



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19-TDI

## **ESTUDO DAS DESCARGAS DE RETORNO E COMPONENTES M E SUA DETECÇÃO POR SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE RELÂMPAGOS**

Amanda Romão de Paiva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 26 de fevereiro de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HSSTRS>

INPE  
São José dos Campos  
2015

**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

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

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

**Membros:**

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas  
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

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

Dr<sup>a</sup> 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)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação  
(SID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19-TDI

## **ESTUDO DAS DESCARGAS DE RETORNO E COMPONENTES M E SUA DETECÇÃO POR SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE RELÂMPAGOS**

Amanda Romão de Paiva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 26 de fevereiro de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HSSTRS>

INPE  
São José dos Campos  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Paiva, Amanda Romão de.

P166e      Estudo das descargas de retorno e componentes M e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos / Amanda Romão de Paiva. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxii + 81 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Kleber Pinheiro Naccarato.

1. Relâmpagos ascendentes. 2. Campo elétrico. 3. Detecção.  
I.Título.

CDU 551.594.2

---



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 do Ambiente  
Solar-Terrestre**

Dr. Ezequiel Echer



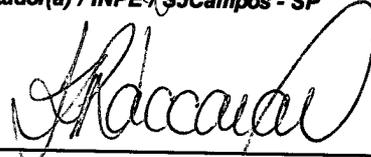
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato



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

Dr. Delano Gobbi



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marco Antonio da Silva Ferro



Convidado(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

**Este trabalho foi aprovado por:**

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Amanda Romão de Paiva**

**São José dos Campos, 26 de fevereiro de 2015**



*“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”*

*(José de Alencar)*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por estar comigo em todos os momentos, me encorajando e me dando força para não desistir nos momentos difíceis.

A meus pais, Manoel Luiz e Vera, pelo amor, carinho e dedicação desde o meu nascimento. Agradeço por terem me dado condições para que eu pudesse estudar, mesmo sendo necessário, às vezes, brigar comigo para não desistir. Estejam certos que vocês foram fundamentais para que eu pudesse terminar mais uma etapa da minha vida.

Agradeço a meu irmão Rafael, minhas avós, tios e primos, pela união, reuniões, viagens, distrações e todo amor que têm comigo.

Meus orientadores, Marcelo M. F. Saba e Kleber P Naccarato, agradeço pela paciência que tiveram e por todo conhecimento que me transferiram. Sem vocês não teria conseguido.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial Gleidson e Isabela pela paciência em meus dias de estresse, pelo tempo que se dedicaram em me ajudar com meus problemas (pessoas e/ou profissionais) e pela amizade sincera ao longo desses anos. Não fizemos amizades, construímos.

Aos meus amigos e colegas de grupo Carina, Benny, Raphael e Robson, por todo trabalho que desenvolvemos: artigos escritos, congressos, campanhas, viagens e diversão. Em especial à Carina, pelos dias seguidos de estudo na faculdade, por ter me indicado para realizar Iniciação Científica no INPE, me fazendo apaixonar pelos relâmpagos. Pelo apoio, ajuda e disposição que sempre teve me ensinando a trabalhar com os equipamentos e pelas viagens divertidas para me distrair nos momentos tristes.

Aos colegas do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), em especial ao, André, Anelize, Antônio, Diovane, Ellen, Gisele, Jéferson, Larissa, Leandro, Rodrigo e Vanderlei por me proporcionarem a oportunidade de aprender e continuar aprendendo, agradeço pelo apoio contínuo desde o início do mestrado, pelo empenho que vêm sendo desenvolvido em prol da ciência e pelos dados fornecidos para a realização deste trabalho.

À pós-graduação do INPE e ao CNPq pelo apoio e pela bolsa, permitindo que a conclusão deste trabalho fosse possível.



