NEGATIVE CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING FOR DIFFERENT DAYS OF TUNDERSTORM IN SOUTHEASTERN OF BRAZIL, OBSERVED BY A NETWORK OF HIGH SPEED CAMERAS

ABSTRACT

The present study consists of analyzing some of the visible characteristics of the negative cloud-to-ground lightning, separated by thunderstorm day. The data were obtained using a network of high-speed cameras that are part of the project RAMMER (Network Automated Multi-Camera Monitoring and Study of Lightning). There are many studies using high-speed cameras, but the number of cameras observing the same region, as used in this work, was not published in the literature, and provided an area of coverage large enough to increase the number of lightning filmed from the same thunderstorm. The observations were made during the summer of 2012/2013. Five thunderstorm days that had the largest number of detected lightning, were chosen to be analyzed and totaled 361 negative cloud-to-ground lightning. When the analysis was separated by thunderstorm day, significant differences were found, the day with smaller sample size had 47 lightning registered and day with larger sample size had 117. Besides the size of the sample, the analyzed characteristics of the events also showed differences, the average of multiplicity ranged between 2.8 and 5.1, the geometric mean of the interstroke intervals ranged between 47.8 and 69.5 ms, lastly the geometric mean of the flash duration ranged between 193.1 and 358.5 ms. The resampling Monte Carlo method showed that the sample size did not influence in the differences and meteorological analysis showed that weather conditions were the same for all days. In order to understand the variation between the characteristics of the lightning, data from reflectivity of the cloud were used, with height of 5 km and was estimated the contour of the area of 35 dBZ, which was considered as an estimate of the main region of negative charge.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Condições de estabilidade e instabilidade da parcela de ar.....	6
Figura 2.2 - Exemplo de uma nuvem cumulonimbus que tem formato de bigorna.....	7
Figura 2.3 - Estágios de uma nuvem de tempestade. (a) Desenvolvimento; (b) Maturidade; (c) Dissipação.....	8
Figura 2.4 - Escala da duração e dimensão de diferentes tempestades.....	9
Figura 2.5 - Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre grãos de gelo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente.....	10
Figura 2.6 - Representação da estrutura elétrica simplificada de uma cumulonimbus considerando a estrutura tripolar da nuvem.....	11
Figura 2.7 - Modelo da estrutura elétrica multipolar de uma nuvem de tempestade..	12
Figura 3.1 - Os principais tipos de relâmpagos, nuvem-nuvem, intra-nuvem, solo- nuvem, nuvem-ar e nuvem-solo.	14
Figura 3.2 - Sequência temporal dos dois primeiros processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.....	15
Figura 3.3 - Desenvolvimento do líder escalonado registrado por uma câmera de alta velocidade.	16
Figura 3.4 - Sequencia temporal do terceiro e quarto processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.....	16
Figura 3.5 - Processo de conexão e primeira descarga de retorno do relâmpago que foram registrados por uma câmera de alta velocidade.....	17
Figura 3.6 - Sequencia temporal do quinto e sexto processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.....	18
Figura 3.7 - Processos k que ocorreram na base da nuvem.....	19

Figura 3.8 - Desenvolvimento do líder contínuo, registrado por uma câmera de alta velocidade.	20
Figura 3.9 - Exemplo de descarga de retorno bifurcada.	21
Figura 3.10 - Ilustração de um filamento condutor imerso em um campo elétrico. Na ponta positiva os elétrons móveis disponíveis convergem em direção a carga positiva e na extremidade negativa os elétrons móveis divergem.	23
Figura 3.11 - Exemplo de uma aeronave que iniciou um relâmpago com líder bidirecional.	23
Figura 3.12 - Desenvolvimento do líder bidirecional para um relâmpago nuvem-solo negativo.	24
Figura 3.13 - Circuito equivalente a um canal de relâmpago nuvem-solo. A fonte de corrente (I) em paralelo com a capacitância do canal por unidade de comprimento (C) e a resistência não linear por unidade de comprimento (R).	25
Figura 3.14 - Diagrama de estabilidade para um canal de relâmpago representado pelo circuito equivalente da Figura 3.13. Comportamento instável com interrupção da corrente na parte superior esquerda da linha de estabilidade; comportamento estável com corrente contínua na parte inferior direita da linha de instabilidade.	26
Figura 4.1- Câmera de alta velocidade Phantom v9.1.	27
Figura 4.2 - Involucro que protege os equipamentos. Equipamento que foi instalado na base da torre de telecomunicação da emissora de televisão Vanguarda em São José dos Campos.	28
Figura 4.3 - Localização dos quatro pontos de filmagem.	29
Figura 4.4 - O círculo vermelho representa o raio de 250 km de visada de radar de São Roque.	32

Figura 5.1 – Exemplo de um relâmpago que ocorreu no dia 18 e foi registrado ao mesmo tempo por 3 câmeras diferentes.....	34
Figura 6.1 - Distribuição da multiplicidade para o dia 18. N é o número de relâmpagos NS-, MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da distribuição da multiplicidade.....	38
Figura 6.2 - Distribuição do tempo de intervalo entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.....	39
Figura 6.3 - Distribuição da duração dos relâmpagos, os NS-simples (12) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	39
Figura 6.4 - Distribuição da multiplicidade para o dia 19. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética da multiplicidade.	40
Figura 6.5 - Distribuição dos tempos de duração dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.....	41
Figura 6.6 - Distribuição da duração dos relâmpagos. Os NS- simples (17) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	41
Figura 6.7 - Distribuição da multiplicidade para o dia 22. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica.....	42
Figura 6.8 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.....	43
Figura 6.9- Distribuição da duração dos relâmpagos. Os NS-simples (20) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	43

Figura 6.10 - Distribuição da multiplicidade para o dia 06. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da multiplicidade.....	44
Figura 6.11 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.....	45
Figura 6.12 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-. Os NS - simples (18) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	45
Figura 6.13 - Distribuição da multiplicidade para o dia 08. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética da multiplicidade e MG é a média geométrica da multiplicidade.	46
Figura 6.14 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.....	47
Figura 6.14 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-, os simples (16) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	47
Figura 6.15 - Distribuição da multiplicidade para os cinco dias de tempestade. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da multiplicidade.	48
Figura 6.16 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa o número de DRs e MG representa a média geométrica dos intervalos entre as DRs.....	49
Figura 6.17 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-, os NS- simples (83) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.	49

Figura 5.18 - Relâmpago com duração de 1800 ms. A primeira imagem mostra a 11° DR dentro do campo de visada da câmara e a segunda imagem mostra somente a luminosidade da 12° DR comprovada pela rede de detecção.	52
Figura 7.1 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 18/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 20h30min UT.	56
Figura 7.2 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 19/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 18h00min UT.	56
Figura 7.3 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 22/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 21h00min UT.	57
Figura 7.4 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 06/03/2013. Imagem do satélite GOES13 às 21h00min UT.	57
Figura 7.5 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 08/03/2013. Imagem do satélite GOES13 às 19h30min UT.	58
Figura 7.6- Exemplo de uma figura gerada pelo mapinfo. Imagem georreferenciada do radar junto com os dados da rede de detecção. Os quatro alfinetes vermelhos (📌) representam as localizações das RAMMERS, os pontos brancos (□) representam a localização dos relâmpagos que foram detectados pela rede e os pontos cruzados (⊗) representam a localização dos relâmpagos que foram detectados pela rede e registrados pelas câmeras.	59
Figura 7.7 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 18/02. A célula menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 207,5 km ² e a célula maior apresentou área de 591,0 km ² .	61
Figura 7.8 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 19/02. A célula menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 227,8 km ² e a célula a maior apresentou área de 799,3 km ² .	61

- Figura 7.9 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 22/02. A célula menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 73,0 km² e a célula com a maior apresentou área de 306,4 km². 62
- Figura 7.10 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 06/03. A célula menor apresentou área de contorno de 35dBZ de aproximadamente 146,7 km² e a célula maior apresentou área de 512,6 km². 62
- Figura 7.11 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 08/03. A célula menor apresentou área de contorno de 35dBZ de aproximadamente 148,8 km² e a célula maior apresentou área de 683,0 km². 63
- Figura 8.1 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação à multiplicidade. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi $R = 0,80$. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação..... 66
- Figura 8.2 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação à duração. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi $R = 0,93$. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação..... 66
- Figura 8.3 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação aos intervalos entre as DRs. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi $R = 0,70$. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação..... 67
- Figura 8.4 - Gráfico de dispersão do intervalo entre DR em relação à multiplicidade. . 68
- Figura 8.5 - Gráfico de dispersão duração em relação à multiplicidade dos relâmpagos. R é o ajuste feito com base nos valores máximos e mínimos..... 69
- Figura 8.8 - Sequência de quadros de um vídeo de um relâmpago bipolar. As imagens representam as descargas números 1, 2, 3 e 4. As linhas vermelhas indicam o desenvolvimento do líder positivo..... 70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 5.1 - Relação de vídeos filmados por cada RAMMER (R), dos relâmpagos registrados por cada RAMMER (R) e o total de relâmpagos por dia de tempestade.	34
Tabela 6.1 – Resumo dos resultados obtidos para as características de NS-. A sigla MG representa a média geométrica.	37
Tabela 5.2 - Resumo dos parâmetros analisados por dia de tempestade e para todos os dias.	50
Tabela 7.1- Intervalo de erro padrão da média de cada característica dos relâmpagos considerado para análise dos resultados do método de Monte Carlo.....	53
Tabela 7.2- Porcentagem de vezes que a distribuição de cada característica foi reproduzida pelo Monte Carlo.	53
Tabela 8.1- Relação entre a multiplicidade, intervalo e duração da menor e maior área de 35 dBZ de cada dia de tempestade.	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
VHS	Video Home System
LLS	Lightning Location System
RAMMER	Rede Automatizada Multi-câmeras para o Monitoramento e Estudo de Relâmpagos
BrasilDAT	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
Rindat	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
Cb	Cumulunimbus
CINE	Convective Inhibition Energy
CAPE	Convective Available Potential Energy
IN	Relâmpago Intra-Nuvem
EN	Relâmpago Entre Nuvens
DA	Descarga para o Ar
SN	Relâmpago Solo-Nuvem
NS	Relâmpago Nuvem-Solo
NS-	Relâmpago Nuvem-Solo Negativo
NS+	Relâmpago Nuvem-Solo Positivo
ELF	Extreme Low Frequency
VHF	Very Low Frequency
K	Kelvin
atm	Atmosfera
DR	Descarga de Retorno
Descarga K	Processo rápido de carga do canal previamente ionizado
Descarga J	Processo lento de rearranjo de cargas dentro da nuvem
m/s	Metros por Segundo
CC	Corrente Contínua
ms	Milissegundo
A	Ampères
C	Coulombs

t1	Tempo 1
t2	Tempo 2
t3	Tempo 3
t4	Tempo 4
t5	Tempo 5
RS channel	Return Stroke Channel
I	Corrente
C	Capacitância
R	Resistência
L	Comprimento
km	Quilômetro
TBytes	Tera Bytes
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ns	Nanossegundos
qps	Quadros Por Segundo
GB	Giga Byte
R1	RAMMER 1
R2	RAMMER 2
R3	RAMMER 3
RM	RAMMER Móvel
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba
ENLS	Earth Networks
DSP	Digital Signal Processor
hz	Hertz
Mhz	Mega Hertz
TOA	<i>Time of Arrival</i>
LPATS	<i>Lightning Position and Tracking System</i>
IMPACT	<i>IMProved Accuracy from Combined Technology</i>
MDF	<i>Magnetic Direction Finder</i>
LF	Low Frequency
Radar	<i>Radio Detection and Ranging</i>

Z	Refletividade do radar
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ghz	Giga Hertz
cm	Centímetro
CAPPI	<i>Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
dBZ	<i>Decibéis do parâmetro z</i>
GOES13	Geostationary Operational Environmental Satellite 13
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAS	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
km ²	Quilômetros Quadrados

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. FORMAÇÃO DAS TEMPESTADES	5
2.1. Desenvolvimento da nuvem	5
2.2. Estágios da nuvem de tempestade	7
2.3. Processo de eletrificação da nuvem	9
3. RELÂMPAGOS	13
3.1. Relâmpago nuvem-solo negativo.....	15
3.2. Desenvolvimento do líder	22
3.3. Instabilidade do canal segundo Heckman.....	24
4. INSTRUMENTAÇÃO	27
4.1. Estações de observação	27
4.2. Rede de detecção de descargas atmosféricas	29
4.3. Radar meteorológico.....	30
5. METODOLOGIA.....	33
5.1. Aquisição dos dados.....	33
5.2. Método de Monte Carlo.....	35
6. REDUÇÃO DOS DADOS	37
6.1. Dia 18 de fevereiro de 2013	37
6.2. Dia 19 de fevereiro de 2013	40
6.3. Dia 22 de fevereiro de 2013	42
6.4. Dia 06 de março de 2013	44

6.5.	Dia 08 de março de 2013	46
6.6.	Todos os relâmpagos.....	48
6.7.	Discussão sobre os resultados preliminares	50
7.	ANÁLISE DOS DADOS.....	53
7.1.	Método de reamostragem Monte Carlo.....	53
7.2.	Análise meteorológica das tempestades	55
7.3.	Análise dos dados de radar e da rede de detecção	58
8.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS FINAIS.....	65
9.	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

Conhecer as características dos relâmpagos nuvem-solo é muito importante, pois podem nos afetar diretamente. Em Rakov e Huffines (2003) os autores mostram, por exemplo, o quão importante é conhecer a razão entre a multiplicidade dos relâmpagos para proteção de linhas de transmissão.

Além de causarem prejuízos em torno de bilhões de reais (PINTO; PINTO, 2008) os relâmpagos são responsáveis também por danos à vida humana. Estudos mostram que no Brasil, aproximadamente 130 pessoas morrem a cada ano, devido a acidentes envolvendo relâmpagos (CARDOSO et al., 2011). Entender as características dos relâmpagos que ocorrem no Brasil é essencial não só para ciência, mas também para proteção em caráter social e tecnológico.

Observações ópticas de relâmpagos permitem estudar com mais precisão algumas de suas características visíveis que não seriam possíveis de serem analisadas utilizando outros instrumentos, como o campo elétrico e sistemas de detecção.

A técnica de utilizar câmeras para estudar relâmpagos teve início após a criação da câmera de filme corrido que foi desenvolvida por Boys (1926). Essa tecnologia continuou sendo usada por diversos pesquisadores durante várias décadas. (SCHONLAND; COLLENS, 1934; MALAN; SCHONLAND, 1947; SCHONLAND, 1956; BERGER, 1967; ORVILLE; IDONE, 1982; IDONE et al., 1984; JORDAN et al., 1992, 1997).

Com o passar do tempo, os estudos passaram a utilizar câmeras de VHS convencionais com outros instrumentos complementares, como sensores de campo elétrico e dados de redes de detecção (e.g., RAKOV et al., 1994; PARKER; KRIDER, 2003; RAKOV; UMAN, 2003, BIAGI et al., 2007; FLEENOR et al., 2009). Porém, este método não é adequado para efetuar uma análise precisa de alguns dos parâmetros visíveis dos relâmpagos, pois o tempo entre quadros é de 33ms (30 fps, *frames per second*, ou seja, 30 quadros por

segundo) (RAKOV; HUFFINES, 2003). Além da perda eventual de descargas de retorno individuais de um mesmo relâmpago, o sistema VHS (*Video Home System*) convencional não é capaz de registrar o desenvolvimento do líder escalonado ou a duração de correntes contínuas quando ocorrem em intervalo de tempo inferior a 33 ms.

Desde meados dos anos 90 (MAZUR et al., 1995, 1998), o uso de câmeras de alta velocidade vem fornecendo imagens com alta resolução temporal para filmar relâmpagos e é capaz de obter centenas de quadros por segundo ou mais. Os dados obtidos pelas câmeras de alta velocidade permitem o estudo mais detalhado de algumas das principais características dos relâmpagos: a multiplicidade, o intervalo de tempo entre as descargas de retorno, a duração da corrente contínua e do próprio relâmpago, os múltiplos pontos de contato no solo e as descargas de retorno bifurcadas (SABA et al., 2006; SARAIVA et al., 2010; BALLAROTTI et al., 2012).

Estudos sobre as características dos relâmpagos foram feitos por diversos autores. Kitagawa et al. (1962) compararam os dados de campo elétrico com registros de câmera de filme corrido de 193 relâmpagos ocorridos durante 3 tempestades em New México, E.U.A. Rakov et al. (1994) observaram algumas propriedades de 76 relâmpagos registrados com campo elétrico e filmagens de câmera de televisão ocorridos na Florida, E.U.A. Cooray e Perez (1994) fizeram medições com campo elétrico de 137 relâmpagos durante 2 tempestades ocorridas em Uppsala, Suécia. Cooray e Jayaratne (1994) realizaram um estudo sobre as características de 81 relâmpagos durante 2 tempestades registradas com campo elétrico, ocorridas em Colombo, Sri Lanka. Saba et al. (2006) estudaram 233 relâmpagos nuvem-solo negativos obtidos durante 27 tempestades, registrados com câmeras de alta velocidade e correlacionados com rede de detecção de relâmpagos em São José dos Campos, Brasil. Saraiva et al. (2010) analisaram as características dos raios produzidos por tempestades em dois regimes climáticos diferentes (Tucson, E.U.A e São José dos Campos, Brasil), utilizando a mesma instrumentação, onde os parâmetros foram obtidos através de gravações de câmera de alta

velocidade e dados de sistema de localização de relâmpagos (LLS), no total foram observados 432 raios em diversas tempestades. E por fim, Ballarotti et al. (2012) fizeram uma análise de 883 relâmpagos nuvem-solo negativos referentes a 102 dias de tempestades que ocorreram entre Janeiro de 2003 a Dezembro de 2010, na região do Vale do Paraíba, Brasil. Todos os relâmpagos foram observados com câmera de alta velocidade.

A câmera de alta velocidade tornou-se uma das principais ferramentas para estudos das características visíveis dos relâmpagos, porém, toda técnica tem suas limitações. Dada à construção desse tipo de câmera, não é possível gravar ao mesmo tempo em que a câmera transfere os arquivos para o PC. Sendo assim, o tempo entre filmagens dependerá do tamanho do arquivo. Com isso as câmeras de alta velocidade tendem a observar apenas uma pequena amostragem do conteúdo total de relâmpagos de cada tempestade. Portanto, o uso de apenas uma câmera de alta velocidade não permite que se crie um banco de dados significativo separados por dia de tempestade.

Para esse objetivo foi criado o projeto chamado RAMMER que significa Rede Automatizada Multi-câmera para o Monitoramento e Estudo de Raios (SARAIVA et al. 2011). A RAMMER é uma rede de câmeras de alta velocidade que tem como objetivo a observação de tempestades em diversos ângulos e de forma automatizada, aumentando o número de registros de relâmpagos a cada tempestade.

As observações deste trabalho foram feitas durante o verão de 2012/2013 na cidade de São José dos Campos e região próxima. A rede RAMMER, utilizou quatro sensores estrategicamente posicionados para cobrir a área de interesse. Foram escolhidos os cinco dias de tempestade que tiveram maior número de relâmpagos filmados.

Todos os trabalhos citados anteriormente usaram diferentes técnicas de observação e foram feitos em locais diferentes, todas as análises levaram em conta apenas o número total de relâmpagos registrados. No caso deste trabalho o número de câmeras observando a mesma região permitiu a

aquisição de uma base de dados significativa para diferentes dias de tempestade.

Objetivo:

- Analisar e comparar as características dos relâmpagos nuvem-solo negativos por dia de tempestade.
- Além da análise visual dos dados obtidos pelas câmeras, aplicar o Método de Monte Carlo nas amostras dos relâmpagos referentes a cada dia para verificar se o tamanho de cada amostra influenciou nos resultados obtidos.
- Utilizar os dados de refletividade das nuvens fornecidos pelo radar meteorológico para tentar explicar como o comportamento das células de tempestade, que deram origem aos relâmpagos filmados, teve influência sobre as características encontradas. A análise foi feita com o auxílio de imagens de satélite, redes de detecção e localização de relâmpagos, BrasilDAT (Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas) e RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas), dados de radar meteorológico e um programa chamado Mapinfo (software de mapeamento e análise geográfica baseado em Windows para aplicações de especialistas em inteligência de localização), utilizado para mapear a refletividade da nuvem e o local onde ocorreram os relâmpagos.

2. FORMAÇÃO DAS TEMPESTADES

Desde o século XVIII, sabe-se que os relâmpagos são descargas elétricas que acontecem devido ao acúmulo de cargas elétricas que ocorre em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de nuvens de tempestade, que são produzidas por uma ou mais nuvens Cumulonimbus (Cb) que tem como principal característica os movimentos verticais fortes e intensa precipitação.

2.1. Desenvolvimento da nuvem

Nuvem pode ser considerada qualquer conjunto visível de gotículas de água ou partículas de gelo em suspensão na atmosfera. O processo de formação de uma nuvem de tempestade depende da umidade do ar, do grau de instabilidade vertical da atmosfera, e de forçantes que são mecanismos dinâmicos que empurram a parcela de ar para cima.

A umidade do ar está relacionada com a quantidade de vapor d'água existente nele e pode ser medida pela massa de vapor d'água por unidade de volume de ar (densidade). O ambiente é considerado saturado quando possui a quantidade máxima possível de vapor d'água que pode conter em uma determinada temperatura (VIANELLO, 2006).

O grau de instabilidade vertical da atmosfera está associado ao comportamento de uma parcela de ar que sofre deslocamento vertical a partir de uma perturbação inicial (PINTO JR., 2000). A atmosfera é considerada estável quando a temperatura da parcela torna-se mais fria que a temperatura da atmosfera. Com isso sua densidade aumenta e o sentido do movimento é revertido, inibindo que qualquer movimento vertical se inicie. Por outro lado, a atmosfera é considerada instável quando a temperatura da parcela continua maior que a da atmosfera, tornando-se cada vez menos densa e afastando-se cada vez mais da posição inicial. Porém, a atmosfera apresenta-se frequentemente como condicionalmente estável, sendo estável nos primeiros quilômetros a partir do solo, até uma altitude denominada nível de convecção

livre. E instável a partir dessa altura até determinada altura que irá definir o topo das nuvens, denominado nível de equilíbrio (PINTO JR., 2000).

A CINE marcada na Figura 2.1 é conhecida como energia de inibição da convecção e a área marcada de azul representa a energia necessária que deve ser fornecida a uma parcela de ar para que ela supere a região estável e atinja o nível de convecção livre. Essa energia vinda das forçantes pode ter origem nas frentes, brisas marítimas, vento soprando em direção a uma montanha, ilhas de calor, entre outras.

A CAPE também marcada na Figura 2.1 é conhecida como energia potencial convectiva disponível e é proporcional à velocidade das correntes de ar dentro da nuvem. A área marcada de vermelho representa a energia que é fornecida à parcela de ar pela atmosfera para que continue seu movimento de subida.

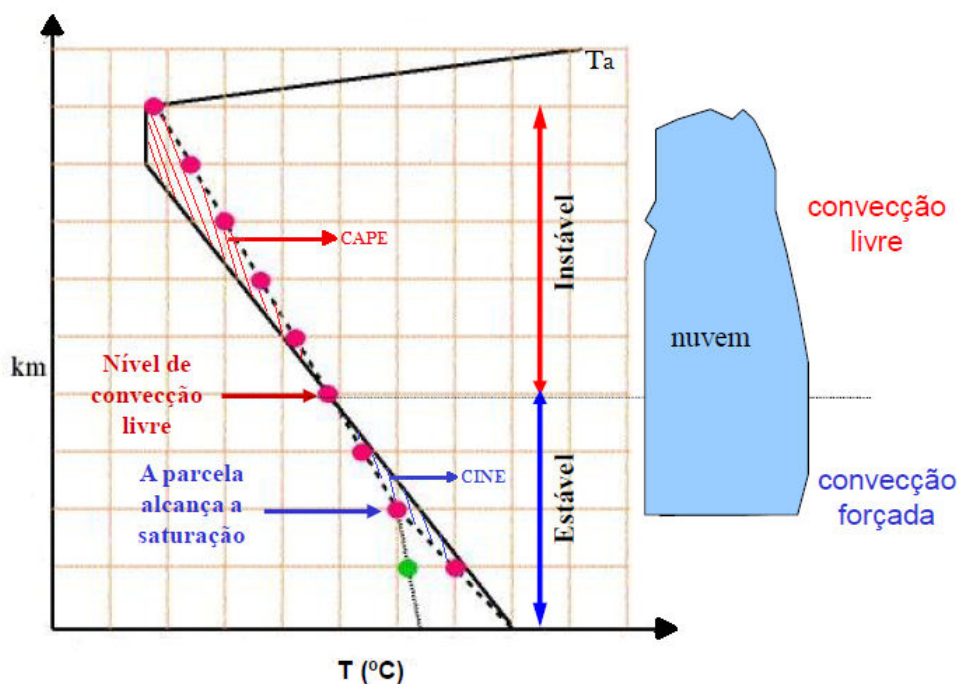


Figura 2.1 - Condições de estabilidade e instabilidade da parcela de ar.
Fonte: Adaptada de Sacuraji (2012).