## RESUMO

Os sistemas de localização de descargas atmosféricas ou redes de detecção, de maneira geral, foram projetados para detectar apenas para relâmpagos descendentes e intra-nuvem. Assim, esse trabalho teve a finalidade de investigar quais pulsos (componentes M e/ou descargas de retorno subsequente) dos relâmpagos ascendentes são detectados por esses sistemas. Verificou-se que, eletricamente, esses pulsos assemelham-se aos pulsos dos relâmpagos descendentes, e por tanto, foram relativamente bem detectados pelo sistema de localização. Os relâmpagos utilizados na elaboração deste trabalho foram registrados em torno da região do Pico do Jaraguá (SP) no período de janeiro de 2012 até 2015. A base de dados conta com 29 relâmpagos ascendentes e 16 descendentes em locais conhecidos (pois assim conseguiu-se determinar o erro de localização fornecido pelas redes). Para essa análise, foram utilizadas câmeras de alta resolução temporal e sensores de campo elétrico para descobrir o tempo exato de ocorrência e suas características elétricas: tempo de subida da forma de onda e valor do pico do campo elétrico. Os sistemas de localização de descargas atmosféricas forneceram a posição e o valor estimado do pico de corrente. A comparação dos pulsos dos relâmpagos descendentes registrados pelas câmeras permitiu validar as redes de detecção, determinando-se sua eficiência de detecção e o erro de localização. Encontrou-se uma eficiência de 43-56% para a rede BrasilDAT e 11-18% para a rede RINDAT (haverá necessidade de se reprocessar os dados dessa rede para uma reanálise). Depois da validação das redes, buscou-se identificar os motivos de alguns pulsos (componente M e/ou descarga de retorno subsequente) dos relâmpagos ascendentes e descendentes não terem sido detectados pela BrasilDAT. Observou-se que as componentes M dos relâmpagos ascendentes são semelhantes as descargas de retorno subsequente dos descendentes, pois a luminosidade que precede seu pulso é baixa e o tempo de subida da forma de onda do campo elétrico é curto. Outro resultado interessante constatado foi que os picos de corrente dos pulsos para os relâmpagos ascendentes e descendentes são intensos. Esses fatos justificam as redes de detecção capturar estes pulsos, uma vez que as redes tendem a descartar pulsos com tempos de subida longo e baixa intensidade.



# **STUDY OF RETURN STROKES AND M-COMPONENT BY LIGHTNING LOCATION SYSTEMS**

## **ABSTRACT**

The lightning location systems (LLS) in general can only detect cloud-to-ground lightning flashes and intra- cloud discharges. This work intended to investigate which pulses (M components and/or subsequent return strokes) of upward lightning can be detected by those LLS. We found that these pulses from upward lightning are similar to those of the cloud-to-ground lightning. The lightning flashes videos used in this work are recorded around the Jaragua Peak region (SP) from January 2012 until 2015. We acquired 29 upward lightning and 16 cloud-to-ground lightning at known locations (thus were able to assess the location accuracy of the two LLS investigated). In our analysis, we used high-speed video and electric field measurements to find out the exact time of occurrence and their electrical characteristics (waveform rise time and peak). In the other hand, data from LLS was used to assess location of occurrence and estimate peak current values. By comparing the recorded pulses of the cloud-to-ground lightning, we validated the LLS, by assessing their detection efficiency and location accuracy. We found 43-56% detection efficiency for BrasilDat network and 11-18 % for RINDAT network (we will have to reprocess the data for reanalysis in the future). We also tried to identify the reasons that some pulses (M components and subsequent return strokes) of the upward lightning and of cloud-to-ground lightning were not detected by BrasilDat . We observed that the M components of the upward lightning are similar to their subsequent return stroke , since the light intensity that precedes its pulse is low and the rise time of the electric field waveform is very short. Another interesting result showed that the pulses of the upward and cloud-to-ground lightning are more intense. That explains why the LLS detected most of these pulses, since the LLS tend to miss pulses with low peak current values and larger rise times.



## LISTA DE FIGURAS

		<b><u>Pág.</u></b>
Figura 1.1	Incidência de relâmpagos em São Paulo	03
Figura 1.2	Primeiro relâmpago ascendente registrado no Brasil em 2012	04
Figura 2.1	Exemplo de Cumulonimbus	07
Figura 2.2	Nuvem de Tempestade	08
Figura 2.3a	Relâmpago trígado por foguete	10
Figura 2.3b	Relâmpago em erupção vulcânica	10
Figura 2.3c	Relâmpago em explosão nuclear	10
Figura 2.4	Tipos de relâmpagos	10
Figura 2.5	Relâmpago intra-nuvem registrado em São Paulo	11
Figura 2.6	Tipos de relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas	12
Figura 2.7	Processos físicos de um relâmpago negativo	13
Figura 2.8	Exemplo de componente M	14
Figura 2.9	Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago descendente	16
Figura 2.10	Relâmpago ascendente	17
Figura 2.11	Etapas de um relâmpago ascendente	18
Figura 2.12	Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago ascendente	19
Figura 3.1	Torres do Pico do Jaraguá	21
Figura 3.2	Relevo do Pico do Jaraguá	22
Figura 3.3	Local de instrumentação em São Paulo	22
Figura 3.4	Câmeras observando a região da Av. Paulista	23