Segundo Pinto e Pinto (2008) as nuvens de tempestade podem ser classificadas em dois tipos: isoladas, conhecidas como tempestade local ou em grupos, formando tempestades organizadas que costumam ser mais intensas. Além dos relâmpagos as tempestades provocam ventos fortes e precipitação

de granizo. A nuvem Cumulonimbus (Cb) é uma nuvem volumosa, muito densa, com grande desenvolvimento vertical, assumindo a configuração de uma bigorna. A base de uma Cb pode situar-se entre 1 e 3 km dependendo da umidade relativa do ar próximo ao solo e costuma ser relativamente plana. O topo atinge em média 15 km de altura, eventualmente estendendo até a tropopausa onde sofre espalhamento das partículas de gelo ao atingirem o nível de equilíbrio.



Figura 2.2 - Exemplo de uma nuvem cumulonimbus que tem formato de bigorna.

Fonte: Carn (2009).

2.2. Estágios da nuvem de tempestade

Uma tempestade pode durar em média de uma a duas horas. Na etapa de desenvolvimento a nuvem está mais quente que o ar ao seu redor, as correntes são predominantemente ascendentes dentro da nuvem, com velocidade máxima no topo central. Com o crescimento vertical, uma nuvem alcança níveis em que a temperatura encontra-se abaixo da temperatura de congelamento. A essa altura começam a coexistir gotículas d'água e cristais de gelo.

O acúmulo de água e gelo é tanto que as gotículas e cristais de gelo aumentam de tamanho e seu peso passa a superar as correntes ascendentes e começam a cair no interior da nuvem. Inicia-se uma nova fase da evolução da nuvem de

tempestade, o aparecimento de correntes descendentes e com isso a nuvem atinge a maturidade. Durante a maturidade as correntes descendentes predominam sobre as ascendentes e é nesse estágio que costumam ocorrer chuvas intensas e relâmpagos. A etapa de dissipação da nuvem é quando o movimento de ar é quase exclusivamente descendente, provocando um esfriamento da nuvem em relação ao ar que está ao seu redor, a chuva decresce em intensidade e a nuvem eventualmente se dissipa.

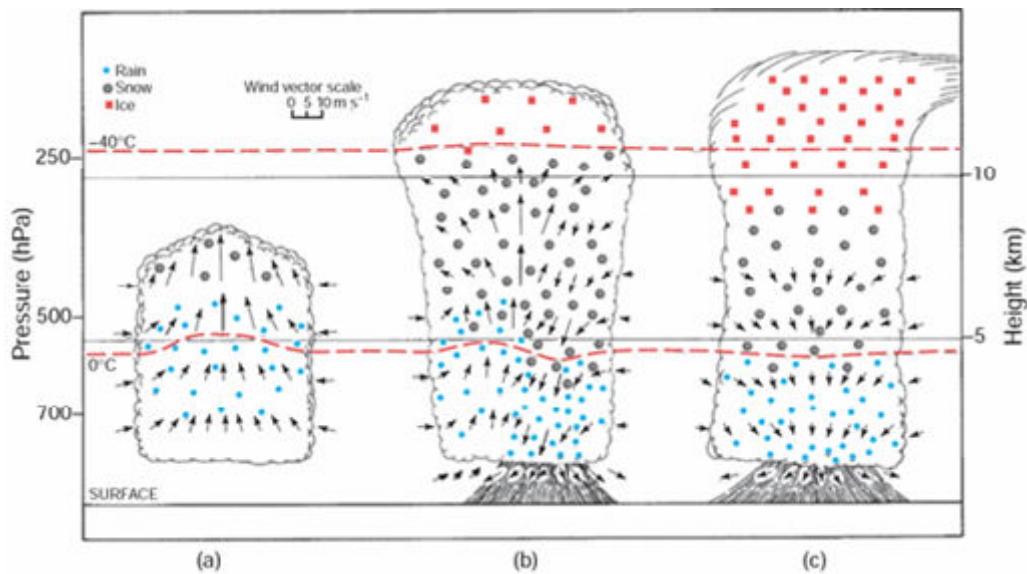


Figura 2.3 - Estágios de uma nuvem de tempestade. (a) Desenvolvimento; (b) Maturidade; (c) Dissipação.

Fonte: Wallace e Hobbs (2006).

Uma tempestade isolada pode ser formada por apenas uma célula, sendo denominada tempestade unicelular. Quando várias células em estágios de formação diferentes se fundem, esta será denominada de tempestade multicelular. Porém uma única célula pode atingir centenas de quilômetros de diâmetro e alturas de 20 km. Essas tempestades são chamadas de supercelulares (IRIBARNE e CHO, 1980).

Frente é uma zona de transição entre duas massas de ar com diferentes densidades. Associadas a elas ocorre à formação de ondas frontais provocando um distúrbio ao longo da frente fazendo com que o ar frio de uma massa penetre por baixo do ar quente da outra, iniciando a convecção.

Sistemas convectivos de mesoescala são tempestades organizadas e geralmente são maiores que as tempestades isoladas, duram mais tempo e costumam apresentar duas regiões distintas. Uma região convectiva caracterizada por forte convecção e grande altura do topo da nuvem e uma região estratiforme que se caracteriza por uma camada de nuvens de grande extensão horizontal e menos altura que o topo.

Linhas de tempestade são formadas por tempestades individuais que se movem próximas umas das outras, sem interagirem entre si. Linhas de instabilidade são sistemas de nuvens de tempestade que interagem entre si pela região estratiforme e podem estender-se por centenas de quilômetros e podem durar várias horas.

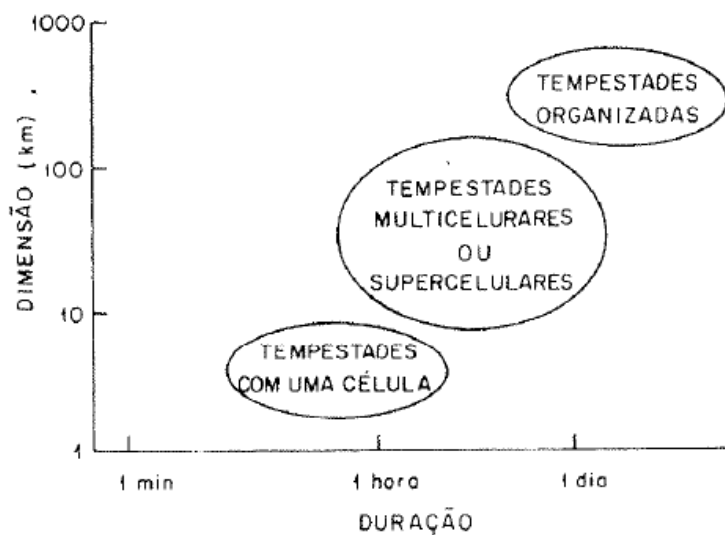


Figura 2.4 - Escala da duração e dimensão de diferentes tempestades.

Fonte: Pinto e Pinto (2000).

2.3. Processo de eletrificação da nuvem

Ainda não há uma teoria definitiva que explique a eletrificação da nuvem. A estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade é bastante complexa, pois é resultado de processos microfísicos e microfísicos que ocorrem simultaneamente no interior da nuvem.

Acredita-se que o processo microfísico de eletrificação da nuvem surja da colisão entre partículas de gelo, água e granizo (SAUNDERS, 1995). Os

detalhes da transferência de carga durante as colisões não são totalmente conhecidos. Esse processo é chamado de indutivo e ocorre quando o campo elétrico atmosférico, externo, polariza as partículas maiores (granizo) e durante o movimento de descida, essas partículas colidem com partículas menores (cristais de gelo), após a colisão o granizo fica carregado negativamente e o cristal de gelo fica carregado positivamente.

Em outro processo microfísico, chamado de termoeletrico, admite-se que a temperatura no local da colisão tem um papel fundamental na separação de cargas dentro da nuvem. Existe uma temperatura crítica chamada de temperatura de inversão de carga. Estima-se que essa temperatura seja em torno de -15°C a aproximadamente 6 km de altitude, como mostra a Figura 2.5. A temperatura de inversão depende do tamanho das partículas e da velocidade de impacto durante a colisão e coincide com a temperatura do centro de cargas negativas (RAKOV; UMAN, 2003). Acima da temperatura de inversão de cargas, durante o movimento de descida, o granizo transfere cargas negativas para o cristal de gelo e fica carregado positivamente. Acima dessa região a colisão entre eles torna o cristal de gelo polarizado positivamente e o granizo, negativamente.

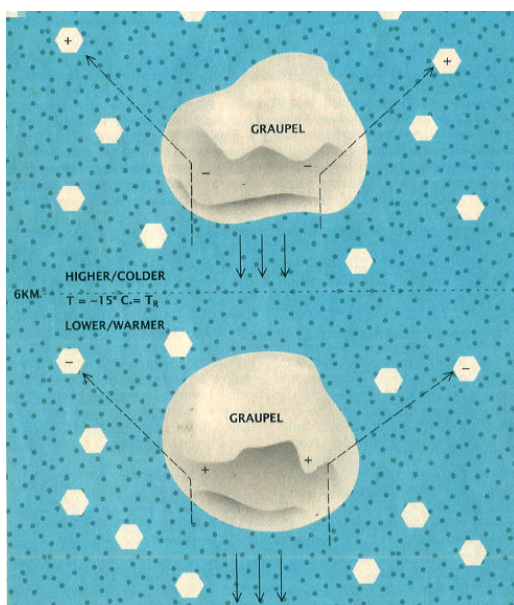


Figura 2.5 - Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre grãos de gelo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente.
Fonte: Williams (1988, p. 92).

Os principais processos microfísicos envolvidos na eletrificação da nuvem são o gravitacional e convectivo que determinam a estrutura elétrica da nuvem. Eles atuam sobre as diferentes partículas de gelo com diferentes tamanhos que variam de milímetros a centímetros, sendo que a ação da gravidade faz com que partículas maiores permaneçam na parte inferior da nuvem, enquanto as partículas menores permaneçam na parte superior.

A estrutura elétrica básica de uma nuvem de tempestade tem três centros principais, (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989, RAKOV; UMAN, 2003), um centro de carga elétrica positiva espalhada na parte superior da nuvem e estendendo-se até próximo ao topo, um centro de carga elétrica negativa concentrada na forma de uma camada horizontal na região de temperatura em torno de -10°C e -15°C (WILLIAMS, 1989), e um terceiro centro menor de cargas elétricas positivas próximas a base da nuvem. Além dos principais centros de carga existem também camadas de blindagem negativa e positiva ao longo do topo e da base da nuvem, respectivamente, formadas a partir da captura pela nuvem de íons da atmosfera, responsáveis por blindar parcialmente os campos elétricos internos da nuvem (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; PINTO e PINTO, 2008).

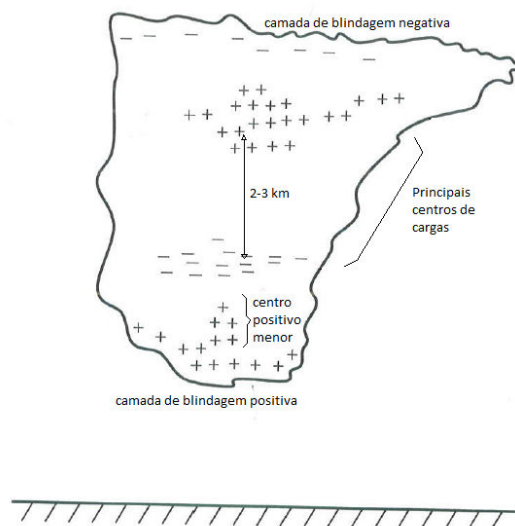


Figura 2.6 - Representação da estrutura elétrica simplificada de uma cumulonimbus considerando a estrutura tripolar da nuvem.
Fonte: Adaptada de Pinto e Pinto (2008).

Medidas de sondagens com balão mostraram, no entanto que a distribuição de cargas elétricas dentro das nuvens de tempestade é bem mais complexa. Em geral, apresenta múltiplos centros de carga positivas ou negativas dispostas horizontalmente e alternadas em relação à altitude. (STOLZENBURG, 1998; a; b; c). A Figura 2.7 mostra um modelo multipolar e grande complexidade na estrutura elétrica da nuvem.

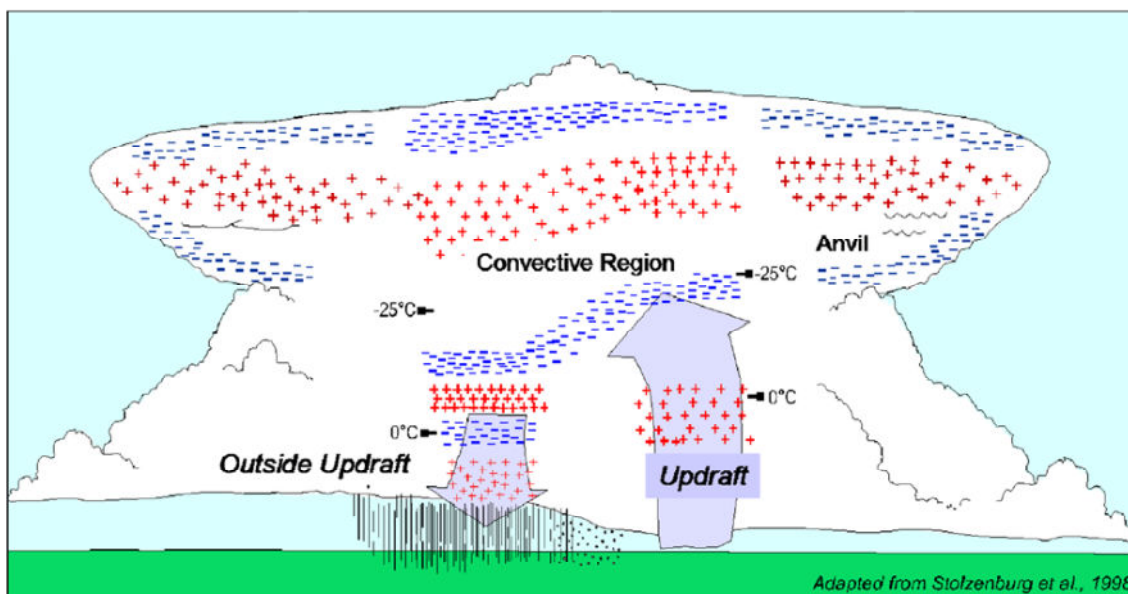


Figura 2.7 - Modelo da estrutura elétrica multipolar de uma nuvem de tempestade.

Fonte: Stolzenburg e Marshall (2008).

3. RELÂMPAGOS

Quando a intensificação do campo elétrico entre os centros de carga dentro da nuvem é suficiente para romper a rigidez dielétrica do local, inicia-se uma descarga elétrica conhecida como descarga de *Breakdown*, essa descarga apresenta dupla terminação e é chamada de líder bidirecional, cada uma das terminações se propagam em direção ao centro de carga de polaridade oposta, (MAZUR, 2002), dando início ao relâmpago.

Sendo assim, o relâmpago consiste em uma descarga elétrica de grandes proporções que ocorre na atmosfera, a qual possui um longo canal ionizado, na maioria das vezes com presença de diversas ramificações que se estendem por vários quilômetros, tanto na vertical como na horizontal.

Existem diversos tipos de relâmpagos, os quais são classificados em função do local onde se originam e do local onde terminam. Os relâmpagos mais frequentes começam e terminam dentro da nuvem são chamados intra-nuvem (IN); os que começam em uma nuvem e terminam em outra diferente são chamados entre-nuvens (EN); quando se originam na nuvem e terminam em qualquer ponto da atmosfera são denominados descargas no ar (DA); quando se iniciam no solo e partem em direção à nuvem são denominados ascendentes ou solo-nuvem (SN); e por último quando os relâmpagos se iniciam na nuvem e parte em direção ao solo são denominados nuvem-solo (NS), também conhecidos como raio (PINTO JR., 2005). A Figura 3.1 mostra os principais tipos de relâmpagos.

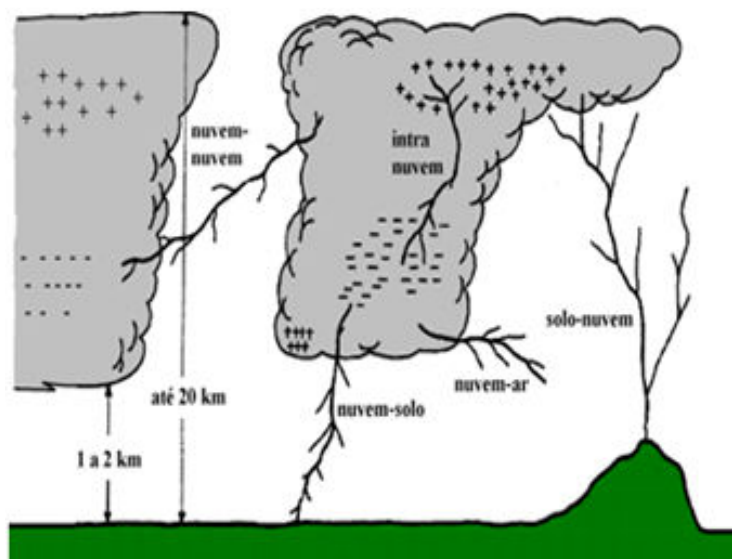


Figura 3.1 - Os principais tipos de relâmpagos, nuvem-nuvem, intra-nuvem, solo-nuvem, nuvem-ar e nuvem-solo.

Fonte: Adaptado de Ferraz (2001).

De todos os tipos, os relâmpagos os intra-nuvem (IN) são os mais frequentes e representam 70% do número total de relâmpagos. Isso ocorre por que a capacidade isolante do ar diminui com a altura e devido a maior proximidade entre os centros de carga de polaridades opostas.

Embora os relâmpagos nuvem-solo (NS) não sejam tão frequentes quanto os relâmpagos IN, eles são os mais estudados, não somente devido a sua facilidade de observação por possuírem grande parte de seu canal opticamente exposto sob a nuvem que os produziu, bem como pelo seu caráter destrutivo (UMAN, 1987). Dependendo da carga efetiva que é transferida para o solo, eles podem ser separados em três tipos: negativos, positivos e bipolares. Os relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-) transferem cargas negativas da nuvem para o solo. Os relâmpagos nuvem-solo positivos (NS+) transferem cargas positivas da nuvem para o solo. E, finalmente, os relâmpagos bipolares transferem cargas de ambos os sinais (de maneira alternada) para o solo.

Como o relâmpago de interesse neste trabalho é o NS-, será apresentada uma informação mais detalhada sobre as etapas de formação desses relâmpagos.

3.1. Relâmpago nuvem-solo negativo

Aproximadamente 90% dos NS são negativos, 9% são positivos e apenas 1% bipolares (PINTO JR., 2005). A explicação mais provável para essa condição é que o centro principal de carga negativa da nuvem fica mais próximo do solo do que o centro de carga positiva (WILLIAMS, 2006). Sendo assim, os NS- são mais fáceis de serem estudados, pois ocorrem com mais frequência.

Um NS- pode durar entre poucos milissegundos até dois segundos, de acordo com medidas feitas in situ (PINTO JR., 2005; RAKOV e UMAN, 2003; SABA et al., 2006a, entre outros). Durante o seu desenvolvimento o relâmpago emite pulsos de radiação eletromagnética, que pode variar entre a frequência ELF (do inglês *Extremely Low Frequency* – 300 Hz até 3kHz) até a VHF (do inglês *Very High Frequency* – 30MHz até 300 MHz), o máximo de emissão está na faixa de 5 – 10 kHz.

A formação dos relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-) segue algumas etapas básicas que serão ilustradas e descritas no decorrer desta seção. As Figuras 3.2, 3.4 e 3.6 ilustram as escalas de tempo nas quais ocorre cada processo de formação do relâmpago nuvem-solo negativo (NS-).



Figura 3.2 - Sequência temporal dos dois primeiros processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.
Fonte: adaptado de Uman (1987)

Considerando-se a estrutura tripolar simplificada da nuvem, a distribuição de cargas precisa estar favorável para que se inicie um relâmpago ($t = 0$ ms). Sabe-se que a intensificação do campo elétrico entre os centros de carga dentro da nuvem precisa ser suficiente para romper a rigidez dielétrica do local. Através de processos físicos ainda não completamente conhecidos, ocorre a

ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar (em inglês *preliminary breakdown*) ($t = 1,00$ ms), dando início ao relâmpago.

Após essa ruptura preliminar, na parte inferior da nuvem, entre o centro principal de cargas negativas e o pequeno centro de cargas positivas ($t = 1,10$ ms), inicia-se o líder escalonado (em inglês *stepped leader*), o qual se propaga da nuvem para o solo em uma série de passos discretos, percorrendo em média 50 m e em intervalos entre 5 a 100 μ s, com velocidade de propagação média da ordem de 10^5 m/s. Durante sua trajetória para o solo, o líder escalonado ramifica-se na direção descendente em busca de regiões com maior condutividade elétrica na atmosfera, produzindo assim a estrutura ramificada característica apenas dos NS-. A Figura 3.3 mostra o desenvolvimento do líder escalonado em direção ao solo, registrado por uma câmera de alta velocidade.

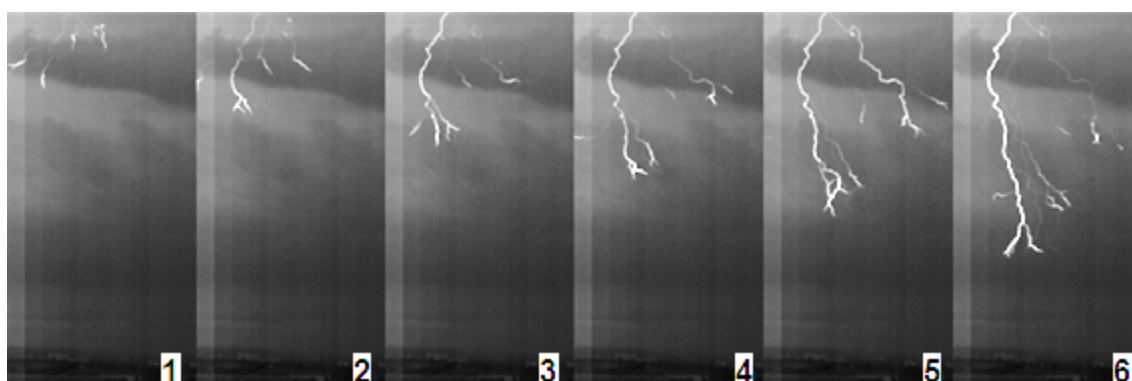


Figura 3.3 - Desenvolvimento do líder escalonado registrado por uma câmera de alta velocidade.

Fonte: Banco de dados ELAT (2013).

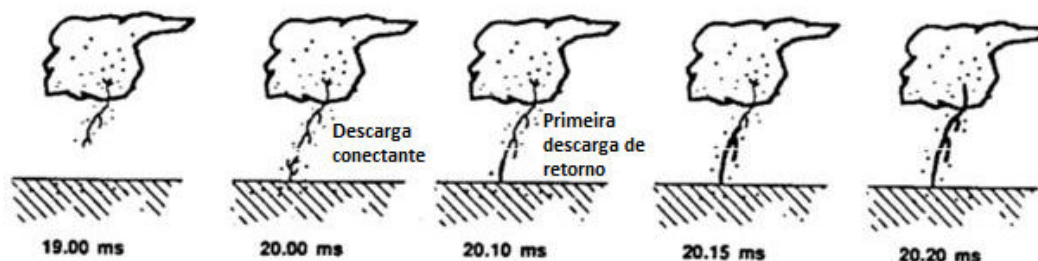


Figura 3.4 - Sequencia temporal do terceiro e quarto processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: adaptado de Uman (1987)

À medida que a extremidade do líder aproxima-se do solo, o campo elétrico em torno de objetos pontiagudos no chão ou sobre irregularidades da superfície (edificações, torres, montanhas, antenas, para-raios, etc.) intensifica-se a ponto de romper a rigidez dielétrica do ar, fazendo com que uma ou mais descargas ascendentes surjam a partir desses pontos, dando origem ao processo de conexão ($t = 20 \text{ ms}$).

Quando uma das descargas ascendentes encontra o líder escalonado descendente a algumas dezenas de metros acima do solo, a extremidade do líder conecta-se com o potencial da Terra. Tem-se então a primeira descarga de retorno (em inglês, *return stroke*) ($t = 20,10 \text{ ms}$) seguida por uma luminosidade muito intensa. Essa luminosidade é referente a uma frente de onda que se propaga para cima através do canal e deposita todas as cargas presentes nesse canal no solo. Essas cargas se propagam com cerca de um terço da velocidade da luz. A Figura 3.5 mostra o processo de conexão e a primeira descarga de retorno de um relâmpago NS- registrado com uma câmera de alta velocidade.

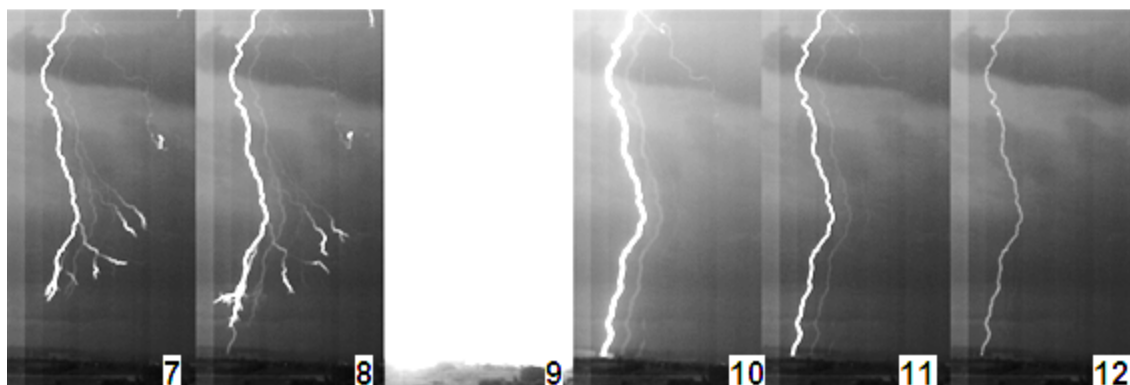


Figura 3.5 - Processo de conexão e primeira descarga de retorno do relâmpago que foram registrados por uma câmera de alta velocidade.
Fonte: Banco de dados ELAT (2013).

A corrente envolvida na transferência de carga no canal do relâmpago é da ordem de algumas dezenas de quiloampères e duram dezenas de microssegundos (RAKOV; UMAN, 2003; CAMPOS, 2012). Essa alta corrente aquece o canal a mais de 30.000 K e cria uma pressão no ar ao seu redor de mais de 10 atm , resultando na expansão do canal e na propagação de uma

onda de choque supersônica. Essa onda se converte numa onda sonora, que é chamada de trovão.

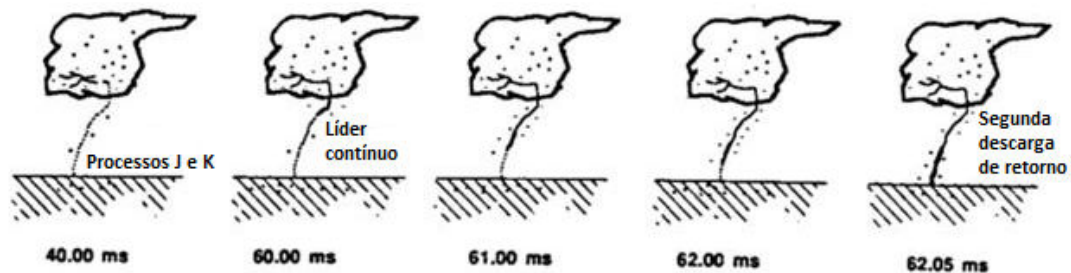


Figura 3.6 - Sequencia temporal do quinto e sexto processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.
Fonte: adaptado de Uman (1987).

Depois da primeira descarga de retorno (DR) pode ser que o NS- termine seu desenvolvimento. Quando isso ocorre, o NS- é considerado como sendo “**relâmpago NS- simples**” (em inglês, *single stroke flash*). Após a primeira DR podem ocorrer processos dentro da nuvem de tempestade denominados J e K ($t = 40$ ms).

Os processos J se apresentam como uma variação lenta do campo elétrico com uma escala de tempo de dezenas de milissegundos e são capazes de transportar carga horizontalmente dentro da nuvem, mas que não necessariamente se encontra associada a uma nova descarga de retorno (RAKOV; UMAN, 2003; KREHBIEL, 1979).

Mazur (2002) propõe que as descargas K são líderes negativos que se movem através do canal do relâmpago previamente ionizado pelo líder escalonado. Com isto, ele afirma que a nomenclatura correta para estes processos seria “líderes de recuo” (em inglês, *recoil leaders*). Os processos J e K são responsáveis pelo transporte de cargas elétricas, existentes em regiões próximas ao canal do relâmpago, para o ponto de início do líder escalonado (FERRO, 2008). A figura 3.7 mostra a integração de um sequencia de imagens do canal positivo de um relâmpago bipolar (SARAIVA et al., 2013). As setas vermelhas indicam líderes de recuo que aconteceram na base da nuvem e que estão relacionados com os processos k.



Figura 3.7 - Processos k que ocorreram na base da nuvem.

Fonte: adaptado de Saraiva et al.(2013).

Na maioria das vezes, uma nova DR é produzida da nuvem para o solo, se o canal do relâmpago ainda se encontrar fracamente ionizado ($t = 62,05$ ms). Nesse caso, o líder que desce para o solo é denominado líder contínuo (em inglês, *dart leader*) e não apresenta ramificações como o líder escalonado, sua velocidade de descida é muito maior que a velocidade do líder escalonado, em torno de 10^7 m/s (SCHONLAND et al., 1935; ORVILLE; IDONE, 1982; JORDAN et al., 1992,1997). Em certas situações, pode ocorrer o que se denomina líder contínuo-escalonado (em inglês, *dart-stepped leader*) em que um líder contínuo não consegue continuar sua propagação através do canal ionizado anteriormente criado e acaba divergindo, o seu desenvolvimento continua até o solo como um líder escalonado (CAMPOS, 2012).

Após o líder contínuo re-ionizar o canal do relâmpago, ocorre uma segunda DR, denominada descarga de retorno subsequente (em inglês, *subsequent stroke*). A Figura 3.8 mostra o desenvolvimento do líder contínuo, referente à segunda descarga de retorno registrada por uma câmera de alta velocidade.

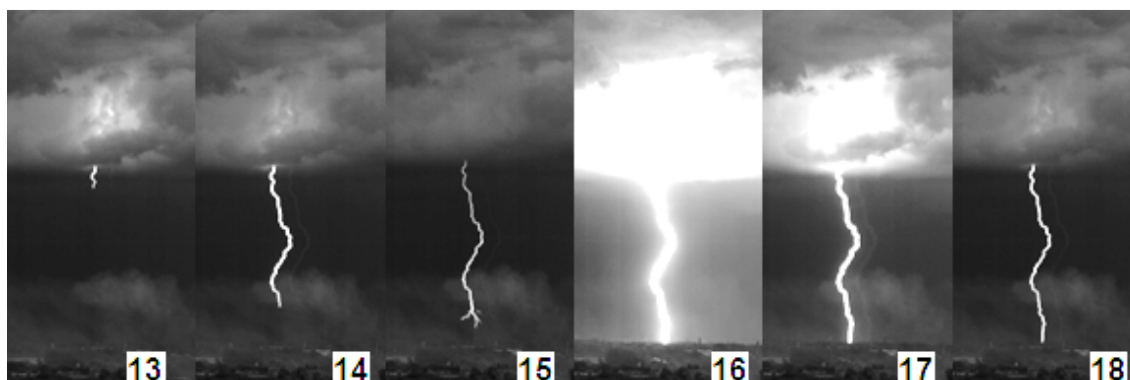


Figura 3.8 - Desenvolvimento do líder contínuo, registrado por uma câmera de alta velocidade.

Fonte: Banco de dados ELAT (2013).

A quantidade de DR subsequentes por relâmpago é conhecida como “**multiplicidade**”, as descargas de retorno subsequentes geralmente são separadas entre si por dezenas de milissegundos e precedidas por líderes contínuos. Segundo alguns estudos os “**intervalos de tempo entre as descargas de retorno**” consecutivas, não dependem da ordem em que elas ocorrem (SCHONLAND, 1956; THOMSON, 1980; THOMSON et al., 1984; EMIRANDA, 2000), mas podem estar ligados a outras características importantes dos NS-. Estudos mostram que o tempo médio entre uma descarga e outra é de 60 ms (RAKOV et al., 1994; SABA, 2006; SARAIVA, 2010 E BALLAROTTI et al. 2012).

A multiplicidade em geral não leva em conta se as DRs ocorreram em um mesmo canal, pois como mencionado anteriormente, o líder contínuo pode divergir do canal previamente ionizado e propagar-se como um líder escalonado em busca de um novo caminho para o solo. Entender a física que envolve a multiplicidade de um relâmpago é primordial, uma vez que será um dos principais objetos de estudo neste trabalho. Estudos anteriores sobre NS- mostram que a multiplicidade média varia entre 3,4 (COORAY e PEREZ 1994) a 6,4 (KITAGAWA et al.1962).

O caminho visível, formado pelo líder escalonado geralmente tortuoso é conhecido como sendo o canal do relâmpago. Esse canal é um plasma ionizado, possui um diâmetro de alguns centímetros e pode atingir uma

temperatura de cerca de 30.000 K (e.g., MIRANDA, 2003). Um comportamento observado em relâmpagos múltiplos é que muitas vezes um novo canal é construído por uma DR subsequente ou então as ramificações formam dois canais distintos que tocam o solo quase que no mesmo instante, chamadas de descargas bifurcadas, neste caso o NS- pode apresentar dois ou mais pontos de contato com o solo. A Figura 3.9 mostra uma descarga bifurcada.



Figura 3.9 - Exemplo de descarga de retorno bifurcada.

Fonte: Banco de dados projeto RAMMER (2013).

A formação de um novo canal geralmente está associada a um decaimento da ionização do antigo canal ou à extinção total do mesmo que pode ser causada por ventos que varrem a matéria ionizada. Neste caso ao seguir por um novo caminho na atmosfera, a nova DR o faz de maneira escalonada até conectar-se ao solo (VALINE; KRIDER, 2002).

Algumas vezes a DR é seguida por uma corrente contínua (CC) que ocorre depois de estabelecer o canal de plasma da nuvem para solo. O NS- pode sustentar um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo, mantendo um fluxo de corrente elétrica. A CC transporta dezenas ou até centenas de Coulombs de carga para o solo, podendo durar alguns milissegundos até centenas de milissegundos. A presença da corrente contínua (CC) pode ser notada pela persistência da luminosidade no canal do relâmpago e classificada de acordo com sua duração, denominada corrente contínua “curta” quando dura entre 10 e 40 ms (SHINDO; UMAN, 1989) e “longa” quando ultrapassa 40 ms (BROOK et al., 1962; KITAGAWA et al., 1962).

Durante a CC podem ocorrer aumentos súbitos na luminosidade do canal, como consequência de um momentâneo aumento de corrente, o que caracteriza um processo denominado componente M. Uma componente M típica tem corrente entre 100 e 200 A e transfere de 0,1 a 0,2 C de carga para o solo, e até 90% mais lenta que uma descarga de retorno (SARAIVA, 2010).

Estabelecidos todos esses processos do NS- e não havendo mais nenhuma DR subsequente o relâmpago está terminado. A “**duração total**” do mesmo consiste no instante de tempo em que a primeira descarga de retorno toca o solo até o fim da luminosidade da última descarga de retorno subsequente, esse tempo pode ser medido através de observação com câmeras de alta velocidade. A duração de um relâmpago pode variar muito, dependendo da quantidade de DR ou da existência de corrente contínua.

3.2. Desenvolvimento do líder

Segundo a teoria do líder bidirecional, a iniciação do líder escalonado do relâmpago nuvem-solo, ocorre de forma bidirecional, bipolar e tem carga líquida zero, ou seja, enquanto uma extremidade parte em direção ao solo a outra extremidade, de polaridade oposta, caminha dentro da nuvem produzindo um canal ionizado eletricamente neutro.

Kasemir (1960) introduziu o conceito na década de 60 e afirmou que devido à distribuição de cargas dentro da nuvem, o campo elétrico externo ao canal do líder bidirecional separa as cargas elétricas positivas (íons) e negativas (elétrons) fazendo com que o líder não colete cargas da nuvem, mas sim produza cargas elétricas dentro do seu canal através da ionização, pois quando um condutor está imerso em um campo elétrico, ele fica polarizado de acordo com a direção das linhas de campo, como mostra a Figura 3.10.

Existe uma diferença na mobilidade entre as cargas elétricas positivas e negativas devido à massa dessas partículas. Na extremidade positiva os elétrons livres convergem na direção da carga positiva onde o campo elétrico é mais forte, isso facilita a continuidade do canal, por isso o termo “easy

direction” da Figura 3.10. Já na extremidade negativa os elétrons livres divergem para uma região de campo elétrico mais fraco, o que dificulta a continuidade do processo, por isso o termo “*hard direction*” da Figura 3.10 (WILLIAMS, 2006).

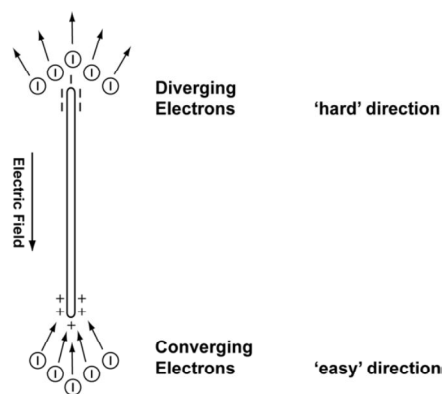


Figura 3.10 - Ilustração de um filamento condutor imerso em um campo elétrico. Na ponta positiva os elétrons móveis disponíveis convergem em direção a carga positiva e na extremidade negativa os elétrons móveis divergem. Fonte: Williams (2006).

O conceito do líder bidirecional só começou a ser considerado pela comunidade científica após Mazur (1989) apresentar os resultados de experimentos com aeronaves que iniciaram relâmpagos bidirecionais, esses experimentos foram as primeiras evidências a favor do líder bidirecional. A Figura 3.11 mostra um exemplo de uma aeronave que iniciou um relâmpago bidirecional quando decolava.

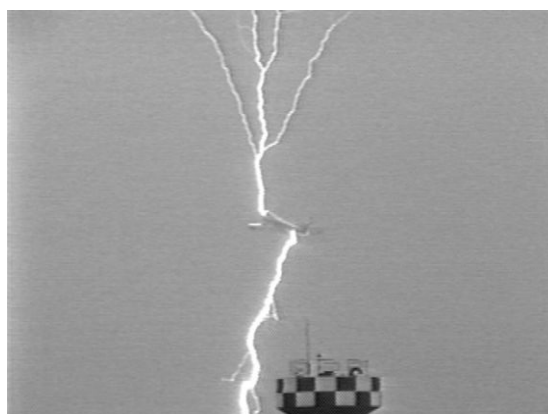


Figura 3.11 - Exemplo de uma aeronave que iniciou um relâmpago com líder bidirecional. Fonte: Williams (2006)

A Figura 3.12 mostra a geometria do desenvolvimento temporal do líder bidirecional que Mazur (2002) encontrou através do mapeamento das fontes de radiação dos relâmpagos. No instante t_1 inicia-se o desenvolvimento do líder bidirecional; em t_2 os líderes, positivo e negativo, se propagam em ambas as direções; em t_3 o líder negativo toca o solo; em t_4 acontece a descarga de retorno no canal (RS channel); por ultimo, em t_5 , a corrente que flui pelo canal em direção ao solo é interrompida, enquanto o líder positivo no interior da nuvem continua a se propagar. A partir daí ocorrem descargas K que são representadas pelas setas e se houver condições favoráveis acontece uma nova descarga de retorno que é precedida pelo de líder contínuo.

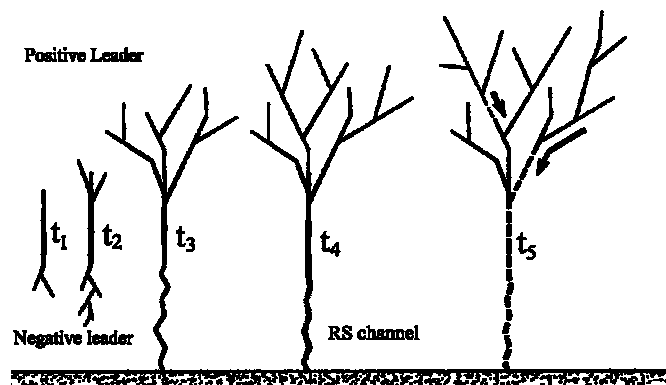


Figura 3.12 - Desenvolvimento do líder bidirecional para um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: Adaptado Mazur (2002).

3.3. Instabilidade do canal segundo Heckman

Heckman (1992) analisou a estabilidade da corrente de um longo canal de relâmpago que liga a nuvem de tempestade carregada eletricamente à terra condutora. A extensão do canal imerso no campo elétrico criado pela carga espacial da nuvem provê uma fonte de corrente quase estável. O canal do relâmpago é caracterizado por uma capacitância e uma resistência não linear.

A Figura 3.13 mostra um circuito equivalente à alimentação de corrente no canal de um relâmpago nuvem-solo. A extensão continuada do relâmpago dentro da nuvem carregada constitui a fonte de corrente (I), a capacitância por unidade de comprimento vezes o comprimento do canal é o capacitor (C) e a

resistência não linear por unidade de comprimento vezes o comprimento do canal é a resistência total (R) do arco elétrico.

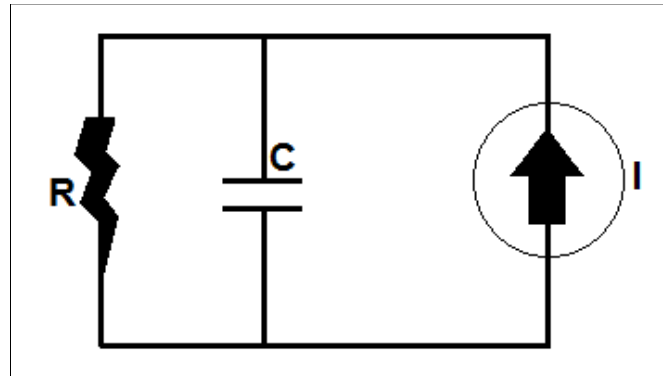


Figura 3.13 - Circuito equivalente a um canal de relâmpago nuvem-solo. A fonte de corrente (I) em paralelo com a capacitância do canal por unidade de comprimento (C) e a resistência não linear por unidade de comprimento (R).

Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

O canal do relâmpago, como qualquer outro arco elétrico, só se extingue se a corrente fornecida for insuficiente, ou seja, o canal com altas correntes tem baixa resistência, por isso é estável e o canal com baixas correntes tem alta resistência, por isso é instável. O canal do relâmpago é longo, por isso tem uma alta resistência e capacitância, assim é instável até correntes com cerca de uma centena de amperes. Para Malan e Schonland (1951), a instabilidade com baixas correntes fornece o mecanismo que explica a múltiplas descargas dos relâmpagos e a estabilidade com altas correntes, explica a corrente contínua prolongada.

A condição instável pode ser entendida como uma resposta não-linear a um declínio da corrente. A resistência do canal aumenta e a corrente continua a diminuir até promover a completa interrupção do canal. O critério quantitativo de instabilidade é ilustrado em duas medidas-chave do relâmpago, o comprimento do canal L e a corrente do canal I, na Figura 3.14.

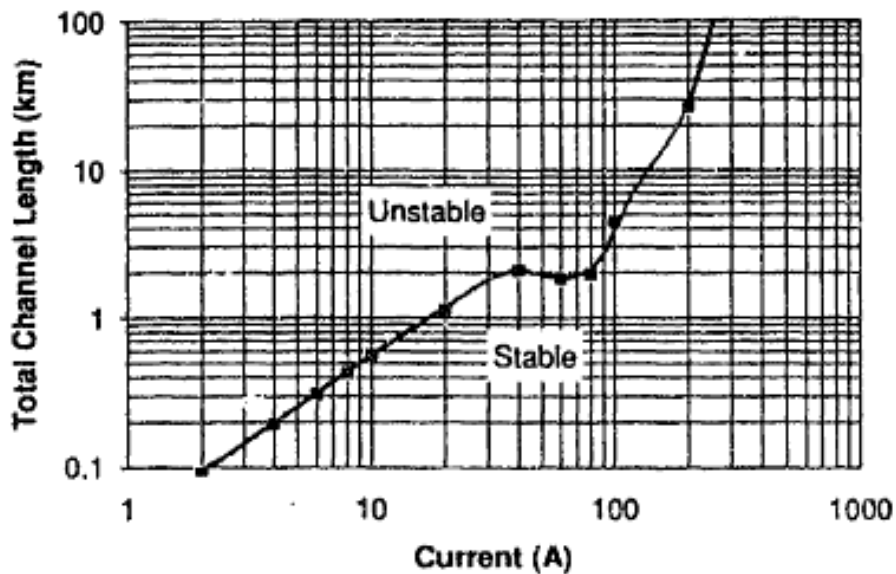


Figura 3.14 - Diagrama de estabilidade para um canal de relâmpago representado pelo circuito equivalente da Figura 3.13. Comportamento instável com interrupção da corrente na parte superior esquerda da linha de estabilidade; comportamento estável com corrente contínua na parte inferior direita da linha de instabilidade.
 Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

Descargas múltiplas são favorecidas por pequenas correntes e por canais longos. Correntes contínuas prolongadas são favorecidas por grandes correntes e por canais curtos. A instabilidade apresentada por Heckman (1992) prevê que para qualquer canal elétrico. Existe um comprimento crítico de tal modo que os canais mais longos apresentam descargas discretas e canais mais curtos apresentam correntes contínuas.

4. INSTRUMENTAÇÃO

4.1. Estações de observação

As quatro câmeras de alta velocidade utilizadas no presente trabalho pertencem ao projeto RAMMER (SARAIVA, 2012). O modelo de câmera utilizada foi a Phantom v9.1 que fornece 14-bit de profundidade de imagem e 1.000 quadros por segundo em uma resolução completa de 1.632 x 1.200 pixels. O operador pode especificar outras proporções para aumentar a velocidade de gravação ou prolongar o tempo de gravação. O tempo de exposição é variável e independente da taxa de amostragem em quadros por segundo (qps). A pré-visualização de focagem foi feita via computador.



Figura 4.1- Câmera de alta velocidade Phantom v9.1

Atualmente a rede é formada por quatro estações de observação. Três estações funcionaram em locais fixos e precisaram de um invólucro de proteção como mostra a Figura 4.2. Uma das estações foi operada de dentro de um automóvel, pois o lugar escolhido não possuía um prédio para abrigar a estação de forma fixa. Cada uma das estações foi montada de forma padrão e continha os mesmos equipamentos:

- a) Uma câmera de alta velocidade da marca Phantom, modelo V9. 1;
- b) Um computador com capacidade de 2 TBytes de espaço em disco rígido, que executa os programas para controle do sistema e armazenamento dos dados;

- c) Um GPS que faz sincronização de cada frame gravado com precisão de 1ns, isso permite a correlação do relâmpago registrado pela câmera com o sistema de detecção e localização de relâmpagos.

As estações fixas possuíam um sensor fotodiodo sensível a variações de luminosidade ambiente que emite pulso de gatilho para acionar a câmera no exato momento em que ocorre o relâmpago. Este sistema permite o funcionamento automático dos sensores. As estações podem ficar ao ar livre, por isso precisam de um invólucro para proteger o equipamento das ações climáticas.

A RAMMER móvel não necessita do sistema automático e nem do invólucro de proteção, pois é operada de forma manual.



Figura 4.2 - Invólucro que protege os equipamentos. Equipamento que foi instalado na base da torre de telecomunicação da emissora de televisão Vanguarda em São José dos Campos.

A posição de cada estação foi cuidadosamente escolhida para que todas as câmeras observassem a região central da cidade de São José dos Campos. O campo de visão de cada câmera tem um raio de 60 km. O nome de cada uma foi dado de acordo com a ordem de instalação. A primeira a ser instalada foi a RAMMER 1 (R1), fixada na base da torre de telecomunicação da emissora de televisão Vanguarda em São José dos campos. A segunda, RAMMER 2 (R2), foi instalada na torre da fábrica Simoldes, localizada em Caçapava. A

RAMMER 3 (R3) foi fixada na torre do Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv), em São José dos Campos. Por fim, a quarta estação, RAMMER móvel (RM), foi adaptada dentro de um automóvel e registrou as tempestades do campus da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP).

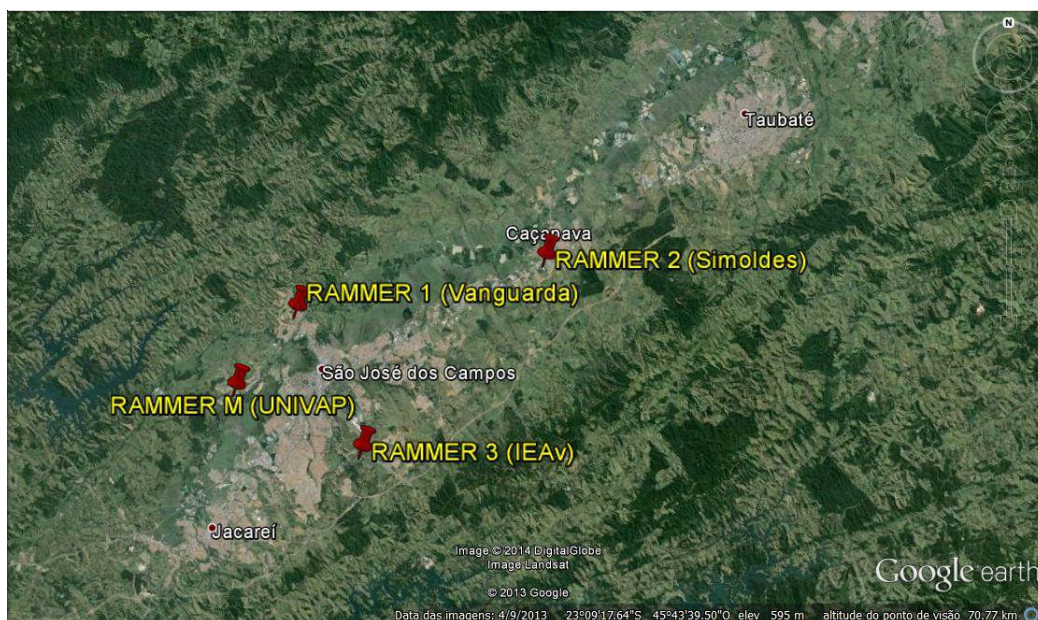


Figura 4.3 - Localização dos quatro pontos de filmagem.