Figura 3.5	Torres e antenas da região da Av. Paulista	23
Figura 3.6	Sensor do campo elétrico e o painel solar utilizado na alimentação dos integradores	24
Figura 3.7	Montagem do Campo elétrico	25
Figura 3.8	Exemplo da variação do campo elétrico gerado por um relâmpago ascendente	26
Figura 3.9a	Miro 4	27
Figura 3.9b	Phantom V310	27
Figura 3.9c	Photrom	27
Figura 3.10	<i>Software</i> utilizado para analisar os relâmpagos	28
Figura 3.11	Principais tipos de sistemas de detecção pela frequência	29
Figura 3.12	Algoritmo usado no método MDF	32
Figura 3.13a	Método TOA utilizando curvas hiperbólicas	33
Figura 3.13b	Exemplo de localização ambígua utilizando curvas hiperbólicas	33
Figura 3.14	Método TOA utilizando curvas circulares	33
Figura 4.1	Locais onde ocorrem relâmpagos descendentes	37
Figura 4.2	Localização dos sensores de detecção de relâmpagos	39
Figura 4.3	Definição dos parâmetros do campo elétrico	40
Figura 4.4	Exemplo de como determinar o pico de corrente estimado	41
Figura 5.1	Raios ascendentes saindo de três torres, simultaneamente, da Av. Paulista-SP	44
Figura 5.2	Erros de localização de relâmpagos descendentes da rede BrasilDAT	49
Figura 5.3	Erros de localização de relâmpagos descendentes da rede RINDAT	50

Figura 5.4	Erros de localização de relâmpagos ascendentes da rede BrasilDAT	51
Figura 5.5	Erros de localização de relâmpagos ascendentes da rede RINDAT	52
Figura 5.6	Relação da luminosidade e tempo de subida para pulsos de um relâmpago	54
Figura 5.7	Relação da luminosidade e tempo de subida dos campos elétricos dos relâmpagos ascendentes e descendentes	56
Figura 5.8	Picos de Corrente estimado para relâmpagos ascendentes	59
Figura 5.9	Picos de corrente estimado para relâmpagos descendentes	61
Figura 5.10	Picos de corrente dos relâmpagos ascendentes e descendentes	62
Figura 5.11	Exemplos de líderes de recuo em um relâmpago ascendente	64
Figura 5.12	Sequência de imagens de um relâmpago ascendente raro	65
Figura 5.13	Campo elétrico do relâmpago ascendente positivo	66



## LISTA DE TABELAS

		<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 3.1	Redes de Detecção e suas características	30
Tabela 5.1	Quantidade de Pulsos para cada Processo Físico dos relâmpagos	43
Tabela 5.2	Eficiência de Detecção esperada das redes BrasilDAT e RINDAT	46
Tabela 5.3	Eficiência de detecção para relâmpagos descendentes	47
Tabela 5.4	Eficiência de detecção para relâmpagos ascendentes	48
Tabela 5.5	Média dos erros de localização das redes BrasilDAT e RINDAT	53
Tabela 5.6	Média das correntes contínuas dos relâmpagos ascendentes e descendentes	57
Tabela 5.7	Quantidade de picos de correntes analisados	58
Tabela 5.8	Resumo dos dados	62



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CC	Corrente Contínua
CE	Campo Elétrico
CCI	Corrente Contínua Inicial
ELAT	Eletricidade Atmosférica
GPS	Global Positioning System
IMPACT	Improved Accuracy from Combined Technology
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IN	Intra-nuvem
INMET	Instituto de Meteorologia
LF	Low Frequency
MDF	Magnet Direction Finder
NS+	Nuvem-solo positivo
NS-	Nuvem-solo negativo
NS	Nuvem-solo
SN	Solo-nuvem
TOA	Time of Arrival Lightning Location Retrieval
VHF	Very High Frequency



## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>07</b>
2.1	Nuvens	07
2.2	Relâmpagos	09
2.2.1	Relâmpagos intra-nuvem	10
2.2.2	Relâmpagos nuvem-solo (descendentes)	11
2.2.3	Relâmpagos solo-nuvem (ascendentes)	16
<b>3</b>	<b>INTRUMENTAÇÃO</b>	<b>21</b>
3.1	Locais de Observação	21
3.1.1	Região do Pico do Jaraguá	21
3.1.2	Região da Avenida Paulista	23
3.2	Sensor de campo elétrico	24
3.3	Câmeras de alta resolução	26
3.4	Sistema de localização de descargas	28
3.4.1	DF/MDF	31
3.4.2	TOA	32
3.4.3	Estimativa do Pico de Corrente	34
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
4.1	Registros de relâmpagos ascendentes e descendentes	37
4.2	Dados dos sistemas de localização dos relâmpagos	38
4.3	Dados do campo elétrico	40
4.4	Correlação entre pico de corrente com pico do campo elétrico	41

<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1	Relação das Componentes M e Descargas de Retorno Subsequentes dos relâmpagos ascendentes e descendentes	43
5.1.1	Região do Pico do Jaraguá	43
5.1.2	Região da Avenida Paulista	44
5.2	Validação do sistema de Localização de relâmpagos	45
5.2.1	Eficiência de Detecção	45
5.2.2	Erro de localização de relâmpagos	48
5.3	Relação entre luminosidade e campo elétrico	53
5.3.1	Descrição	53
5.3.2	Análises	55
5.4	Pico de corrente dos relâmpagos ascendentes e descendentes	58
5.5	Relâmpago ascendente inédito	63
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade os relâmpagos e trovões intrigam a humanidade. Os belos desenhos que enfeitam o céu momentaneamente fizeram com que os povos antigos explicassem de maneira mitológica as razões dessas descargas (VIEMEISTER, 1961). A primeira explicação com algum caráter científico que se conhece foi do filósofo Aristóteles, no século III a.C, referindo-se ao trovão como um som produzido pelo choque entre as nuvens e o relâmpago como incêndio exalado por essas nuvens.

Apenas no século XVIII, com os experimentos do cientista americano Benjamin Franklin (1706-1790) foi possível denominar relâmpagos como descargas elétricas devido ao acúmulo de cargas elétricas presentes em nuvens de tempestades. Um desses experimentos constituía-se em empinar uma pipa perto de uma nuvem de tempestade. A carga induzida na pipa se deslocava até a extremidade do fio, ocorrendo uma descarga entre uma chave amarrada nesta extremidade e a mão de quem segurava o fio (IRIBARNE; CHO, 1980).

Depois dessa contribuição significativa dada por Franklin, outros cientistas se empenharam em caracterizar e pesquisar esse fenômeno e, a partir de 1920, com o avanço da tecnologia, o estudo de relâmpagos começou a progredir de forma significativa. Os primeiros estudos sistemáticos de descargas atmosféricas em estruturas altas começaram na década de 20 no edifício Empire State nos EUA, na África do Sul nas décadas de 30 a 40 e em San Salvatore nas décadas de 40 a 70 (RAKOV; UMAN, 2003).

Hoje, no Brasil, existem câmeras de altíssima resolução temporal (mais de 10.000 imagens por segundo) que permitem analisar todas as etapas desse fenômeno (SCHUMANN et al., 2014a). Também foram realizadas medidas da intensidade de corrente da carga transferida para o solo (SOLORZANO, 2003), do campo elétrico da nuvem e da descarga (FERRO et al., 2012). Essas medidas e registros de relâmpagos abrangem somente um certo local de

interesse, ou seja, são de caráter pontual e não global. Por isso, a partir de 1953 começaram a ser desenvolvidos outros métodos que registrassem os relâmpagos por meio da radiação eletromagnética emitida por eles (STOREY, 1953) utilizando-se sensores de solo. Com isso, foi possível detectar os relâmpagos em áreas maiores.

Com o avanço da tecnologia, estes sensores de radiação foram aprimorados a fim de abranger uma escala global, podendo capturar relâmpagos descendentes em tempo real. Com o aumento desses sensores foi possível melhorar a eficiência de detecção desses relâmpagos, surgindo os sistemas de localização de descargas atmosféricas (ou redes de detecção). (ORVILLE, 1983).