Fonte: Google Earth.

4.2. Rede de detecção de descargas atmosféricas

O sistema de detecção de relâmpagos é baseado na medida da radiação eletromagnética emitida pelas descargas a partir de um conjunto de sensores dispostos adequadamente, com o objetivo de localizar precisamente os relâmpagos para um determinado fim (PINTO JR., 2005).

A rede de detecção necessita de centrais de processamento que recebem os dados brutos dos sensores e aplicam uma série de algoritmos computacionais. Esses algoritmos fornecem informações como: data, horário, latitude, longitude, polaridade, valor estimado de pico de corrente, multiplicidade, classificação entre relâmpago NS ou IN, entre outros parâmetros que não serão discutidos no presente trabalho.

As redes de detecção e localização de relâmpagos utilizadas foram a BrasilDAT (Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas) (NACCARATO e PINTO, 2012) e a RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) (NACCARATO,2006).

A rede BrasilDAT combina tecnologias avançadas de detecção de relâmpagos e abrange 11 estados do Brasil. Atualmente é composta por 56 sensores de relâmpagos da empresa EarthNetworks (ENLS). Cada um deles com um circuito de temporização baseado em GPS, um processador digital de sinal (DSP) e de armazenamento interno, e equipamentos de comunicação com internet. O ENLS é um sistema de banda larga com frequência de detecção que varia de 1 Hz a 12MHz e utiliza um método TOA (do inglês *Time-Of-Arrival*) de tempo de chegada da radiação eletromagnética.

A rede RINDAT foi criada em 1998 e tem atualmente 36 sensores de tecnologia Vaisala instalados em nove estados do Brasil. É uma rede híbrida composta de diferentes tipos de sensores (LPATS, IMPACT, LS7000 e LS7001), que têm tecnologias de detecção distintas: por tempo de chegada (TOA) apenas, e uma combinação de TOA e método da direção magnética (MDF). Eles operam na baixa frequência (LF) que varia de 100 a 400kHz. Os sinais eletromagnéticos nesta faixa de frequência propagam-se perto da terra e estão sujeitos a diferentes efeitos de propagação, dependendo das características de superfície (NACCARATO, 2006).

4.3. Radar meteorológico

O radar é um instrumento eletrônico que transmite radiação eletromagnética usada para detectar objetos distantes e medir o seu alcance pela forma como eles dispersam ou refletem o sinal emitido. Seu nome é uma abreviação das palavras em inglês *Radio Detection and Ranging* (Detecção de Alvos e Medida de Distância por Rádio).

O propósito inicial do radar era estudar tempestades, porém durante a segunda guerra mundial foi utilizado para fins militares na detecção de navios e

aeronaves. Com o término da guerra, voltou a ser utilizado para fins pacíficos como os meteorológicos (RINEHART, 1997). Além dos fins meteorológicos que utilizam os radares para detecção de fenômenos atmosféricos e hidrológicos como nuvens, precipitações, tormentas, furações e fins de pesquisa, os radares passaram a ser utilizados para outros fins como em aeroportos para controle do tráfego aéreo e em vias terrestres para detectar a velocidade de veículos.

As nuvens são compostas por partículas de água, cristais de gelo e granizo, que variam de tamanho e forma dependendo do tipo de nuvem. Essas partículas são os objetos a serem detectados pelos radares meteorológicos. Os dados obtidos pelos radares meteorológicos do tipo Doppler tem aplicações em diversas áreas tais como agricultura, hidrologia, meteorologia e aeronáutica. A radiação que retorna dos alvos é representada pela grandeza chamada refletividade (Z) e depende das características físicas do alvo.

O radar utilizado para coletar os dados dos cinco dias de tempestade pertence ao DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) e está instalado na cidade de São Roque que fica a aproximadamente 133 km de distância de São José dos Campos. O radar RMT 0100D é do tipo Doppler, banda S, o que significa que a banda do espectro eletromagnético tem frequência de 2-4 GHz e comprimento de onda de 15-8 cm. A largura do feixe é de 2 graus e são feitos três tipos de varredura: em azimute com ângulo vertical constante que faz uma rotação completa de 360° horizontalmente; em elevação com ângulo azimute constante variando de 0° a 90° verticalmente; e volumétrica, que é composta de múltiplas varreduras em azimute. Os produtos extraídos através das varreduras obtidas pelo radar fornecem uma projeção num plano horizontal dos dados de refletividade, taxa de precipitação e velocidade radial.

O produto utilizado neste trabalho foi o dado de refletividade em forma de CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) que é um formato de visualização de imagens do radar que mostra o campo refletividade a altitude constante. Dados de diversas varreduras em múltiplos ângulos de elevação do radar são combinados para formar um plano horizontal de refletividade (dBZ). O CAPPI utilizado cobre 250 km de distância do radar de São Roque e tem

informações digitais com intervalos de 15 minutos que foi fornecido pela DSA/CPTEC.

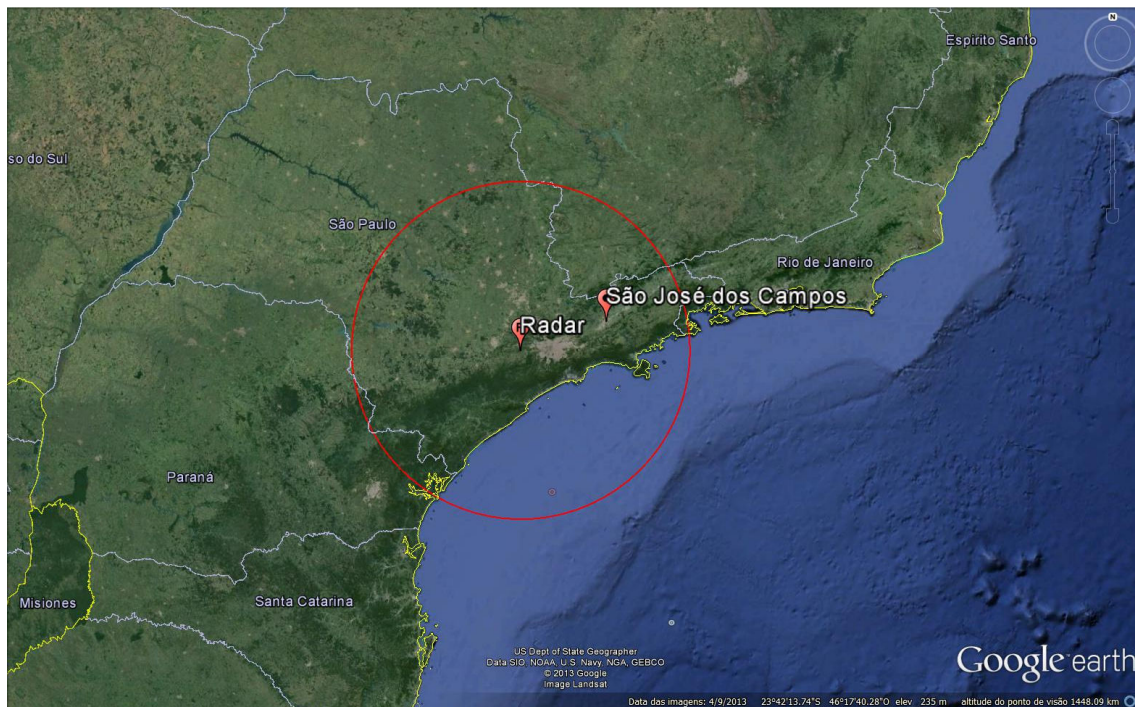


Figura 4.4 - O círculo vermelho representa o raio de 250 km de visada de radar de São Roque.
Fonte: Google Earth (2014).

O nível de refletividade de 35 dBZ está relacionado com forte convecção dentro da nuvem. Os ecos são derivados de partículas com milímetros de diâmetro (MACGORMAN e RUST, 1998; TAKAHASHI et al., 1998). As teorias de eletrização afirmam que em torno de -15°C estão localizados partículas como o graupel, o granizo e cristais de gelo com cargas negativas. Segundo a estrutura elétrica básica da nuvem de tempestade (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989, RAKOV; UMAN, 2003), existem três centros principais de carga elétrica e o centro principal de carga negativa concentra-se na região de temperatura em torno de -10°C e -15°C (WILLIAMS, 1989). Sendo assim o CAPPI utilizado forneceu a refletividade da nuvem na altura de 5 km.

5. METODOLOGIA

5.1. Aquisição dos dados

Os dados para o presente trabalho foram adquiridos durante a campanha realizada no verão de 2012/2013. Os dias que tiveram amostras com tamanho estatisticamente significativo (acima de 30), foram selecionados para serem analisados. Consequentemente foram os cinco dias de tempestade que tiveram maior número de relâmpago NS- registrados pelas câmeras, dia 18, 19 e 22 de fevereiro de 2013, 06 e 08 de março de 2013. Durante as observações dos cinco dias selecionados, apenas a estação R1 operou automaticamente, enquanto as outras estações foram operadas de forma manual.

Os cinco dias somaram um total de 706 vídeos. Esses vídeos foram analisados um a um e, após a redução dos dados, 361 vídeos contendo relâmpagos NS- foram catalogados para serem utilizados na análise. Os dados como relâmpagos IN e relâmpagos NS positivos que foram comprovados pelo sistema de detecção de relâmpagos foram ignorados, pois não faziam parte dos objetivos deste estudo.

Os dados foram separados e analisados por dia de tempestade, a fim de verificar a existência (ou não) de diferenças significativas das características visíveis dos relâmpagos NS- entre um dia e outro. Esse tipo de análise só foi possível porque, pela primeira vez, quatro câmeras de alta velocidade foram usadas para observar a mesma região de tempestade. Esse número possibilitou que uma quantidade suficiente de relâmpagos fosse registrada em cada um dos cinco dias de tempestade.

De todos os relâmpagos catalogados para serem analisados, 26% (93 raios) não tiveram a polaridade identificada pela rede, mas foram classificados como de polaridade negativa, pois apresentavam multiplicidade elevada e ramificações descendentes, características que são preponderantes em relâmpagos NS- (RAKOV e UMAN, 2003). Durante as análises ocorreram alguns casos em que um único relâmpago foi registrado por mais de uma

câmera. Nestes casos o relâmpago foi considerado apenas pela câmera com melhor imagem. Esse procedimento excluiu a possibilidade de contabilizar o mesmo relâmpago mais de uma vez. A Figura 5.1 mostra um exemplo de um relâmpago que ocorreu no dia 18 de fevereiro e que foi gravado ao mesmo tempo por 3 câmeras. Neste caso apenas o relâmpago gravado pela R3 foi considerado.

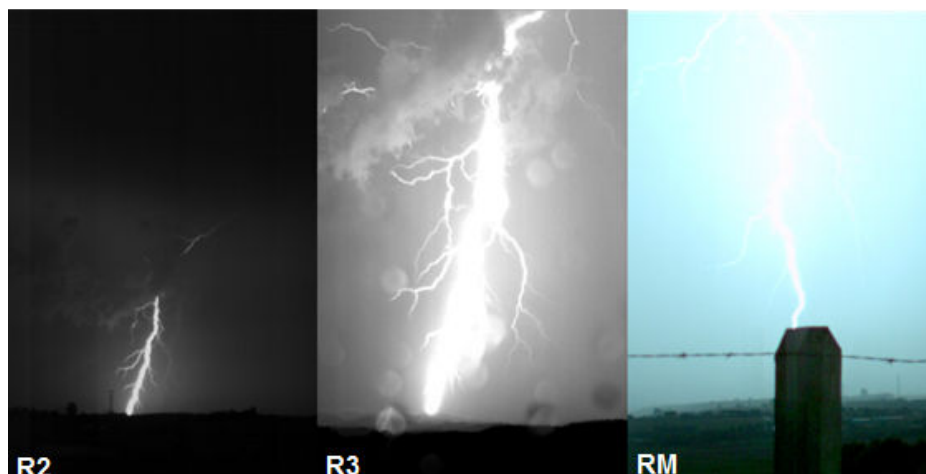


Figura 5.1 – Exemplo de um relâmpago que ocorreu no dia 18 e foi registrado ao mesmo tempo por 3 câmeras diferentes.

A Tabela 5.1 mostra a quantidade de vídeos registrados em cada RAMMER para cada dia, o total de relâmpagos NS- que cada câmera filmou e o total de relâmpagos registrados em cada dia de tempestade

Tabela 5.1 - Relação de vídeos filmados por cada RAMMER (R), dos relâmpagos registrados por cada RAMMER (R) e o total de relâmpagos por dia de tempestade.

DIA	R1	R2	R3	RM	Total de vídeos	Total de NS- por R.	Total de NS-
18.02	0*	40	45	39	124	86	68
19.02	33	40	32	29	134	84	74
22.02	39	32	33	36	140	60	55
06.03	43	47	54	51	195	123	117
08.03	52	18	16	27	113	45	47
				Total	687	398	361

* No dia 18.02 a RAMMER 1 estava desligada por problemas técnicos.

Após a redução dos dados foi feita uma análise de algumas das características visíveis dos relâmpagos por dia de tempestade e também considerando o

conjunto como um todo. O propósito desta análise foi comparar os resultados encontrados em diferentes dias de tempestade e verificar a existência de diferenças entre os parâmetros em relação ao dia em que ocorreram os relâmpagos. Os parâmetros analisados foram: a multiplicidade, o tempo de duração do relâmpago e o tempo de duração do intervalo entre as descargas de retorno.

5.2. Método de Monte Carlo

O método começou a ser utilizado durante a segunda guerra mundial para solucionar problemas relacionados à bomba atômica. O nome foi dado por Jonh Von Neumann e Stanislav Ulam, baseado no cassino de Monte Carlo em Mônaco, cujo aspecto aleatório e natureza repetitiva das roletas estavam intimamente ligados ao método.

O Monte Carlo é um método utilizado para resolver problemas através da simulação estatística que utiliza sequencia de números aleatórios. Uma vez conhecida à distribuição da população original, o método consiste em fazer inúmeras amostras aleatórias a partir da original. O resultado é obtido através de parâmetros estatísticos como média, desvio padrão, erro padrão e etc.

O método foi aplicado para verificar estatisticamente se os tamanhos das amostras tiveram influência sobre as diferenças encontradas entre as características visíveis dos NS-. Como as amostras de cada dia de tempestade apresentaram tamanhos variados, a análise foi feita separadamente para cada uma das características de cada dia de tempestade. O método foi aplicado da seguinte forma:

- Selecionou-se a amostra original para cada uma das características dos relâmpagos. A amostra original continha os dados de todos os dias de tempestade. Exemplo: Quando o método foi aplicado para a multiplicidade, o tamanho da amostra original foi igual a 361, esse valor foi referente a todos os valores de multiplicidade, considerando os cinco dias de tempestade.

- Após selecionar a amostra original, reproduziu-se então 1000 novas amostras, retiradas aleatoriamente da amostra original, com tamanho idêntico ao da característica do dia em questão. Exemplo: Quando o método foi aplicado para a multiplicidade do dia 06/03, as 1000 novas amostras foram geradas com tamanho igual a 117, esse valor foi referente ao número de casos analisados neste dia. Já para o dia 08/03 as 1000 novas amostras foram geradas com tamanho igual a 47.
- Para cada nova amostra foi calculada sua média, assim como foi calculada a média para a distribuição de cada característica em questão. Obteve-se então para cada característica de cada dia, 1000 novas médias para serem comparadas com média original de cada característica para cada dia.

Com base na distribuição das 1000 médias geradas pelo Monte Carlo foram calculadas quantas vezes o método reproduziu uma distribuição que apresentou média igual ao intervalo de erro padrão da média original da característica do dia em questão. O resultado foi apresentado em forma de porcentagem, os casos que tiveram significância acima de 5%, foram considerados flutuação estatística. Já os casos com significância menor que 5% foram considerados anomalia.

6. REDUÇÃO DOS DADOS

Os parâmetros analisados foram: multiplicidade, intervalo entre as DRs e duração do relâmpago. A Tabela 6.1 mostra os resultados obtidos em estudos anteriores para os mesmos parâmetros citados acima. Nenhum desses estudos considerou a análise por dia de tempestade e sim pelo número total de relâmpagos.

Tabela 6.1 – Resumo dos resultados obtidos para as características de NS-. A sigla MG representa a média geométrica.

Autores	Número de NS-	NS-simples (%)	Média de DR por NS-	Intervalo entre as DRs, (ms)	MG da Duração (ms)
Kitagawa et al.(1962)	193	14,0	6,4	-	-
Rakov et al. (1994)	76	17,0	4,6	60,0	-
Cooray e Perez (1994)	137	18,0	3,4	48,0	-
Cooray e Jarayaratne (1994)	81	21,0	4,5	56,5	-
Saba et al. (2006)	233	20,0	3,8	61,0	163,0
Saraiva et al. (2010)	432	19,5	3,9	61,5	226,0
Ballarotti et al. (2012)	883	17,0	4,6	59,0	300,0

A base de dados utilizada para os trabalhos realizados por Saba et al. (2006), Saraiva et al. (2010) e Ballarotti et al. (2012) são referentes a mesma região de estudo deste trabalho, portanto servirão de base para comparação dos resultados obtidos. A apresentação dos resultados foi feita por dia de tempestade.

6.1. Dia 18 de fevereiro de 2013

O dia 18 teve 68 NS- registrados durante 140 minutos de observação. A maior multiplicidade encontrada neste dia foi referente ao 42° relâmpago, com 18 DRs, sendo que cinco DRs tiveram corrente CC curta e apenas uma DR teve CC longa, o restante das DRs não apresentaram nenhuma CC. Esse

relâmpago teve também o maior tempo de duração com 1257 ms. A média geométrica da distribuição de todas as multiplicidades deste dia foi 3,2 e 17% (12) dos relâmpagos eram NS- simples, ou seja, tiveram apenas uma descarga de retorno. A Figura 6.1 mostra a distribuição da multiplicidade.

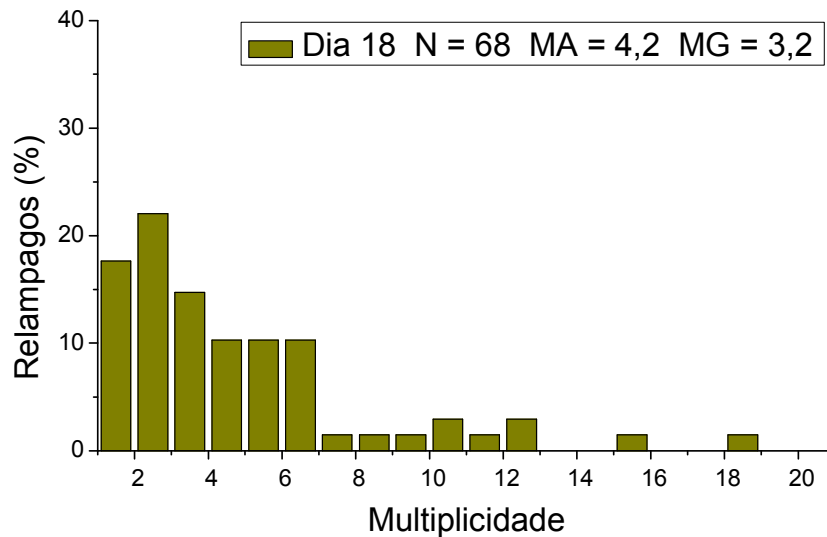


Figura 6.1 - Distribuição da multiplicidade para o dia 18. N é o número de relâmpagos NS-, MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da distribuição da multiplicidade.

Os 68 relâmpagos somam 289 DRs e entre elas foram medidos 213 intervalos. A média geométrica desses intervalos foi de 56,2 ms. A maior duração para os intervalos entre DRs encontrado neste dia foi 477,2 ms, essa duração foi referente a segunda e a terceira DR de um relâmpago que teve multiplicidade 3, intensa atividade intra-nuvem durante o intervalo medido e três pontos de contato. A Figura 6.2 mostra a distribuição para os intervalos entre as descargas de retorno.

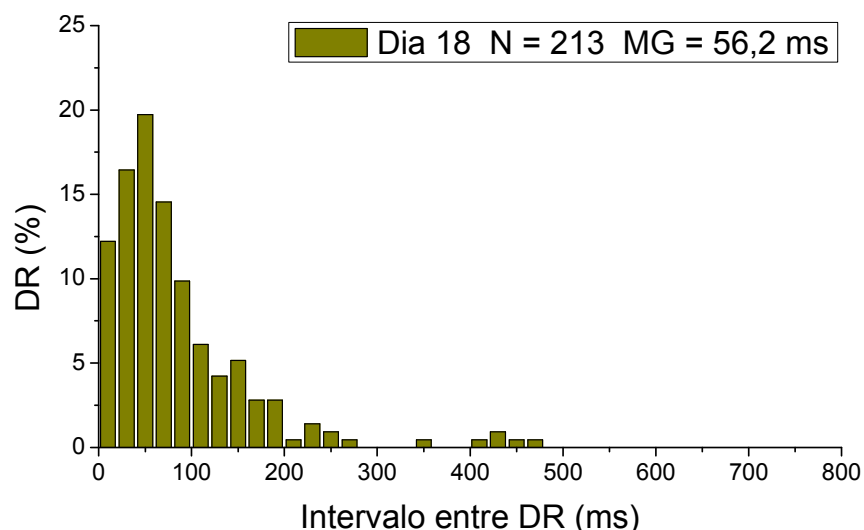


Figura 6.2 - Distribuição do tempo de intervalo entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.

Para o cálculo do tempo de duração dos relâmpagos, os NS- simples (12) e um relâmpago com DR bifurcada não foram incluídos na análise da distribuição. A média geométrica para os 55 NS- múltiplos que restaram foi 235,9 ms. A Figura 6.3 mostra a distribuição da duração dos NS- para o dia 18.

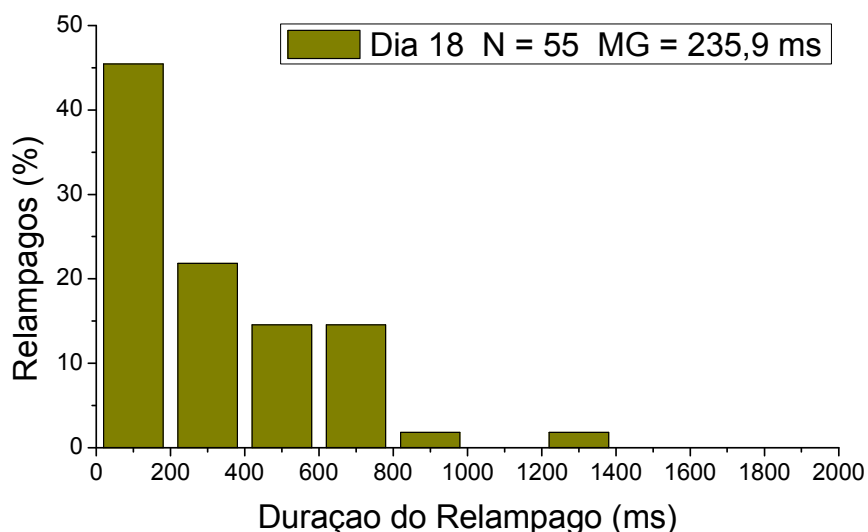


Figura 6.3 - Distribuição da duração dos relâmpagos, os NS-simples (12) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.2. Dia 19 de fevereiro de 2013

Durante 180 minutos de observação, foram registrados 74 NS-, 17,5% (13) dos relâmpagos apresentaram apenas uma DR. A maior multiplicidade encontrada neste dia foi 16, duas DRs apresentaram CC curta e todas ocorreram no mesmo canal. O número total de DR referentes aos 74 NS- foi 350 e a média geométrica da multiplicidade 3,6. A Figura 6.4 mostra a distribuição da multiplicidade para o dia 19.

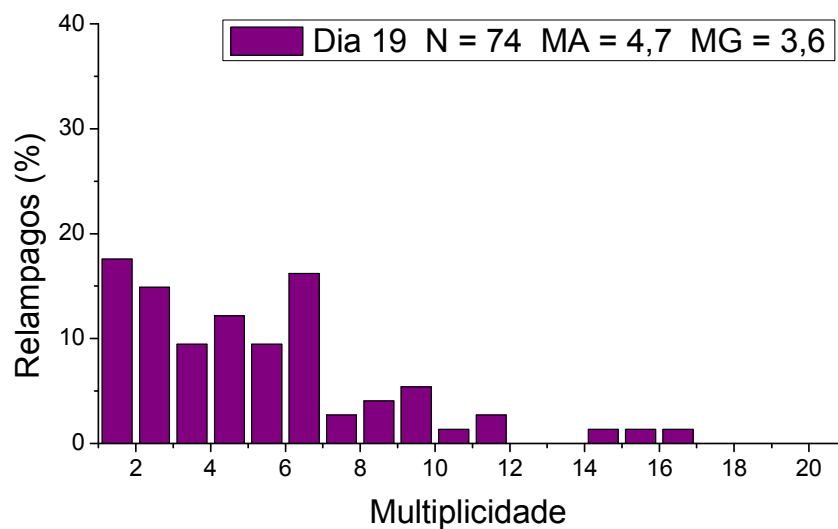


Figura 6.4 - Distribuição da multiplicidade para o dia 19. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética da multiplicidade.

Foram medidos 271 intervalos entre as DRs, o maior intervalo medido neste dia foi de 551 ms, entre a segunda e terceira DR seguidas de CC longa e com CC curta respectivamente, referentes a um relâmpago de multiplicidade 11. A média geométrica de todos os intervalos foi de 69,6 ms. A Figura 6.5 mostra a distribuição para os intervalos entre as DRs.

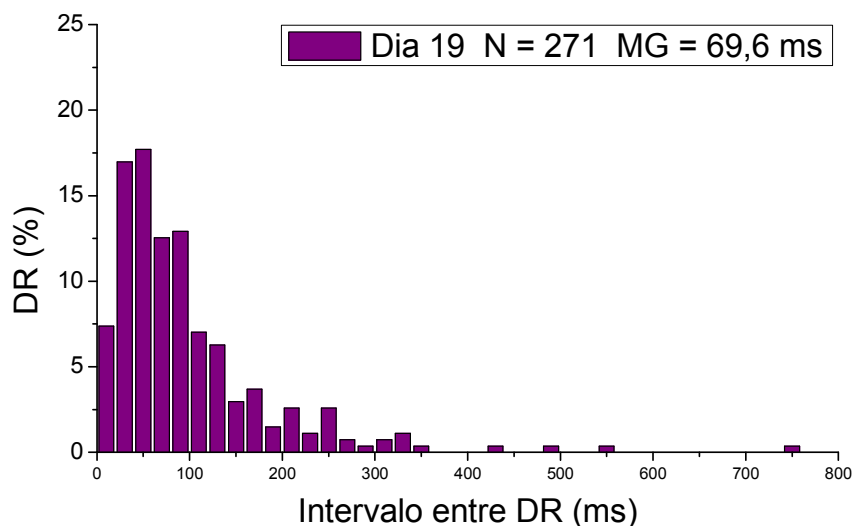


Figura 6.5 - Distribuição dos tempos de duração dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.

Como para o dia 18 os NS- simples não foram incluídos na análise de duração dos relâmpagos, a duração máxima foi de 1448 ms referente ao mesmo relâmpago que apresentou o maior duração de intervalos entre as DRs. A média geométrica da duração desse dia foi de 358,5 ms, esse valor é superior ao encontrado em outros estudos para a mesma região (SARAIVA, 2010, BALLAROTTI, 2012). A Figura 6.6 mostra a distribuição da duração dos relâmpagos para o dia 19.

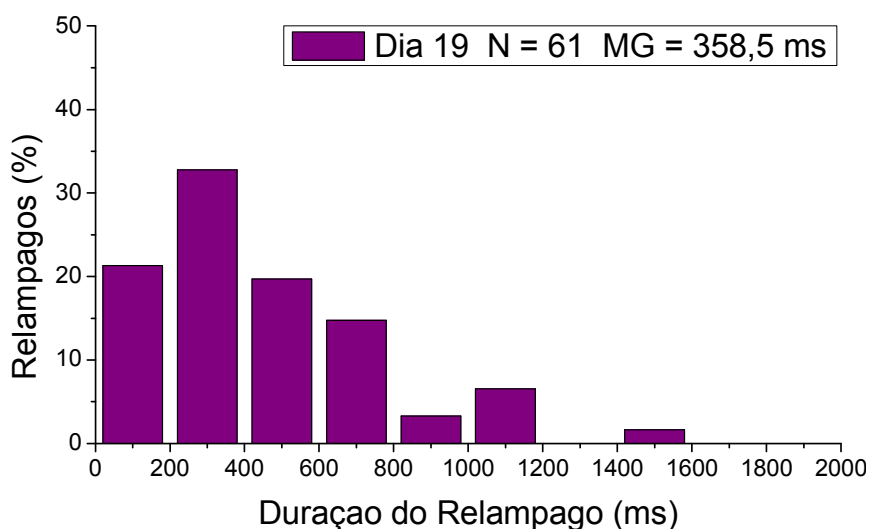


Figura 6.6 - Distribuição da duração dos relâmpagos. Os NS- simples (17) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.3. Dia 22 de fevereiro de 2013

Durante 133 minutos de observação, 55 NS- foram registrados, sendo que a quantidade de NS-simples teve um fator 1,8 maior que a média geral de 20% encontrada bibliografia. A porcentagem de NS- simples foi de 36,4% (20). A média geométrica da multiplicidade ficou em 2,2 e a quantidade de DR encontrada foi 157. A multiplicidade máxima medida no dia 22 foi 10. A Figura 6.7 mostra a distribuição da multiplicidade do dia 22.

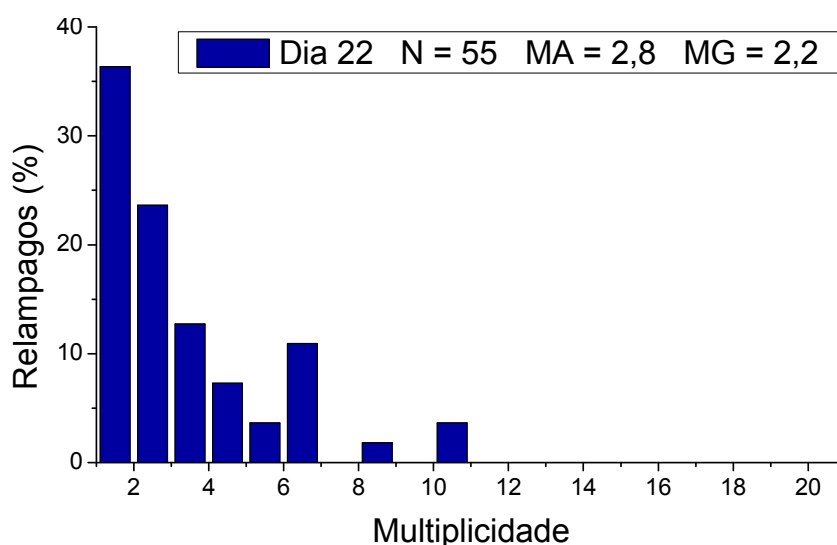


Figura 6.7 - Distribuição da multiplicidade para o dia 22. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica.

A quantidade de intervalos entre as DRs foi bem menor em relação aos outros dias. Levando-se em conta o elevado número de NS- simples, foram analisados 91 intervalos. O intervalo com duração máxima neste dia foi de 495,6 ms entre a primeira e segunda DR, com presença de CC longa de 379,6 ms na primeira DR e CC curta de 32 ms na segunda, referente a um relâmpago de multiplicidade 4, com presença de CC em todas as DRs. A média geométrica para todos os intervalos foi de 61,6 ms, valor similar ao encontrado nos outros dias. A Figura 6.8 mostra a distribuição dos intervalos entre as DRs.

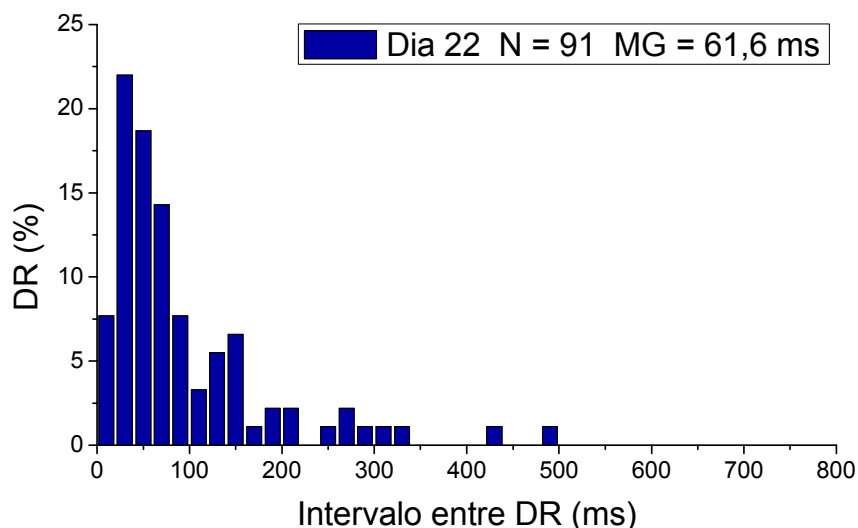


Figura 6.8 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.

A duração dos NS- observados neste dia teve média geométrica de 193,1 ms. Como nos demais dias, apenas os relâmpagos múltiplos entraram na análise, cujo valor está abaixo do encontrado para os outros dias. A duração máxima observada foi de 852 ms referente a um relâmpago com multiplicidade 10 e presença de CC em todas as DRs. A Figura 6.9 mostra a distribuição da duração para os 35 NS- múltiplos.

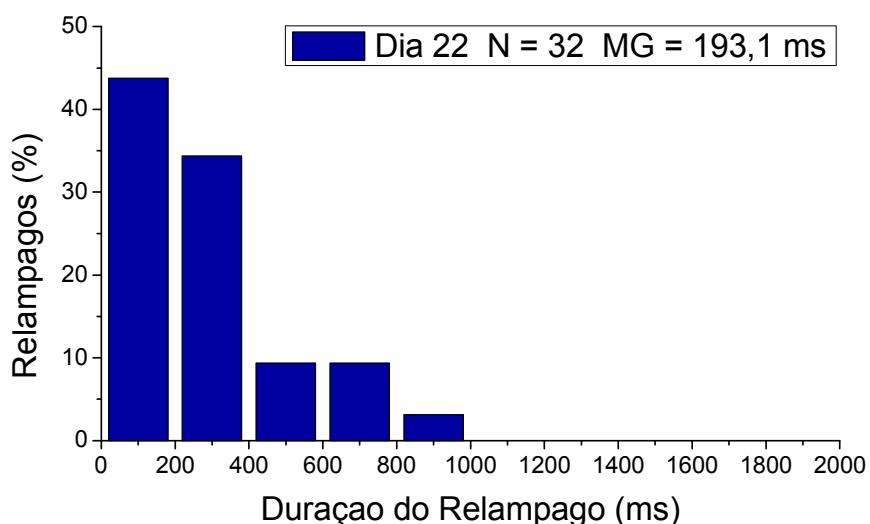


Figura 6.9- Distribuição da duração dos relâmpagos. Os NS-simples (20) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.4. Dia 06 de março de 2013

De todos os dias de filmagem, segundo dados da rede de detecção, neste dia ocorreu a maior atividade elétrica na região nos últimos 10 anos. 117 NS- foram registrados durante 209 minutos de observação e apresentaram 461 DRs. A porcentagem de NS- simples foi de apenas 12,8% (15), enquanto a média geométrica da multiplicidade foi a maior de todos os dias 3,8. A multiplicidade máxima encontrada foi 20. A Figura 6.10 mostra a distribuição da multiplicidade para os 117 NS-.

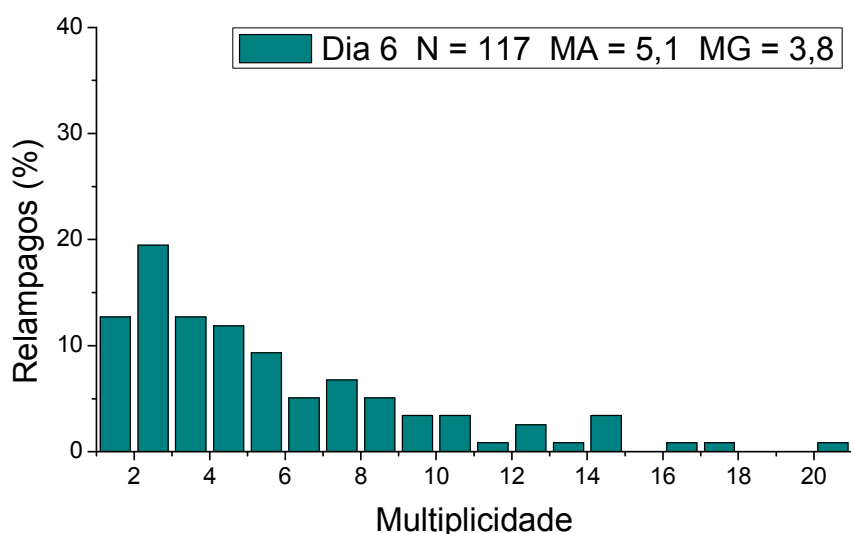


Figura 6.10 - Distribuição da multiplicidade para o dia 06. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da multiplicidade.

Foram medidos 461 intervalos referentes a 599 DRs, a média geométrica para esses intervalos ficou em 52 ms, valor abaixo dos encontrados para os outros dias. O maior intervalo foi 772 ms, entre a segunda e terceira DR com presença de CC longa na segunda DR e referente a um relâmpago de multiplicidade 4 e três pontos de contato com o solo. A Figura 6.11 mostra a distribuição para os intervalos entre DRs para o dia 6.

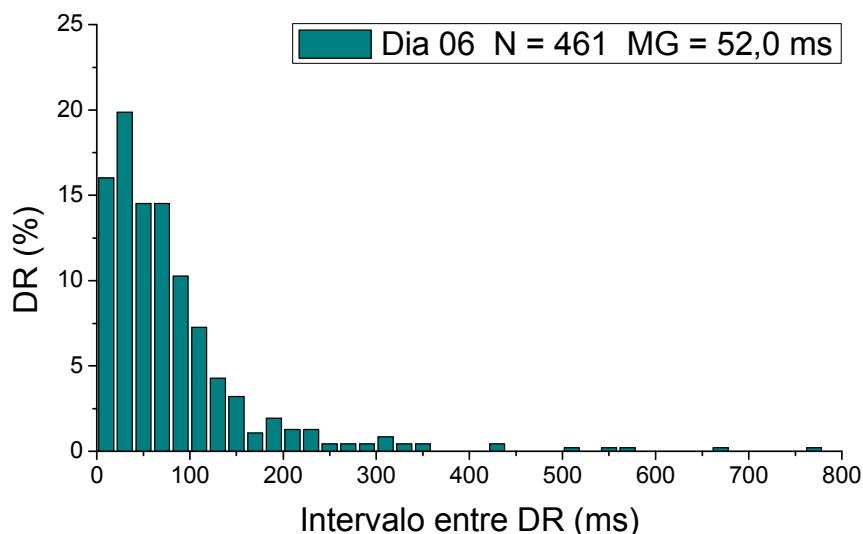


Figura 6.11 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.

A média geométrica da duração para os relâmpagos múltiplos foi de 280,1 ms, valor acima dos encontrados para os outros dias. A duração máxima foi de 1800,0 ms referente ao NS- que teve 12 DRs e dois pontos de contato com o solo. A Figura 6.12 mostra a distribuição da duração para o dia 6.

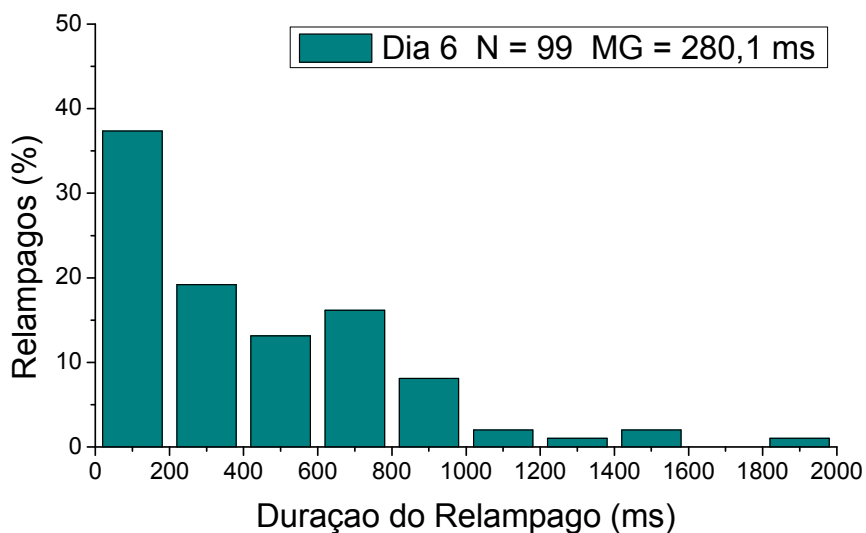


Figura 6.12 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-. Os NS - simples (18) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.5. Dia 08 de março de 2013

Foi o dia que registrou a menor quantidade de NS-, 45 relâmpagos foram filmados durante 126 minutos de observação. A porcentagem de NS- simples ficou acima da média encontrada em outros trabalhos, 31,9% (15) tiveram apenas uma DR. Os relâmpagos deste dia apresentaram um total de 168 DRs e a média geométrica para a multiplicidade foi de 2,5. A Figura 6.13 mostra a distribuição da multiplicidade para o dia 08.

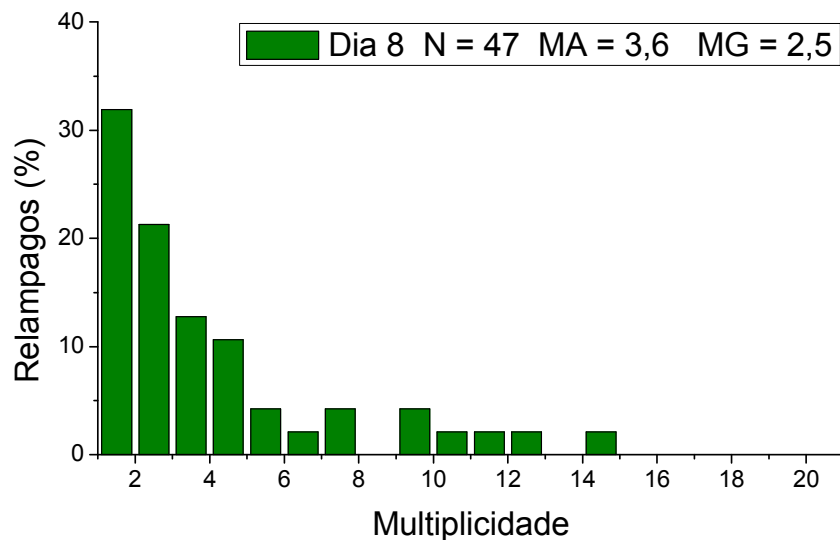


Figura 6.13 - Distribuição da multiplicidade para o dia 08. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética da multiplicidade e MG é a média geométrica da multiplicidade.

Foram medidos 117 intervalos entre as DRs. A média geométrica para esses intervalos ficou em 47,8 ms, valor próximo do encontrado para o dia 22. O intervalo máximo encontrado foi de 562,5 ms entre a primeira e segunda DR que seguiu em um novo canal para o solo, referente a um relâmpago que teve multiplicidade 4 e dois pontos de contato com o solo. A Figura 6.14 mostra a distribuição para os intervalos entre DRs para o dia 08.

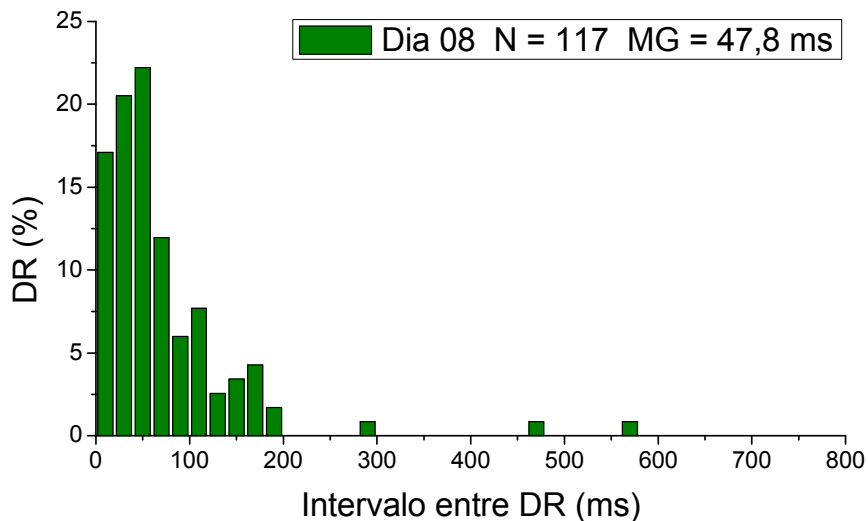


Figura 6.14 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa a quantidade de DR e MG representa a média geométrica dos intervalos.

Excluindo a porcentagem de NS- simples, os 32 relâmpagos múltiplos tiveram média geométrica da duração de 248,7 ms. A duração máxima encontrada neste dia foi de 1082 ms, referente a um relâmpago com multiplicidade 14 e sem presença de CC. A Figura 6.14 mostra a distribuição da duração para o dia 8.

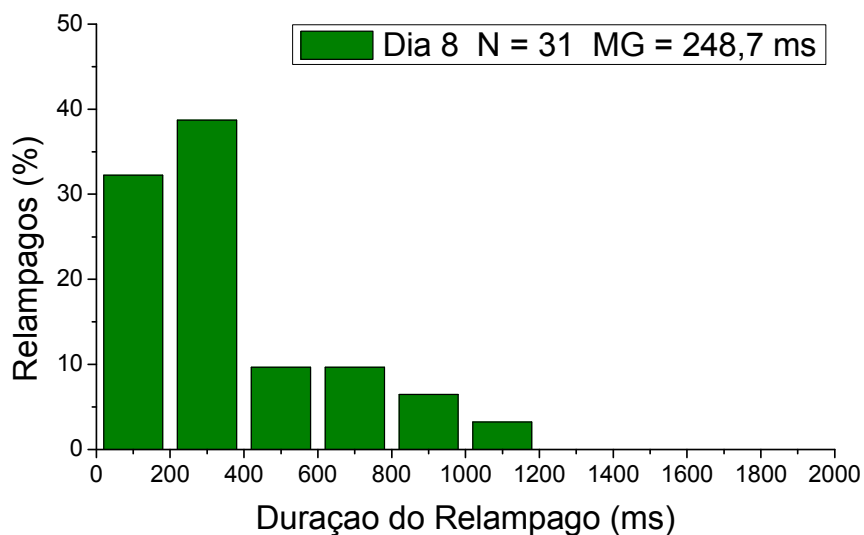


Figura 6.14 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-, os simples (16) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.6. Todos os relâmpagos

O número total de descargas de retorno para todos os dias de tempestade foi 1563, referentes a 361 NS-, sendo que 20,7 % (75) dos relâmpagos tiveram apenas uma descarga. A média geométrica da multiplicidade foi de 3,2. Esse valor é próximo do valor encontrado por Ballarotti (2012) em São José dos Campos (Brasil). A Figura 6.15 mostra a distribuição da multiplicidade dos NS- para os cinco dias de tempestade.

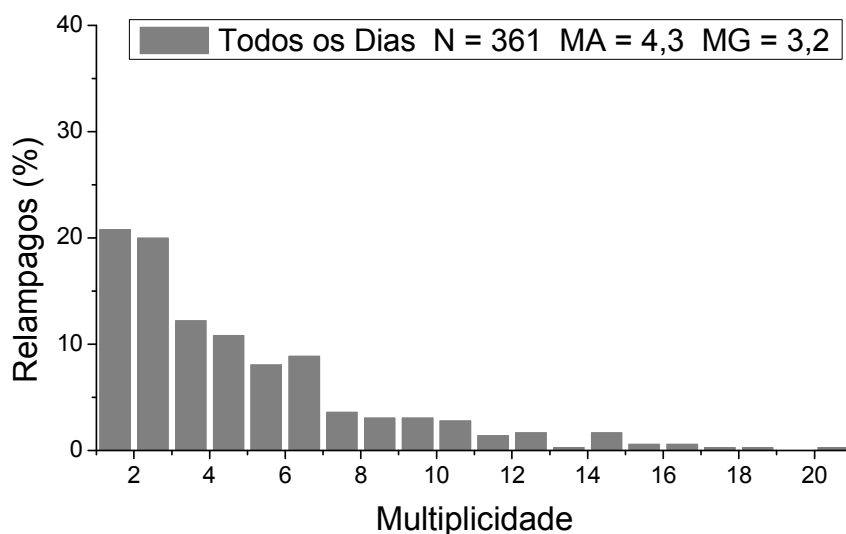


Figura 6.15 - Distribuição da multiplicidade para os cinco dias de tempestade. N é o número de relâmpago NS- e MA é a média aritmética e MG é a média geométrica da multiplicidade.

Foram medidos 1160 intervalos entre descargas para 361 relâmpagos. Aqueles que apresentaram intervalos muito longos estão associados a corrente continua, sendo que o maior intervalo encontrado foi no dia 06/03 com 772 ms, entre a primeira e segunda descarga de retorno. A média geométrica foi 56,7 ms, valor similar ao encontrado em outros trabalhos.

A Figura 6.16 apresenta a distribuição dos intervalos entre as descargas para todos os NS-. A distribuição dos intervalos não teve variação significativa entre um dia e outro.