As redes de detecção conseguem determinar a frequência de ocorrência, a localização dos relâmpagos, bem como algumas de suas características elétricas como: polaridade, multiplicidade, pico de corrente, entre outros (BOCCIPIO et. al., 1998). Essas tecnologias utilizam a radiação eletromagnética de baixa frequência (LF - *Low Frequency* - entre 30 a 300 kHz) emitida pelos relâmpagos para detectá-los. Essa faixa de frequência é eficaz para localizar os relâmpagos que atingem o solo, já que a ocorrência da descarga de retorno emite uma intensa radiação eletromagnética nessa faixa. Outras técnicas permitem observar na faixa de alta frequência (VHF) os relâmpagos intra-nuvem, cuja principal emissão ocorre na faixa entre 30 a 300 MHz.

Já os relâmpagos solo-nuvem (ascendentes), que se iniciam de estruturas altas em direção à nuvem são um tipo de fenômeno atmosférico mais raro e sua ocorrência é muito baixa se comparada com os relâmpagos descendentes. Suas características, em geral diferem dos outros relâmpagos, o que dificulta os sistemas de localização de relâmpagos detectarem esse fenômeno.

De posse dessas informações, em 2011, pesquisadores do grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do CCST/INPE fizeram uma análise da incidência de relâmpagos na região de São Paulo, em busca de alguma evidência que pudesse indicar a influência de altas estruturas na densidade de raios na região.

A incidência média de descargas atmosféricas em São Paulo é de 15 relâmpagos por km<sup>2</sup> por ano. Utilizando os dados da rede RINDAT no período correspondente a 1999 até 2011, foi feita uma análise da incidência de relâmpagos em áreas de 250m x 250m sobre a região urbana de São Paulo que possui grande número de torres e arranha-céus. Observando a Figura 1.1 percebe-se que há uma incidência muito elevada sobre o Pico do Jaraguá (região central da figura), comparada com os arredores.

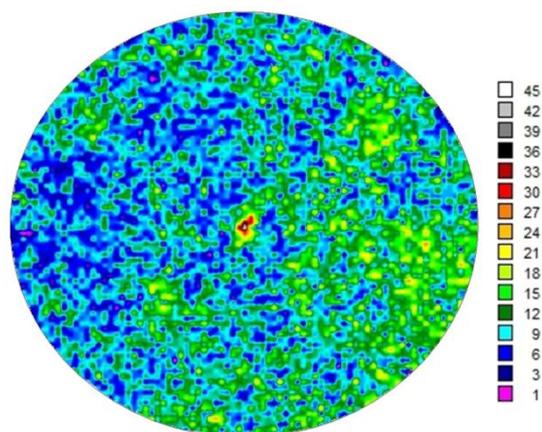


Figura 1.1 – Incidência de relâmpagos em São Paulo  
FONTE: SABA (2012)

Tendo como motivação o fato da incidência de relâmpagos ser bem maior sobre o Pico do Jaraguá, algumas câmeras foram posicionadas de forma a observar quais relâmpagos seriam responsáveis pelo aumento de detecção sobre o Pico. Em janeiro de 2012, foi registrado o primeiro relâmpago

ascendente partindo de uma torre de telecomunicação localizada no Pico do Jaraguá na cidade de São Paulo (SABA et al, 2012), como mostra a figura 1.2.



Figura 1.2 - Primeiro relâmpago Ascendente registrado no Brasil em 2012

Fonte: SABA et al (2012)

A partir daí, pesquisas vêm sendo realizadas a fim de descobrir as características desse tipo de relâmpago no Brasil (SABA et. al. 2012a,2012b; SCHUMANN et. al. 2012a,2013,2014).

Sabendo que os sistemas de localização têm como finalidade primária a detecção de relâmpagos nuvem-solo (descendentes) e intra-nuvem, o trabalho de PAIVA et. al., (2014) fez um estudo de caso para um determinado raio ascendente filmado (sabendo sua localização e tempo exato) comparando dados desses sistemas a fim de descobrir quais características dos processos físicos envolvidos foram detectadas. Para isso, foram utilizadas câmeras de alta resolução e campo elétrico para descobrir o tempo, características e localização desse relâmpago. Em comparação com os dados fornecidos pelos sistemas, verificou-se que apenas alguns processos físicos dessa descarga haviam sido detectados.