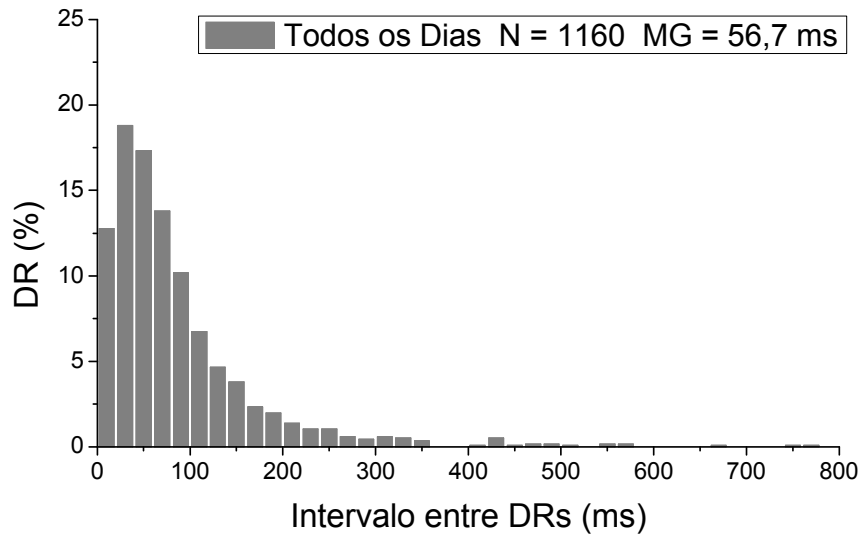


Figura 6.16 - Distribuição dos intervalos entre as descargas de retorno (DR). A letra N representa o número de DRs e MG representa a média geométrica dos intervalos entre as DRs.

Foram utilizados 278 relâmpagos múltiplos para a análise da duração, pois como já mencionado, a duração dos NS- simples (75) não foi incluída. A média geométrica (GM) da duração foi de 270,2 ms. A Figura 6.17 mostra a distribuição geral da duração de todos os NS-.

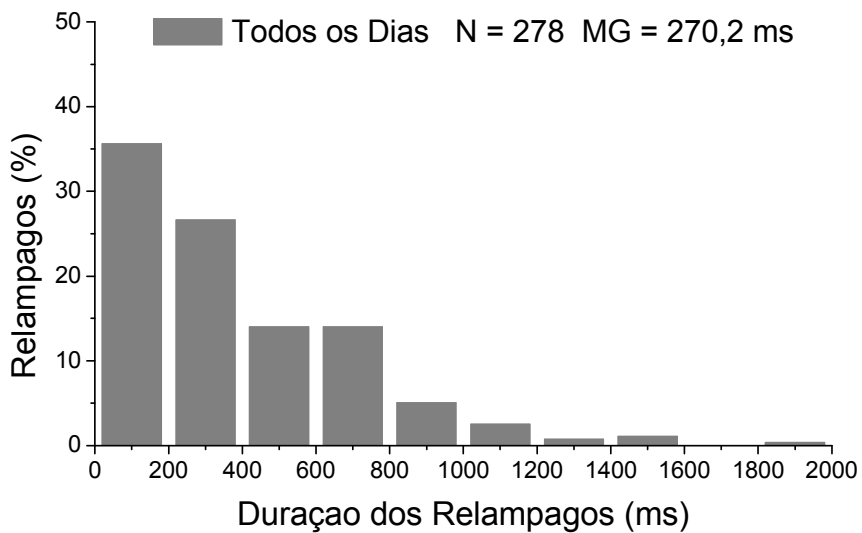


Figura 6.17 - Distribuição da duração dos relâmpagos NS-, os NS- simples (83) não foram incluídos na análise. N é o número de relâmpago NS- e MG é a média geométrica da duração.

6.7. Discussão sobre os resultados preliminares

A quantidade de NS- variou apreciavelmente em cada um dos dias de tempestade. Enquanto o dia 06/03 teve 117 relâmpagos registrados, o dia 08/02 teve apenas 47, como mostra a Tabela 6.2. Mesmo com essa diferença entre a quantidade de relâmpagos, foi possível fazer uma análise estatística das características dos NS- por dia de tempestade. O período de observação de cada dia foi aproximadamente a duração da tempestade.

Tabela 5.2 - Resumo dos parâmetros analisados por dia de tempestade e para todos os dias.

Dia	Quantidade de NS-	Número de DRs	NS-simples (%)	Multiplicidade (MA)	Intervalo entre DRs (ms)	Duração (ms)
18/02	68	287	17,6	4,3	56,2	235,9
19/02	74	350	17,5	4,7	69,6	358,5
22/02	55	157	36,4	2,8	61,6	193,1
06/03	117	599	12,8	5,1	52,0	280,1
08/03	47	168	31,9	3,6	69,6	371,0
Todos	361	1561	20,7	4,3	56,7	270,2

Além da quantidade de relâmpagos, também foram encontradas diferenças significativas em relação à quantidade de NS- simples, à multiplicidade e à duração dos relâmpagos, lembrando que a região em que ocorreram as tempestades foi a mesma. Considerando a análise isolada, entre o dia com a maior e menor multiplicidade média houve uma diferença de aproximadamente o dobro.

Estudos realizados anteriormente na mesma região encontraram valores para multiplicidade média entre 3,8 e 4,6 (SABA et al., 2006, BALLAROTTI et al, 2012). O valor encontrado no presente trabalho, para multiplicidade média considerando todos os dias foi de 4,3. Esses números são bastante similares. Contudo, a análise por dia mostrou variações consideráveis. O dia 06/03, por exemplo, apresentou multiplicidade média de 5,1 com 34,2% (40) dos relâmpagos com multiplicidade acima de 5, enquanto o dia 22/02 apresentou

multiplicidade média de 2,8 e apenas 16,4% (9) dos relâmpagos com multiplicidade acima de 5.

É interessante notar que o dia 06 também mostrou a menor porcentagem de NS- simples (12,8%). De forma contrária, o dia 22 mostrou a maior porcentagem de NS- simples (36,4%). Esse valor é bem maior que valor encontrado para média de NS- simples (20,7 %) calculada para todos os dias de tempestade. Esses resultados mostraram que o dia 22 é muito interessante para ser estudado com mais detalhes em trabalhos futuros.

A média geométrica da duração para todos os dias foi 270,2 ms. Esse valor está entre os valores encontrados em trabalhos desenvolvidos na mesma região (SABA et al. 2006, SARAIVA et al. 2010 e BALLAROTTI, 2012). Porém, na análise por dia de tempestade, a média geométrica da duração variou entre 193,0 ms (dia 22/02) e 398,5 ms (dia 19/02). Observou-se que apenas 3% dos relâmpagos apresentaram duração acima de 1000 ms. O dia 06/03 apresentou um caso extremo de um NS- que durou aproximadamente 1800 ms. Esse relâmpago apresentou multiplicidade 12, sendo que a 12ª DR ocorreu fora do campo de visada da câmera. Em função disso só foi possível registrar sua luminosidade. A duração total do relâmpago pode ter sido maior do que 1800 ms, uma vez que não se sabe o instante exato em que a luminosidade do canal se extinguiu. Pode ter ocorrido CC longa na 12ª DR que não foi observada. Medidas do campo elétrico poderiam complementar a análise. A Figura 5.18 mostra a 11ª e a 12ª DR respectivamente.

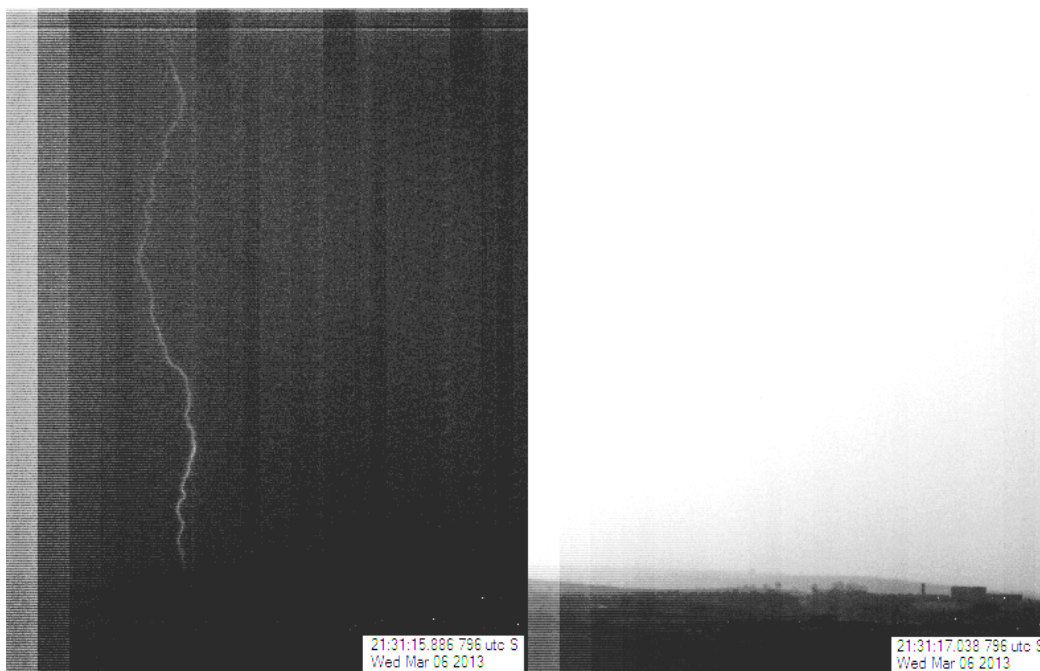


Figura 5.18 - Relâmpago com duração de 1800 ms. A primeira imagem mostra a 11° DR dentro do campo de visada da câmera e a segunda imagem mostra somente a luminosidade da 12° DR comprovada pela rede de detecção.

7. ANÁLISE DOS DADOS

7.1. Método de reamostragem Monte Carlo

A Tabela 7.1 mostra o intervalo de erro padrão da média de cada característica dos relâmpagos.

Tabela 7.1- Intervalo de erro padrão da média de cada característica dos relâmpagos considerado para análise dos resultados do método de Monte Carlo.

Dia	Intervalo de Erro Padrão da Média		
	Multiplicidade	Intervalo entre DR	Duração
18/02	2,9 – 3,5	52,5 – 60,2	210,1 – 264,8
19/02	3,3 – 3,9	66,0 – 73,2	323,2 – 397,5
22/02	2,0 – 2,4	55,4 – 68,4	162,2 – 299,8
06/03	3,5 – 4,1	49,6 – 54,5	252,0 – 311,3
08/03	2,2 – 2,8	43,8 – 52,2	205,9 – 300,2
Todos	3,0 – 3,3	55,1 – 58,4	255,0 – 286,4

O resultado para cada dia foi apresentado em forma de porcentagem, como mostra a Tabela 7.2. Utilizando um critério comum em estatística que considera significância de 95%, as distribuições que apresentaram porcentagem abaixo de 5% não foram consideradas como flutuação estatística e sim como anomalias. Já as distribuições que apresentaram porcentagem abaixo de 15% e acima de 5% estão dentro da flutuação estatística, porém tiveram uma porcentagem considerada baixa.

Tabela 7.2- Porcentagem de vezes que a distribuição de cada característica foi reproduzida pelo Monte Carlo.

Dia	Multiplicidade (%)	Intervalo entre DR (%)	Duração (%)
18/02	70,5	61,7	38,4
19/02	49	2,2	13,6
22/02	0,3	67	16,1
06/03	12,6	11,2	76,2
08/03	16,1	12,9	65,2

*Os valores em vermelho apresentaram porcentagem abaixo de 5% e os valores em azul apresentaram porcentagem abaixo de 15%.

O objetivo principal do método Monte Carlo foi verificar se o tamanho das amostras, referentes a cada dia, influenciou nas diferenças encontradas. O

método reproduziu 1000 novas amostras de tamanho igual ao da amostra original. O resultado obtido foi que as características que apresentaram diferenças consideradas relevantes durante a primeira análise, também foram mal reproduzidos pelo método.

Quando o método foi aplicado para a multiplicidade dos relâmpagos, os dias 22/02 e 06/03 apresentaram baixa porcentagem e também diferenças significativas nas características dos raios durante a primeira análise.

A multiplicidade média do dia 22/02 foi 2,8, esse valor foi abaixo da média encontrada para todos os dias (4,3). A multiplicidade média para todos os dias é similar a multiplicidade média encontrada em outros estudos (RAKOV et al., 1994; COORAY E JARAYARATNE, 1994; SABA et al., 2006; SARAIVA et al., 2010 E BALLAROTTI et al., 2012). O Monte Carlo reproduziu a distribuição encontrada no dia 22/02 em apenas 0,3% das 1000 novas amostras. Essa quantia é considerada muito baixa, sendo assim, essa distribuição é uma anomalia.

Já a multiplicidade média do dia 06/03 foi 5,1, esse valor é acima da média encontrada para todos os dias, o método reproduziu a mesma distribuição encontrada neste dia em 12,6% das 1000 novas amostras, embora esse valor faça parte da flutuação estatística, esse valor foi considerado baixo.

Quando o Monte Carlo foi aplicado para os intervalos entre as DRs, os dias 19/02, 06/03 e 08/03 apresentaram baixa porcentagem. Comparando com a primeira análise, apenas o dia 19/02 apresentou diferença relevante para a distribuição dos intervalos (69,6 ms). A análise considerou como base a média geométrica de todos os dias (56,7 ms). Esse valor também foi muito próximo dos valores encontrados por outros autores (RAKOV et al., 1994; COORAY E JARAYARATNE, 1994; SABA et al., 2006; SARAIVA et al., 2010 E BALLAROTTI et al., 2012).

O dia 19 apresentou média geométrica de 69,5 ms. Esse valor é bem acima da média encontrada para todos os dias. O Monte Carlo reproduziu apenas 2,2%

das 1000 novas amostras a mesma distribuição encontrada neste de intervalo encontrada neste dia. Esse resultado mostrou que a distribuição de intervalos entre as DRs deste dia também foi uma anomalia. Embora os dias 06/03 e 08/03 tenham apresentado valores de intervalos abaixo da média tomada como base, (51,9 ms e 47,8 ms respectivamente), essas distribuições não foram bem reproduzidas pelo método e apresentam porcentagem abaixo de 15%.

Quando o Monte Carlo foi aplicado para a duração dos relâmpagos, nenhum caso foi considerado anomalia. Porém, o dia 19/02 apresentou porcentagem abaixo de 15%. Como para os outros casos, a distribuição que foi mal reproduzida pelo método também apresentou diferenças relevantes na primeira análise. O dia 19 apresentou média geométrica da duração de 358,5 ms. Esse valor foi bem superior ao valor encontrado para a média geométrica da duração dos relâmpagos de todos os dias de tempestade (270,2 ms). Embora o dia 22/02 tenha apresentado porcentagem acima de 15%, porém bem próxima desse valor (16,1 %), a média geométrica da duração encontrada neste dia foi bem distante da média encontrada para todos os dias.

Os resultados obtidos pelo Monte Carlo comprovaram estatisticamente a existência de diferenças significativas entre as características visíveis dos NS- quando estudadas por dia de tempestade. As características dos relâmpagos apresentaram diferenças na primeira análise, também foram mal reproduzidos pelo Monte Carlo.

7.2. Análise meteorológica das tempestades

A análise das condições meteorológicas dos cinco dias de tempestade foi feita com base nas imagens do satélite GOES13, que estão disponíveis na página do CPTEC, <http://satelite.cptec.inpe.br>. O satélite fornece imagens realçadas da temperatura do topo da nuvem.

As condições de tempo para os cinco dias foram bem parecidas, pois a instabilidade atmosférica associada à termodinâmica (calor e alta umidade) local do Vale do Paraíba foram as grandes responsáveis pela formação de

núcleos convectivos com grande desenvolvimento vertical. As Figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 mostram as imagens de satélite para cada um dos dias de tempestade. O círculo vermelho indica a região de tempestade localizada no Vale do Paraíba, região onde foram filmados os relâmpagos.

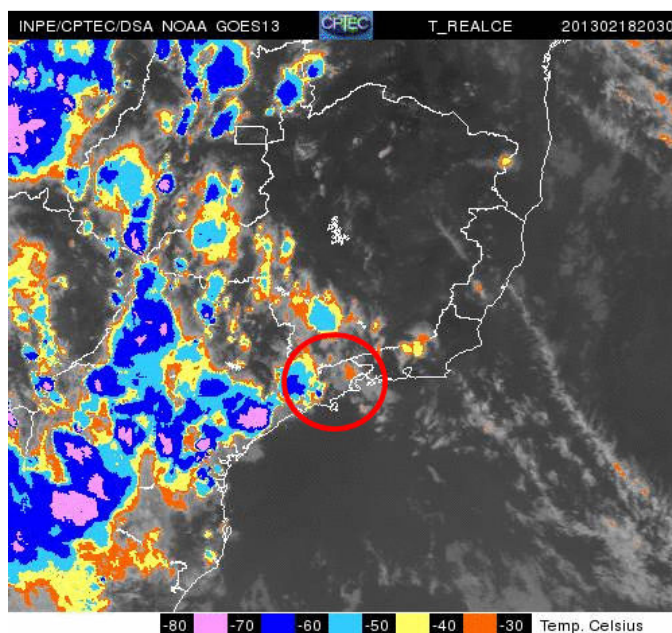


Figura 7.1 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 18/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 20h30min UT.
Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>

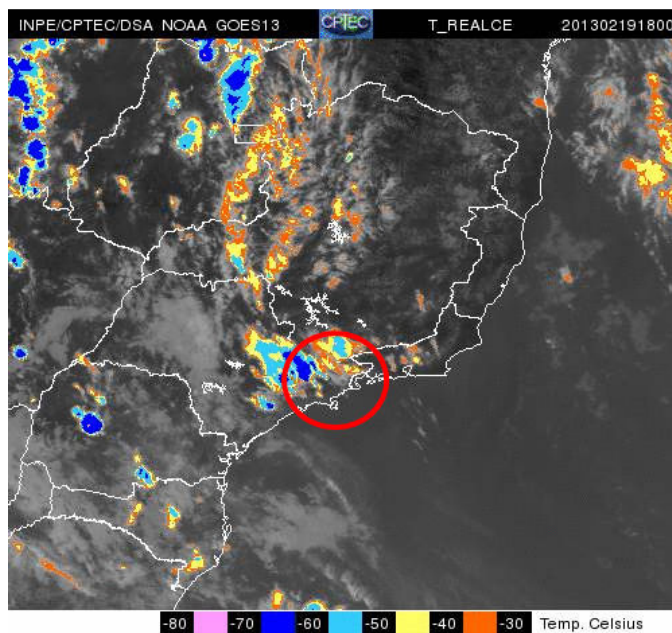


Figura 7.2 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 19/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 18h00min UT.
Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>

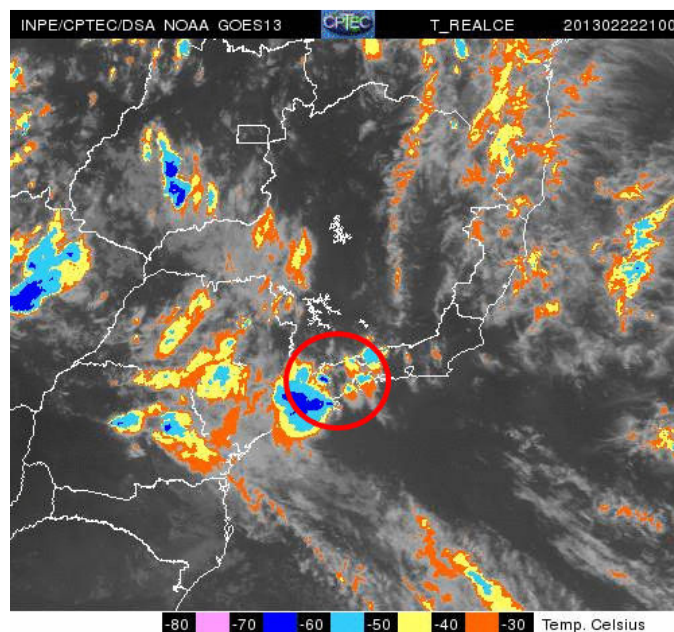


Figura 7.3 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 22/02/2013. Imagem do satélite GOES13 às 21h00min UT.
 Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>

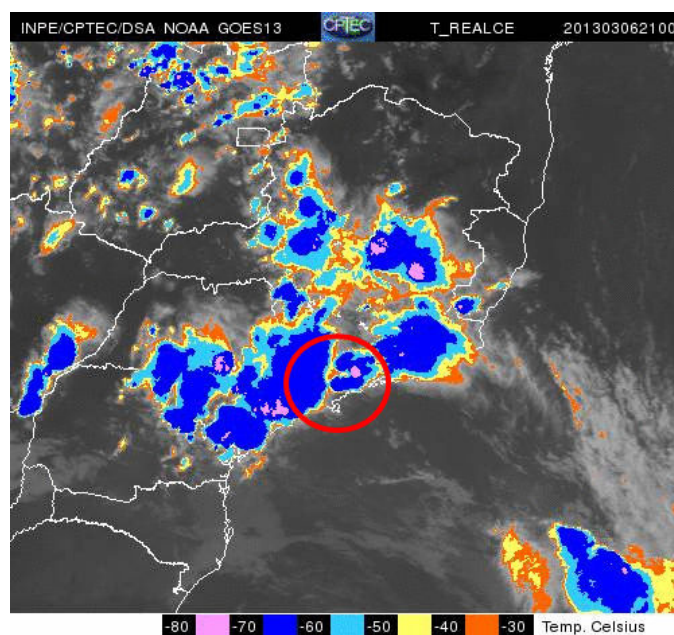


Figura 7.4 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 06/03/2013. Imagem do satélite GOES13 às 21h00min UT.
 Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>

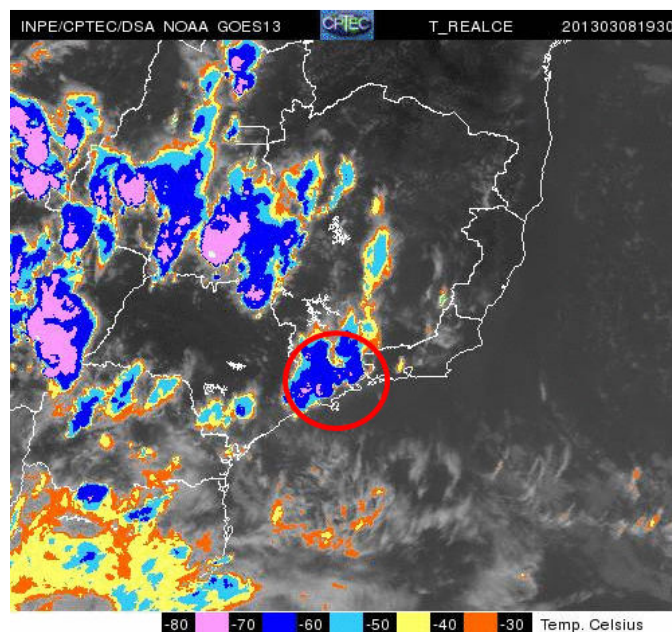


Figura 7.5 - Imagem de satélite realçada da temperatura do topo da nuvem para o dia 08/03/2013. Imagem do satélite GOES13 às 19h30min UT.
 Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>

Apesar das condições de tempo para cada dia serem bem parecidas, nos dias 22/02 e 06/03 a convecção local foi reforçada pela presença de um sistema frontal. No dia 22/02 o sistema estava atuando na costa do estado do Paraná e do estado de São Paulo. No dia 06/03 o sistema frontal estava atuando sobre o oceano atlântico (ZEPKA, G. S., 2013, comunicação pessoal). Como mencionado no capítulo 2, as frentes estão associadas à formação de ondas frontais que provocam distúrbio na atmosfera local. Esse distúrbio, provocado pelas frentes, favorece a formação de grandes nuvens convectivas.

7.3. Análise dos dados de radar e da rede de detecção

Nesta análise, os dados do radar meteorológico e da rede de detecção foram utilizados para buscar uma explicação dos fatores que foram determinantes para essas diferenças encontradas nas características dos relâmpagos em cada dia de tempestade.

Os dados do radar e da rede de detecção foram projetados juntos, através do software MapInfo. Esse software tem a capacidade de fazer a associação entre dados de tabelas e imagens georreferenciadas (contém informações de latitude

e longitude). No caso desta análise, as tabelas continham informações da rede de detecção e as imagens os dados de refletividade do radar.

O radar gera imagens da refletividade da nuvem a cada 15 minutos. Já a rede fornece dados contínuos da localização e do instante em que ocorreram os relâmpagos. Sendo assim, os dados da rede foram separados em tabelas, contendo dados com intervalos de tempo de 7,5 minutos antes e 7,5 minutos depois do horário de cada imagem fornecida pelo radar. A Figura 7.6 mostra um exemplo da imagem gerada pelo Mapinfo com a refletividade do radar projetado junto com os dados da rede.

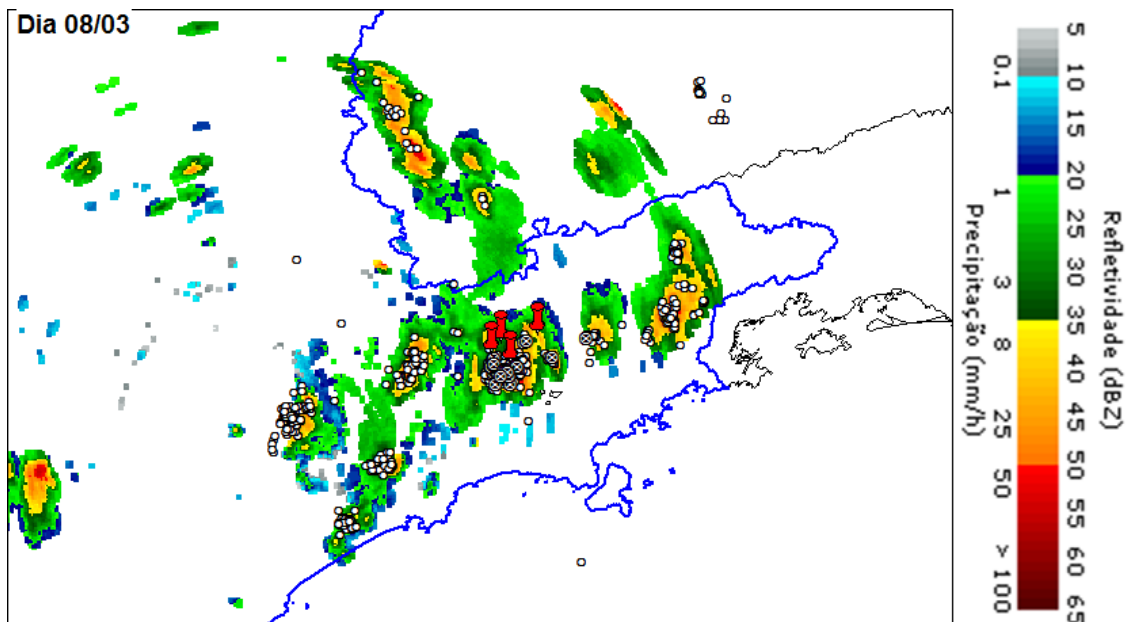


Figura 7.6- Exemplo de uma figura gerada pelo mapinfo. Imagem georreferenciada do radar junto com os dados da rede de detecção. Os quatro alfinetes vermelhos (📌) representam as localizações das RAMMERS, os pontos brancos (□) representam a localização dos relâmpagos que foram detectados pela rede e os pontos cruzados (⊗) representam a localização dos relâmpagos que foram detectados pela rede e registrados pelas câmeras.

A rede de detecção fornece a localização onde o relâmpago tocou o solo. De acordo com Saraiva (2010), a movimentação horizontal do canal, que desce para o solo, não é significativa. Desde o ponto de sua iniciação, até o contato com o solo, o canal se propaga de maneira quase retilínea, não alterando muito a distância horizontal, entre o ponto de iniciação e o ponto de contato no solo.

Sendo assim, assume-se que o ponto de localização da rede coincide com o ponto de iniciação do relâmpago.

A altitude do CAPPI utilizado foi de 5 km. Assim como a Figura 6.6, todas as imagens estudadas mostraram que mais de 90% dos relâmpagos NS- detectados pela rede, aconteceram dentro do contorno de refletividade a partir de 35 dBZ. Outros trabalhos na literatura, também apresentaram o mesmo resultado para essa refletividade (LUND et al., 2009 e SARAIVA, 2010).

Lund et al. 2009 apresentaram um estudo de caso em que a maioria dos relâmpagos iniciaram em regiões convectivas da nuvem que estavam dentro do contorno de 35 dBZ. Os relâmpagos iniciaram em duas faixas de altitude, 3-6 km e 7-10 km, ambas as regiões coincidem com o mecanismo de eletrificação da nuvem onde coexistem partículas de gelo como o graupel, granizo e cristal de gelo. Saraiva (2010) encontrou uma relação entre o aumento da multiplicidade e da duração dos relâmpagos NS- com o aumento da área de contornos de 35 dBZ.

Considerando que a região de cargas negativas da nuvem está relacionada com o contorno com refletividade a partir de 35 dBZ, sabe-se que a iniciação dos relâmpagos NS- ocorre dentro dessa região. As imagens geradas pelo Mapinfo foram utilizadas para identificar as células de tempestade que deram origem aos relâmpagos NS- que foram estudados em cada dia de tempestade. Assim foi possível estudar a relação entre o contorno de 35 dBZ de cada célula e as características dos NS-.

O contorno da área de 35 dBZ foi feito manualmente para cada célula de tempestade. Devido ao grande número de imagens, foram selecionados apenas dois casos para cada dia. O critério de seleção foi estimar a multiplicidade média para cada grupo de NS- pertencente a uma única célula de tempestade. As células que apresentaram relâmpagos com a maior e menor média de multiplicidade em cada dia foram selecionadas para essa análise mais precisa. As Figuras 7.7 a 7.11 mostram os dois casos escolhidos para cada dia.

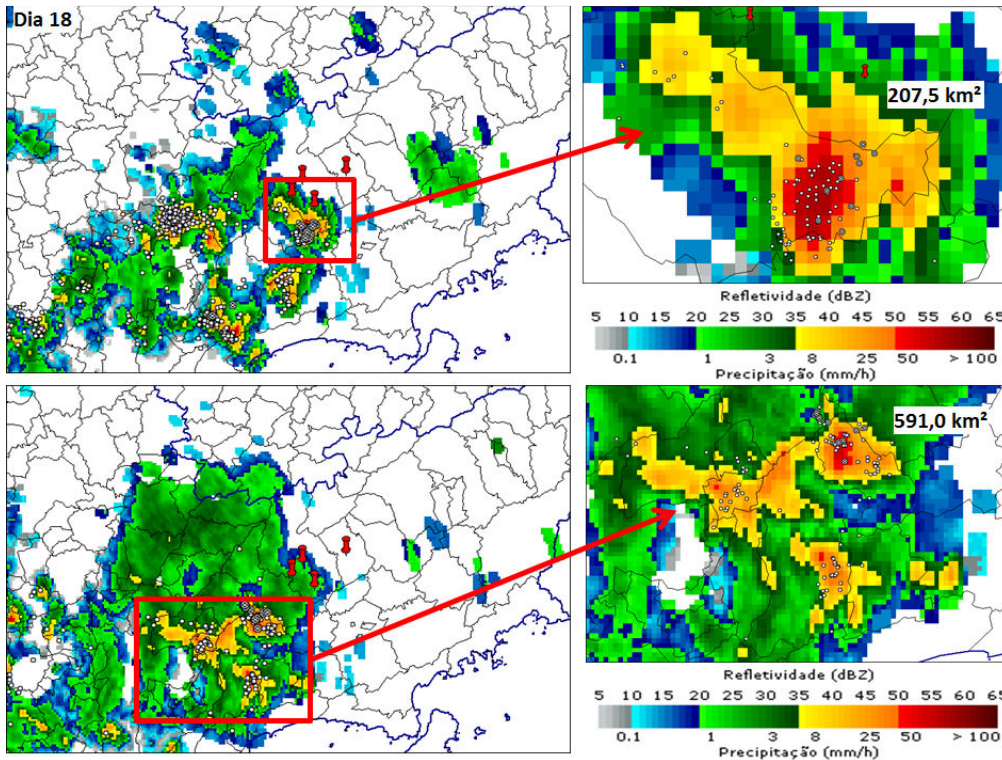


Figura 7.7 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 18/02. A célula menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 207,5 km² e a célula maior apresentou área de 591,0 km².

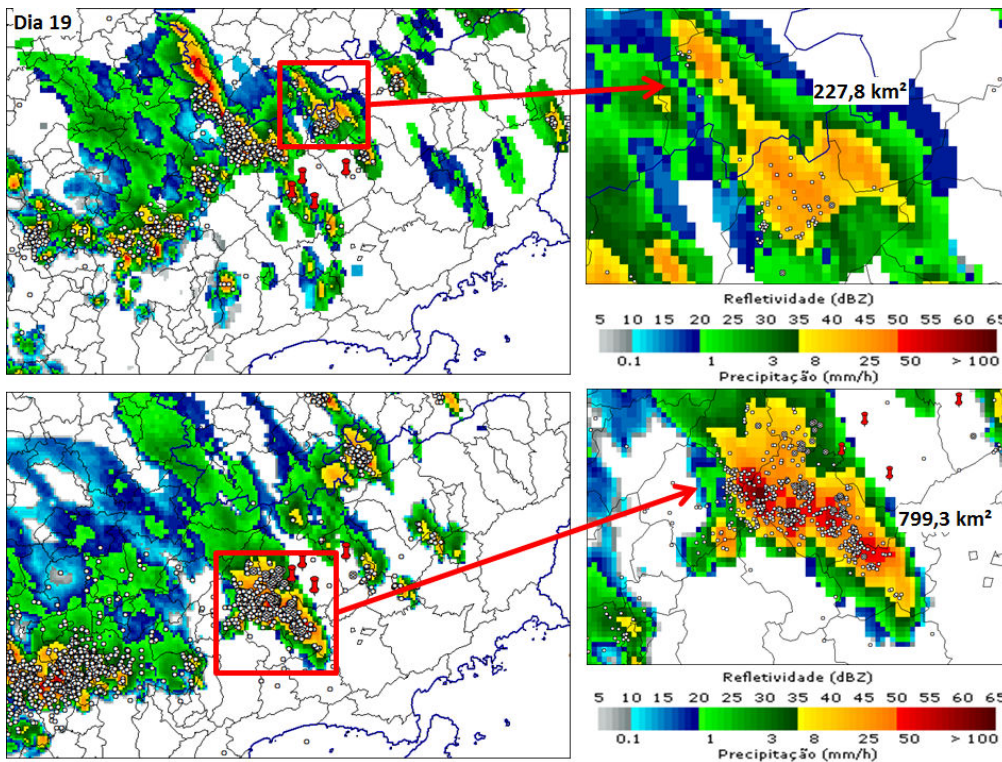


Figura 7.8 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 19/02. A célula a menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 227,8 km² e a célula a maior apresentou área de 799,3 km².

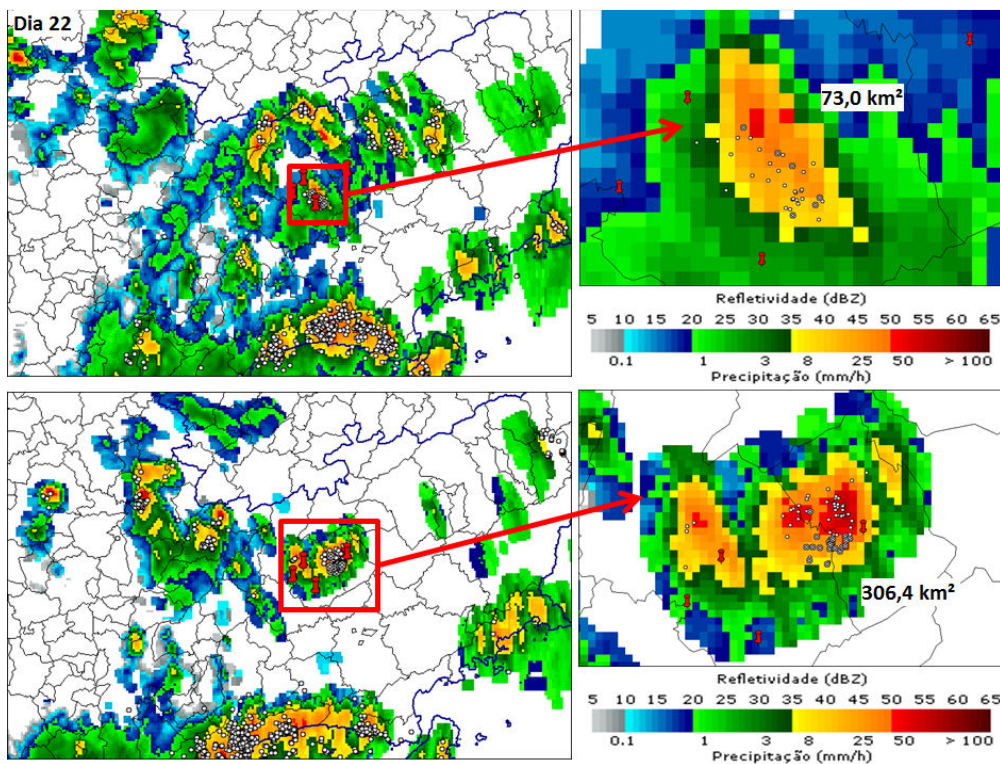


Figura 7.9 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 22/02. A célula menor apresentou área de contorno de 35 dBZ de aproximadamente 73,0 km² e a célula com a maior apresentou área de 306,4 km².

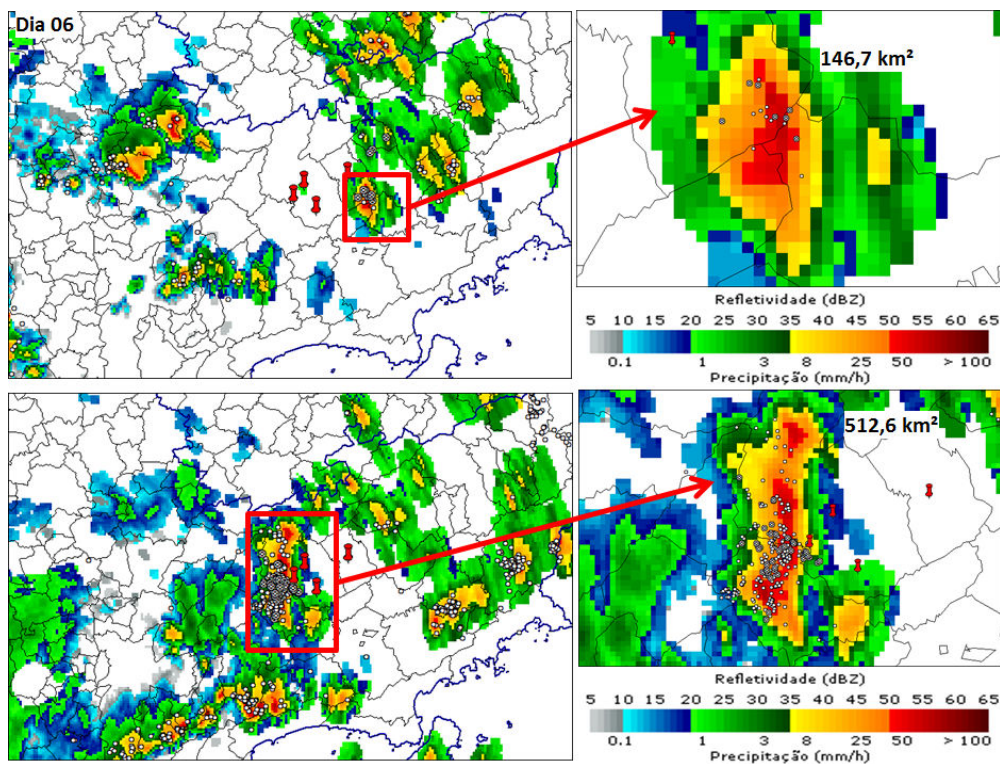


Figura 7.10 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 06/03. A célula menor apresentou área de contorno de 35dBZ de aproximadamente 146,7 km² e a célula maior apresentou área de 512,6 km².

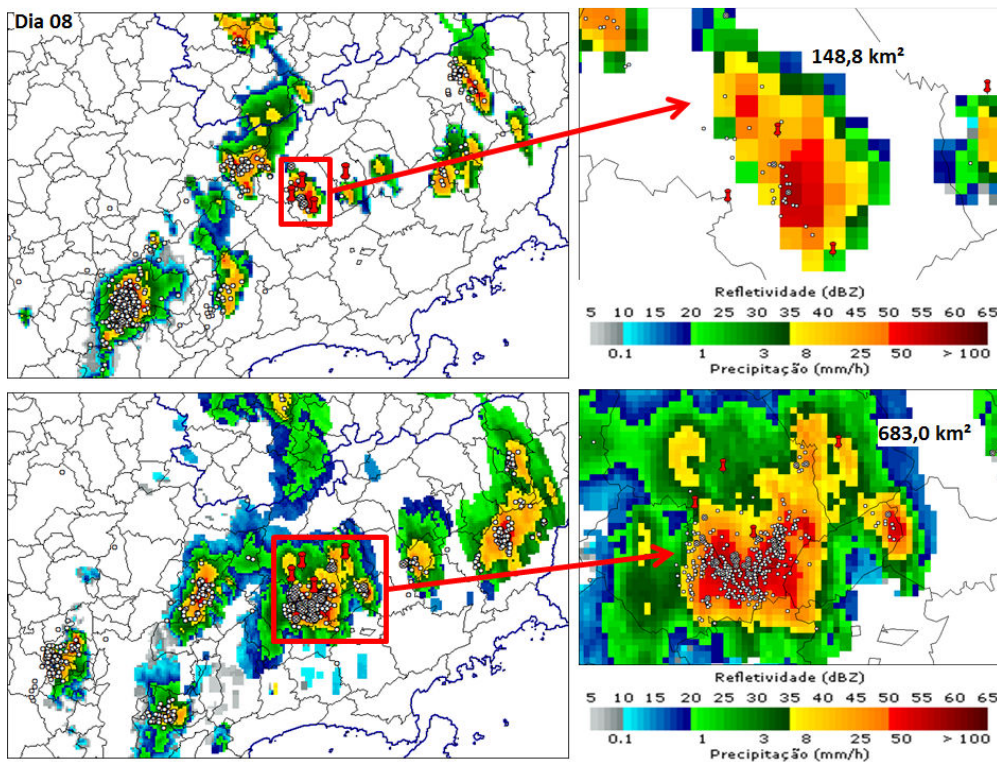


Figura 7.11 - Estudo de caso de duas células de tempestade do dia 08/03. A célula menor apresentou área de contorno de 35dBZ de aproximadamente 148,8 km² e a célula maior apresentou área de 683,0 km².

8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS FINAIS

A última análise utilizou dados do radar e da rede de detecção para verificar a relação entre a área de 35 dBZ e as características dos relâmpagos. Para cada dia foram selecionadas as células de tempestade para as quais os relâmpagos apresentaram a menor e maior média de multiplicidade. A tabela 8.1 apresenta os dados dos relâmpagos pertencentes a cada célula selecionada e a área de 35 dBZ que deu origem cada grupo de relâmpagos.

Tabela 8.1- Relação entre a multiplicidade, intervalo e duração da menor e maior área de 35 dBZ de cada dia de tempestade.

Dia	Área (km²)	Multiplicidade	Intervalo (ms)	Duração (ms)
18/02	207,5	3,6	95,6	239
18/02	591,0	5,5	90,2	352
19/02	227,8	2,5	132,6	203
19/02	766,3	6,1	123,9	588
22/02	73,0	1,4	90,3	58
22/02	306,1	3,5	171,7	343
06/03	146,7	2,2	76,0	87
06/03	512,6	8,9	79,8	606
08/03	148,8	2,4	42,9	166
08/03	683,0	6,3	81,8	456

Para a relação entre a área de 35 dBZ e cada uma das características foram apresentados também gráficos de dispersão. Os diagramas referentes às Figuras 8.1, 8.2 e 8.3 mostram que a multiplicidade, a duração dos relâmpagos e os intervalos entre as DRs apresentam um crescimento linear com o aumento da área de 35 dBZ até 400 km². Para contornos acima de 400 km² essas características dos relâmpagos NS- não seguem mais nenhum padrão.

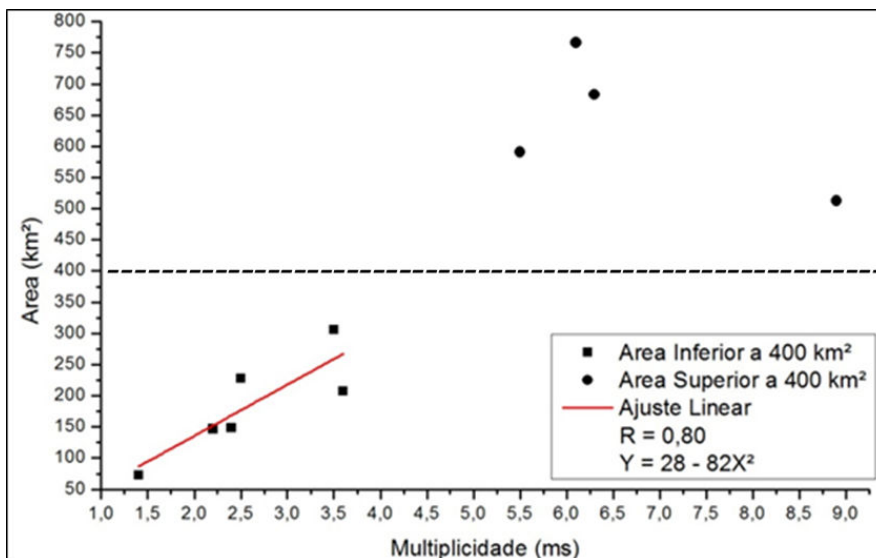


Figura 8.1 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação à multiplicidade. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi R = 0,80. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação.

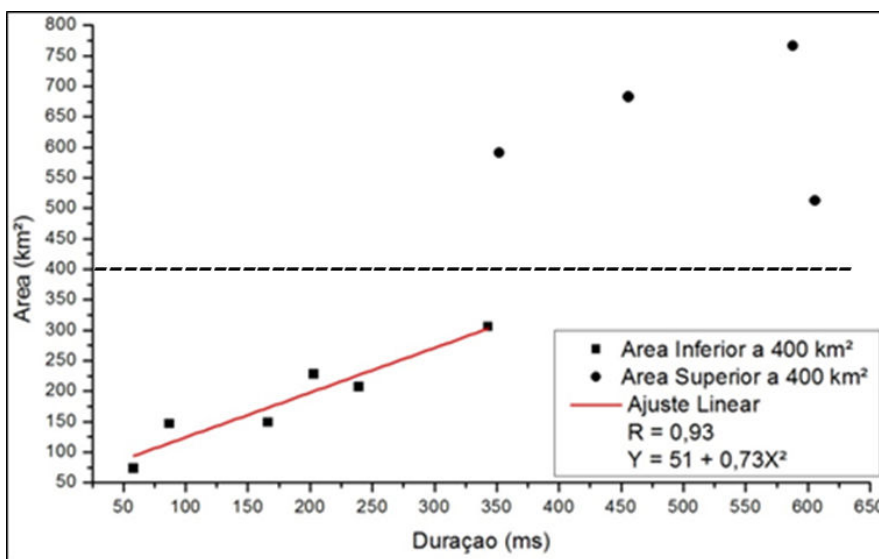


Figura 8.2 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação à duração. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi R = 0,93. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação.

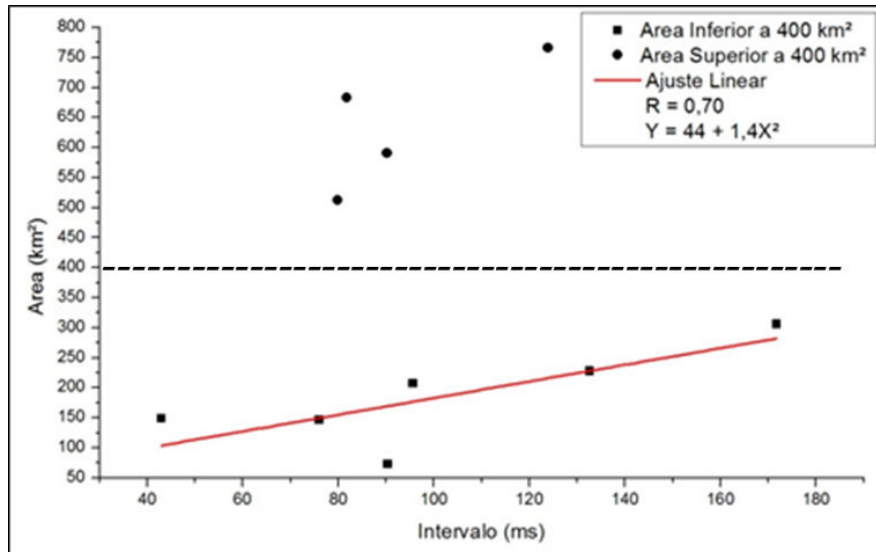


Figura 8.3 - Gráfico de dispersão da área de 35 dBZ em relação aos intervalos entre as DRs. A linha vermelha é um ajuste linear aplicado aos dados com área inferior a 400 km². O coeficiente de correlação foi R = 0,70. Os dados superiores a essa área não apresentaram nenhuma relação.

A partir área de 400 km², a multiplicidade, a duração dos relâmpagos e o intervalo entre as DRs deixam de seguir a tendência crescente em relação ao crescimento do contorno de 35 dBZ. A partir dessa área os parâmetros não apresentam nenhuma relação. Esse comportamento está vinculado ao fato de que as células de tempestade com tamanhos menores que 400 km² geralmente são células únicas e de convecção local. Já as células maiores que 400 km² geralmente são formadas por múltiplas células, onde há troca de massa e conseqüentemente de carga elétrica entre essas células. Devido a isso fica difícil identificar exatamente a área de 35 dBZ que dá origem ao relâmpago.

A Figura 8.4 mostra o gráfico de dispersão do intervalo entre as DRs em função da multiplicidade, incluindo dados dos cinco dias de tempestade. Ao observar o diagrama é possível perceber uma tendência do intervalo entre as DRs diminuir com o aumento da multiplicidade.

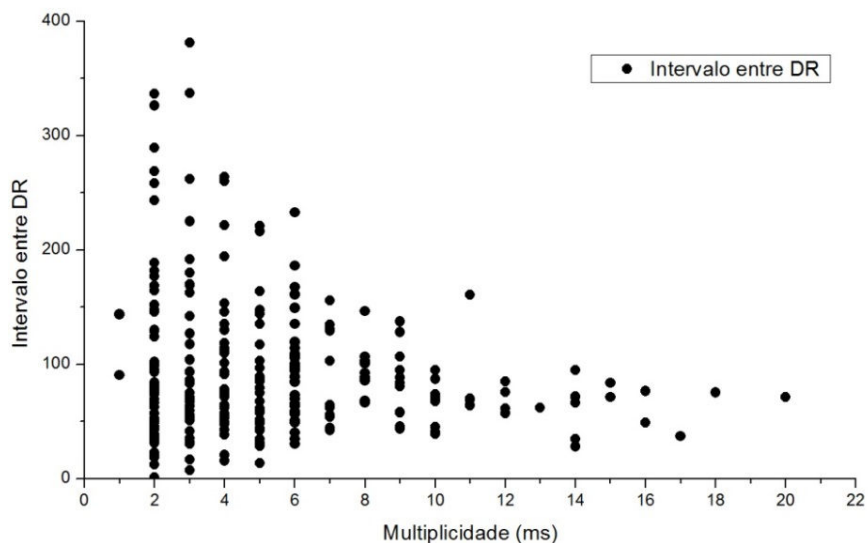


Figura 8.4 - Gráfico de dispersão do intervalo entre DR em relação à multiplicidade.

Schulz et al. (2005) sugerem que o decréscimo do intervalo com o aumento da multiplicidade pode estar relacionado à regiões da nuvem com maior concentração de carga. Possivelmente, os relâmpagos que se desenvolvem nessas regiões apresentam maior multiplicidade e intervalos mais curtos. Apesar do diagrama mostrar que existe uma relação entre a multiplicidade e o intervalo entre as DRs, outros fatores, como a corrente contínua (MEDEIROS, 2011), também podem influenciar no tempo de intervalo entre as DRs. Portanto, a variação da área de 35 dBZ não tem tanta influência sobre essa característica.

O gráfico de dispersão da Figura 8.5 mostra a relação entre a duração e a multiplicidade dos relâmpagos, referentes aos cinco dias de tempestade. Ao observar o diagrama é possível perceber que existe uma duração mínima para cada multiplicidade e que a multiplicidade tende a aumentar linearmente com a duração até um limite máximo. Saba et al. (2006) sugerem duas possíveis explicações para esse comportamento. A primeira explicação é que existe um tempo mínimo para que temperatura do canal decaía lentamente até que existam condições propícias para a inicialização e propagação de um novo líder contínuo (UMAN E VOSHALL, 1968).

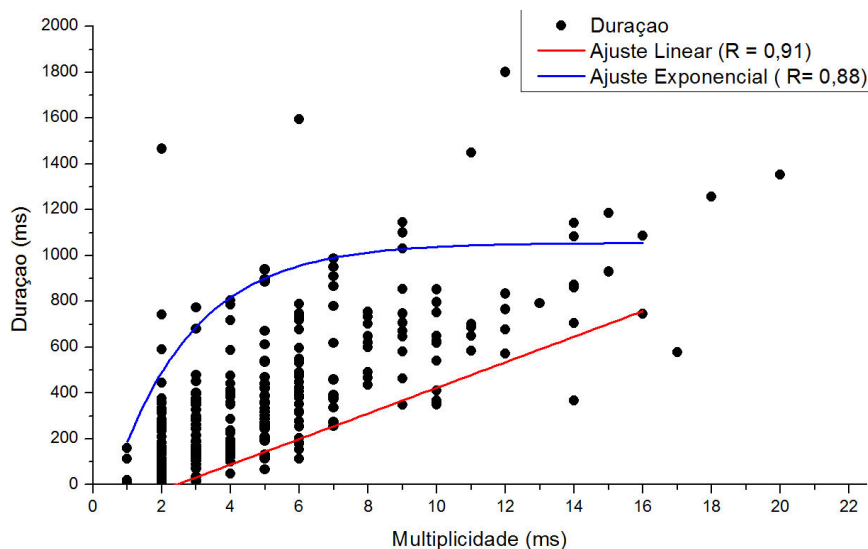


Figura 8.5 - Gráfico de dispersão duração em relação à multiplicidade dos relâmpagos. R é o ajuste feito com base nos valores máximos e mínimos.

A segunda explicação é que existe uma taxa máxima de carga que a nuvem pode fornecer para sustentar uma DR. Considerando a teoria do líder bidirecional, esta segunda hipótese propõe que existe um tempo médio mínimo exigido para que o líder positivo dentro da nuvem consiga fornecer cargas suficientes para que uma nova DR ocorra.

A duração do relâmpago está diretamente associada à propagação do líder no interior da nuvem. Segundo a teoria do líder bidirecional, enquanto o líder escalonado da primeira descarga de retorno se desenvolve em direção ao solo, uma parcela positiva do líder bidirecional também se desenvolve no interior da nuvem. Após a primeira descarga de retorno tocar o solo, ocorre à energização do líder positivo dentro da nuvem. A corrente contínua decai e se interrompe quando o líder no interior da nuvem deixa de se propagar, quando a diferença de potencial no interior da nuvem não é suficiente para manter a propagação do líder que é a fonte da corrente que percorre o canal do relâmpago. Através de observações de relâmpagos na faixa VHF (SHAO et al., 1995; MAZUR, 2002, LUND et al., 2009), identificou-se que a propagação do líder no interior da nuvem ocorre predominantemente de maneira horizontal. A Figura 8.8 mostra um caso raro onde foi possível observar o líder positivo se propagando horizontalmente fora da nuvem e a cada nova descarga de retorno, a parcela positiva do líder bidirecional aumenta (SARAIVA et al., 2013).

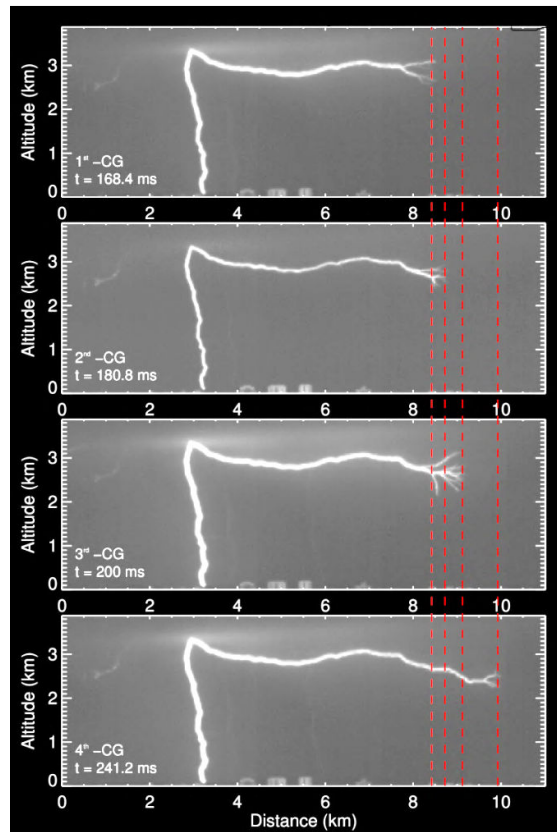


Figura 8.8 - Sequência de quadros de um vídeo de um relâmpago bipolar. As imagens representam as descargas números 1, 2, 3 e 4. As linhas vermelhas indicam o desenvolvimento do líder positivo.
 Fonte: Saraiva et al. (2013).

O diagrama de dispersão de dispersão da Figura 7.5 mostra também que os dados apresentam uma tendência de máxima duração para cada multiplicidade. Saraiva (2010) sugere que existe um limite para a quantidade de DR que um relâmpago pode apresentar. A possível explicação é que os líderes dentro da nuvem precisam se expandir para coletar mais cargas para alimentar a DR. Conforme descrito por Heckman (1992), quanto mais o canal se alonga, mais aumenta sua resistência e a corrente tende a diminuir até promover a completa interrupção do canal. Sendo assim, o alongamento do canal o torna instável, impossibilitando a ocorrência de novas descargas. Saraiva (2010) sugere ainda que a taxa de relâmpagos por minuto e por fração de área de 35 dBZ tenha um papel fundamental na inibição do líder que é responsável pela coleta de cargas no interior das nuvens para as próximas descargas de retorno.

9. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um estudo inédito sobre as diferenças encontradas nas características visíveis dos relâmpagos nuvem-solo negativos, quando analisados por dia de tempestade. Através da rede RAMMER, formada por quatro câmeras de alta velocidade direcionadas para observar a mesma região da cidade de São José dos Campos, um número significativo de relâmpagos foram registrados em cada dia de tempestade. Os cinco dias de tempestade que apresentaram maior número de relâmpagos filmados durante a campanha realizada no verão de 2012/2013 foram escolhidos para serem analisados. Os dias escolhidos foram 18, 19 e 22 de fevereiro e 06 e 08 de março de 2013. Juntos, esses dias somaram 361 relâmpagos nuvem-solo negativos. As características visíveis estudadas foram a multiplicidade, o intervalo entre as descargas de retorno e a duração do relâmpago.

Os dados foram separados por dia de tempestade. A quantidade de relâmpagos variou apreciavelmente em cada um dos dias. As características analisadas também apresentaram diferenças significativas entre os dias de tempestades, apesar de a região geográfica onde elas ocorreram ter sido a mesma.

Entre o dia com a maior (5,1) e menor (2,8) multiplicidade média, houve uma diferença de aproximadamente 82%. O dia 06/03 apresentou a maior multiplicidade e a menor porcentagem de NS- simples (12,8%). Por outro lado, o dia 22/02 apresentou a menor multiplicidade e teve a maior porcentagem de NS- simples (36,4%). Esse valor tem um fator 1,8 maior que o valor encontrado para média de NS- simples (20,7 %) calculada para todos os dias de tempestade. A menor média geométrica da duração ocorreu no dia 22/02 com 193,1 ms e a maior no dia 19/02 com 358,5 ms.

Após encontrar variabilidade nas características dos relâmpagos estudados por dia de tempestade, métodos estatísticos de reamostragem foram aplicados aos dados. O método utilizado foi o Monte Carlo. A partir da amostra original referente a todos os dias de tempestade, o método reproduziu 1000 novas

amostras de tamanho igual ao da amostra de cada característica de cada dia de tempestade. O resultado foi que o tamanho da amostra não teve influência sobre as diferenças encontradas nas características do NS- e que essas diferenças podem ser consideradas significativas.

Com o objetivo de encontrar explicações para a variabilidade das características dos relâmpagos, as condições meteorológicas de cada dia de tempestade também foram analisadas. O resultado encontrado foi que as condições meteorológicas para cada dia foram semelhantes, porém o tamanho da nuvem situada sobre a região onde foram filmados os relâmpagos em cada um dos cinco dias variou bastante.

A última análise realizada no presente trabalho utilizou-se de dados de radar meteorológico e da rede de detecção para buscar uma explicação dos fatores que foram determinantes para as diferenças encontradas em cada dia de tempestade. Imagens da localização dos relâmpagos e da refletividade da nuvem com CAPPI na altura de 5 km foram geradas. Os contornos de 35 dBZ na altura de 5 km da nuvem estão relacionados a extensão horizontal da região de cargas negativas da nuvem. Isso explica o fato de todas as imagens mostrarem que a maioria dos relâmpagos detectados pela rede aconteceram dentro do contorno de refletividade a partir de 35 dBZ.

Foi estimada a área de contorno de 35 dBZ e a sua relação com cada característica dos relâmpagos. Foi encontrado que a multiplicidade aumenta linearmente com o aumento da área, até 400 km². A partir desse valor de área, a multiplicidade não apresenta mais nenhuma correlação com a área de 35 dBZ. Da mesma forma, a duração dos relâmpagos e os intervalos entre as DRs aumentaram linearmente com a área de 35 dBZ até 400 km². A principal conclusão deste estudo é que a variação das características dos relâmpagos não está relacionada com as condições meteorológicas do dia de tempestade, mas sim com o tamanho da célula de tempestade que deu origem ao relâmpago.

Outro fator que explica as características dos relâmpagos deixarem de seguir uma tendência crescente a partir da área 400 km² é que as células de tempestade com tamanhos menores que 400 km² geralmente são células únicas e de convecção local. Já as células maiores que 400 km² geralmente são formadas por múltiplas células, onde existe troca de massa e conseqüentemente de carga elétrica entre elas. Essa condição torna inviável estimar o tamanho da região de cargas negativas através da área de 35 dBZ.

Este foi o primeiro trabalho utilizando os dados da rede RAMMER. A seguir serão citadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Fazer estudo de caso específico para os dias que apresentaram diferenças significativas nas características dos relâmpagos.
- Estender as análises apresentadas para todos os dias de tempestades registrados pela rede RAMMER.
- Utilizar os dados dos relâmpagos que foram filmados por pelo menos três câmeras da rede RAMMER para obter uma reconstrução tridimensional do canal de relâmpagos. Isso permitirá um estudo mais preciso do comportamento do líder e da geométrica do canal.
- Utilizar equipamentos adicionais, como informações de redes em VHF (Very High Frequency), para mapear o comportamento do canal do relâmpago dentro da nuvem.
- Utilizar uma rede de sensores de campo elétrico para melhorar a precisão de localização, obter a forma de onda emitida pelos relâmpagos e visualizar processos que ocorram dentro da nuvem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLAROTTI, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida**. 2005. 101 p. (INPE-14476-TDI/1157). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1913/2005/04.14.16.20>>. Acesso em: 24 abr. 2014.

BALLAROTTI, M. G., et al. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. D06112, 2012.

BERGER, K. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v. 283, n. 6 p. 478-525, 1967.

BIAGI, C. J., et al. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003–2004. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. D5, p. D05208, 2007.

BOYS, C.V. Progressive lightning. **Nature**, v.118, n.11, p.749-750, 1926.

BROOK, M.; KITAGAWA, N.; WORKMAN, E.J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 649-659, 1962.

BOURSCHEIDT, V. **Singularidades da distribuição espacial e temporal de relâmpagos nuvem-solo a partir de dados de sistemas de detecção**. 2012. 159 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.13.23.12-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BGQHEB>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

CAMPOS, L. Z. S. **Caracterização das componentes-M e dos líderes de relâmpagos naturais a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e medidas de campo elétrico**. 2012. 194 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.01.01.59-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BA2MDE>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

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. doi: <10.1016/j.atmosres.2012.12.006>.

CARN, S. A., **Atmospheric observations and meteorology**. Michigan, EUA: Michigan Technological University, Department of Geological Engineering and Sciences at Michigan Tech, 2009.

COORAY, V.; PÉREZ, H. Some features of lightning flashes observed in Sweden. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** v. 99, n. D5, p. 10,683-10,688, May 20, 1994.

COORAY, V.; JAYARATNE, K. P. S. C. Characteristics of lightning flashes observed in Sri Lanka in the tropics. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** (1984–2012), v. 99, n. D10, p. 21051-21056, 1994.

COSTA, G. D. O.; SOUZA, R. C.; GOUVÊA, V. H. **Um procedimento inferencial para análise fatorial utilizando as técnicas bootstrap e jackknife: construção de intervalos de confiança e testes de hipóteses**.

COSTA, I. C. **Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de banda "S" localizados no centro sul do Brasil**. 2007. 139 p. (INPE-14986-TDI/1273). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.11.09>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

FERRAZ, E. C. **Desenvolvimento e Aplicação de instrumentação para o estudo de relâmpagos**, 2001. Dissertação (mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FERRAZ, E. C. **Medidas de corrente contínua em raios nuvem-solo negativos naturais no Brasil: desenvolvimento de instrumentação e primeiros resultados**. 2009. 133 p. (INPE-15786-TDI/1529). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35J72M8>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

FERRO, M. A. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JÚNIOR, O. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2/4, p. 399-403, 2009. doi: <10.1016/j.atmosres.2008.04.011>.

FERRO, M. A. S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais**. 2008. 242 p. (INPE-15400-TDI/1414). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/347HTRP>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

FLEENOR, S. A., et al. Characteristics of cloud-to-ground lightning in warm-season thunderstorms in the Central Great Plains. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 333-352, 2009.

HECKMAN, S. **Why does a lightning flash have multiple strokes?** 1992. 134p. Thesis (Ph. D.) - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, 1992.

IDONE, V. P., et al. Correlated observations of three triggered lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D1, p. 1385-1394, 1984.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company. 212 p. ISBN 90-277-1033-3, 1980.

JORDAN, D. M., et al. Observed dart leader speed in natural and triggered lightning. **Journal Geophysical Research**, v. 97, p. 9951-9957, 1992.

JORDAN, D. M. et al. Luminosity characteristics of dart leaders and return strokes in natural lightning. **Journal Geophysical Research**, v. 102, p. 22025-22032, 1997.

KASEMIR, H. W. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n.7, p. 1873-1878, 1960.

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

KREHBIEL, P. R.; BROOK, M.; KRIDER, E. P. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. **Journal Geophysical Research**, v. 84, n. C5, p. 2432-2456, May 1979.

KREHBIEL, P. R. **The electrical structure of thunderstorms**. In: KRIDER, E. P.; ROBLE, R. G. (Ed.). *The Earth's electrical environment*. 1. ed. Washington, D.C.: National Academy Press, v. 1, p. 90-113, 1986.

LUND, N. R. et al. "Relationships between lightning location and polarimetric radar signatures in a small mesoscale convective system." **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 12, 2009.

MACGORMAN, D.R. **Lightning in a storm with strong wind shear**. Ph.D. diss., Rice Univ., Houston. 1978.

MACGORMAN, D.R.; TAYLOR, W.R.; FEW, A. A. **Lightning location from acoustic and VHF techniques relative to storm structure from 10-cm radar**. In: RUHNKE, L.H. AND LATHAM, J. (eds). *Proceedings in atmospheric electricity*, Hampton: A. Deepak Publishing, p. 377-380 155, 1983.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms**. New York: Oxford University, p. 422, 1998.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning, Directly-correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society**, v. A191, p. 485-503, 1947.

MALAN D. J.; SCHONLAND B. J. F. The electrical processes in the intervals between the strokes of a lightning discharge. **Proc. R. Soc. Lond.** v. A 206, p. 145–63, 1951.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique.** v. 3, n. 10, pp. 1393-1409, 2002.

MAZUR, V.; KREHBIEL, P. R.; SHAO, X. M. Correlated high-speed video and interferometric observations of a cloud-to-ground flash, **Journal Geophysical Research**, v. 100, n. 12, p. 25731– 25753, 1995.

MAZUR, V.; SHAO, X. M.; KREHBIEL, P. R. Spider lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes, **Journal Geophysical Research**, v. 103, n. 19, p. 811–822, 1998.

MEDEIROS, C. **Estudo da ocorrência de corrente contínua em relâmpagos nuvem-solo negativos.** 2011. 108 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.04.04-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A79PQ8>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

MIRANDA, F. J. **Estudo da forma de onda de campo elétrico de relâmpagos.** 2000. 119p. (INPE-8173-TDI/757). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MIRANDA, F. J.; PINTO JR. O; SABA, M. M. F. A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 65, issue 3, p. 293-297, Feb., 2003

MIRANDA, F. J. **Estudo das características de relâmpagos nuvem-solo negativos através da análise comparativa de observações por múltiplas técnicas.** 2004. 192 p. (INPE-12181-TDI/975). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/10.29.08.56>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

NACCARATO, K. P. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT), **paper presented at the International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Vienna, Austria, 2012.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil.** 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

NASSER, R. B.; BREITMAN, K. K. **McCloud service framework : arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na Simulação de Monte Carlo na Cloud**. 2012. Dissertação (Mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática, 2012.

ORVILLE, R. E.; IDONE, V. P. Lightning leader characteristics in the thunderstorm research international program (TRIP). **Journal of Geophysical Research: Oceans** (1978–2012), v. 87, n. 13, p. 11177-11192, 1982.

PARKER, N. G.; KRIDER, E. P. A portable, PC-based system for making optical and electromagnetic measurements of lightning. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n. 6, p. 739-751, 2003.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 196 p. ISBN 85-901719-1-4.

PINTO JR., O. **A arte da guerra contra os raios**. 1. ed. São Paulo: Brasiliense, 2005. 80 p. ISBN 85-86238-40-6.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 2008. 110 p. ISBN 978-85-11-00112-9.

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar**. 2008. 128 p. (INPE-14181-TDI/1093). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Centro Regional de Educação em Ciência e Tecnologia Espaciais para a América Latina e Caribe (CRECTEALC) - Campus Brasil - INPE, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/348NPCE>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations, **Journal Geophysical Research**, v. 99, p. 10745–10750, 1994.

RAKOV, V. A., e G. R. HUFFINES (2003), Return stroke multiplicity of negative cloud to ground lightning flashes, **J. Appl. Meteorol.**, 42, 2003.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. New York: Cambridge University Press, 2003. 687p. ISBN 978-0521583275.

RINEHART, R. E. Radar for meteorologists. Nevada: **Rinehart Publishing**, 1997. 33,34, 39, 42, 1997.

SABA, M. M. F.; BELLAROTTI, M. G.; PINTO JR, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal Geophysical Research**, v. 111, p. D03101, 2006.

SARAIVA, A. C. V. **Estudo dos fatores determinantes das características dos raios negativos**. 2010. 189 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.17.17.41-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37GG4RP>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

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

SARAIVA, A. C. V.; PINTO JR., O.; FERREIRA, M. C. A.; ZEPKA, G.S.; SABA, M. M. F. RAMMER Network Observations During Summer 2011/2012, **paper presented at the XIV International Conf. on Atm. Electricity**, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.

SARAIVA, A. C. V.; PINTO JR., O.; ZEPKA, G. S. RAMMER network observations during summer 2011/2012, **paper presented at the International Lightning Detection Conference (ILDC), and International Lightning Meteorology Conference (ILMC)**, Vaisala, Broomfield-Colorado ,EUA, 2012

SARAIVA, A. C. V.; CAMPOS, L. Z. S.; WILLIAMS, E.; ZEPKA, G. S.; PINTO, O.; HECKMAN, S.; BUZATO, T. S.; BAILEY, J.; MORALES, C. A.; BLAKESLEE, R. J. High speed video and electromagnetic analysis of two natural bipolar cloud-to-ground lightning flashes. **Journal Geophysical Research**, submetido, 2013.

SACURAJI, J. **Microfísica das nuvens**. Curso de radar meteorológico CPTEC/INPE 2012.

SAUNDERS, C. P. R. **Thunderstorm electrification**. In: Volland, H. Handbook of atmospheric electrodynamics. Boca Raton, Florida: CRC Press, v. 1, p. 61-92, 1995.

SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning, 4, The discharge mechanism. **Proceedings of the Royal Society**, v.A164, p.132-150, 1938.

SCHONLAND, B. F. J. **The lightning discharge**. Handbuch der Physik, v.22, p.576- 628, 1956.

SCHONLAND, B. F. J; COLLENS, H. Progressive lightning. **Proceedings of the Royal Society**, v. A143, p. 654-674, 1934.

SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive lightning, 2. **Proceedings of the Royal Society**, v.A152, p.595-625, 1935.

SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive lightning, 6. **Proceedings of the Royal Society**, v. A168, p. 455-469, 1938.

SCHULZ, W.; LACKENBAUER, B.; DIENDORFER, G.; PICHLER, H. LLS data and correlated continuous E-Field measurements. In: **VIII Int. Symposium on Lightning Protection (SIPDA)**, Proceedings: Sao Paulo, Brazil, 2005.

SCHULZ, W.; CUMMINS, K.; DIENDORFER, G.; DORNINGER, M. Cloud to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. **Journal of Geophysical Research**, v.110, n. 09, 2005.

SHAO, X. M.; KREHBIEL, P.R.; THOMAS, R. J.; RISON, W. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.D2, p.2749-2783, 1995.

SHINDO, T.; UMAN M. A. Continuing current in negative cloudto- ground lightning, **Journal Geophysical Research**, v. 94, p. 5189– 5198, 1989.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Charge structure and dynamics in thunderstorms. **Space Science Reviews**, v. 137, n. 1-4, p. 355-372, Jun 2008.

TAKAHASHI, T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. **Journal of Atmospheric Science**, v. 35, p. 1536-1548, 1978.

THOMSON, E. M. The dependence of lightning return stroke characteristics on latitude. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. C2, p. 1050-1056, 1980.

THOMSON, E. M. Some features of stroke occurrence in Florida lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D3, p. 4910-4916, 1984.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. 1. ed. Orlando: Academic Press, 1987. v. 39, p. 377, ISBN 0-12-708350-2, 1987

UMAN, M. A.; VOSHALL R. E. Time interval between lightning strokes and initiation of dart leaders, **Journal of Geophysical Research**, v. 73, p. 497–506, doi:10.1029/JB073i002p00497, 1968.

VALINE, W. C.; KRIDER, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research (Atmospheres)** v. 107, n. D20, p. AAC 8-1, 2002.

VIANELLO, R. L. e ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 2006.

ZEPKA, G. S. **Previsão de descargas atmosféricas usando o modelo de mesoescala WRF**. 2011. 176 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.15.19.09-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A4EGUB>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science**, University of Washington, Elsevier, 2006.

WILLIAMS, E. R. The Electrification of Thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 88-99, 1988.

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.D11, p.13151-13167, 1989.

WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics. The role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v.15, p.S91-S108, 2006.