A eficiência de detecção dos raios ascendentes é um tópico de estudo relevante se levarmos em conta que os mesmos partem, quase sempre, das mesmas estruturas altas (como torres de telecomunicação, geradores eólicos e/ou edifícios). Assim, ao contrário dos raios descendentes, há um repetido e frequente *stress* sobre a mesma estrutura. Portanto, torna-se desejável investigar mais detalhadamente a eficiência da detecção das redes de detecção, possibilitando a melhoria dessa característica das redes e, conseqüentemente, permitindo o aprimoramento dos parâmetros de proteção utilizados para minimizar os efeitos desse tipo de relâmpago. (CIGRE. 2009)

Tendo essa motivação, esse trabalho faz um estudo da detecção de raios ascendentes pelos dois principais sistemas de localização em operação no Brasil (BrasilDAT e RINDAT) através da validação dessas redes de detecção por meio de sua eficiência de detecção e do erro de localização. Além disso, busca-se também uma comparação das características dos processos físicos dos relâmpagos descendentes e ascendentes.

O capítulo 2 deste trabalho apresenta uma introdução sobre nuvens e as principais características dos diferentes tipos de relâmpagos. No capítulo 3 é explicado a instrumentação utilizada e seus locais de instalação, tais como sistema de localização de relâmpagos, sensores de campo elétrico e câmeras de alta resolução temporal.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada e é dividida em quatro partes: uma apresentação de como se obteve todos os registros dos relâmpagos, campo elétrico, dados do sistema de localização de relâmpagos e a correlação entre o pico de corrente com o pico do campo elétrico.

Já o capítulo 5 deste trabalho apresenta os resultados obtidos começando pela ocorrência dos relâmpagos ascendentes e descendentes na região do Pico do Jaraguá e Avenida Paulista, ambas na cidade de São Paulo. Também é discutido a validação das redes de detecção BrasilDAT e RINDAT, através do

erro de localização e da eficiência de detecção. Para se obter alguns possíveis motivos de alguns pulsos não terem sido detectados, é discutido a relação da luminosidade do canal (do pulso) com a respectiva forma de onda do campo elétrico e apresentado os picos de corrente dos pulsos (componente M e descarga de retorno subsequente) dos relâmpagos ascendentes e descendentes.. Por último, neste capítulo, é feita uma apresentação de um relâmpago ascendente com líder positivo que gerou uma descarga de retorno subsequente também positiva, registrado pela primeira vez no Brasil. Até agora só foram registrados casos onde o líder ascendente era positivo, seguido de descargas de retorno subsequente negativas.

O capítulo 6 faz um fechamento deste trabalho com as conclusões e sugestões de alguns trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Nuvens

As nuvens se caracterizam pelo agrupamento de minúsculas partículas de água líquida ou gelo presentes na atmosfera quando há condensação do vapor d'água e congelamento das gotículas de água líquida devido à expansão do ar quente em convecção. (ALBRECHT, 2004). Pelos estudos realizados pela Classificação Internacional das Nuvens (WMO), há diversos tipos de nuvens, mas as que estão relacionados aos relâmpagos, chamadas nuvens de tempestades, são conhecidas como Cumulonimbus.

Essas nuvens são formadas por gotas d'água, cristais de gelo, gotas superesfriadas, flocos de neve e granizo. Além disso, são caracterizadas pela sua grande altitude vertical, pelo seu formato de bigorna(LIMA, 2005 p.4), possuindo em seu topo uma expansão horizontal devido aos ventos superiores(COTTON e ANTHES, 1989; HOUZE, 1993), como podemos ver na Figura 2.1 Possuem em média uma base entre 700 a 1500 metros, e seus topos podem chegar até 20 quilômetros de altura (sendo a média de 9 a 12 km).



Figura 2.1 - Exemplo de Cumulonimbus

Fonte: CARN (2009)

Com as fortes rajadas, há choque entre as partículas presentes no interior dessas nuvens, causando separação de cargas elétricas que, por consequência, eleva o campo elétrico em seu interior, podendo gerar os relâmpagos descendentes e/ou intra-nuvem. Os processos físicos relativos a separação de cargas dentro das nuvens ainda são alvo de muitas discussões no meio científico, porém atualmente o processo de eletrificação colisional não-indutivo é o mais aceito para explicar a estrutura elétrica tripolar das nuvens de tempestades (NACCARATO, 2006).

A parte estratiforme das nuvens de tempestades (Cumulonimbus), podem gerar um tipo raro de relâmpago, registrado desde 2012 no Brasil, chamados de relâmpagos ascendentes. Essa parte se caracteriza pela baixa altitude e presença de chuva fraca e contínua. Possuem desenvolvimento horizontal cobrindo grande área e com pouca espessura (COTTON e ANTHES, 1989; HOUZE, 1993). A Figura 2.2 ilustra essas duas partes da nuvem de tempestade.

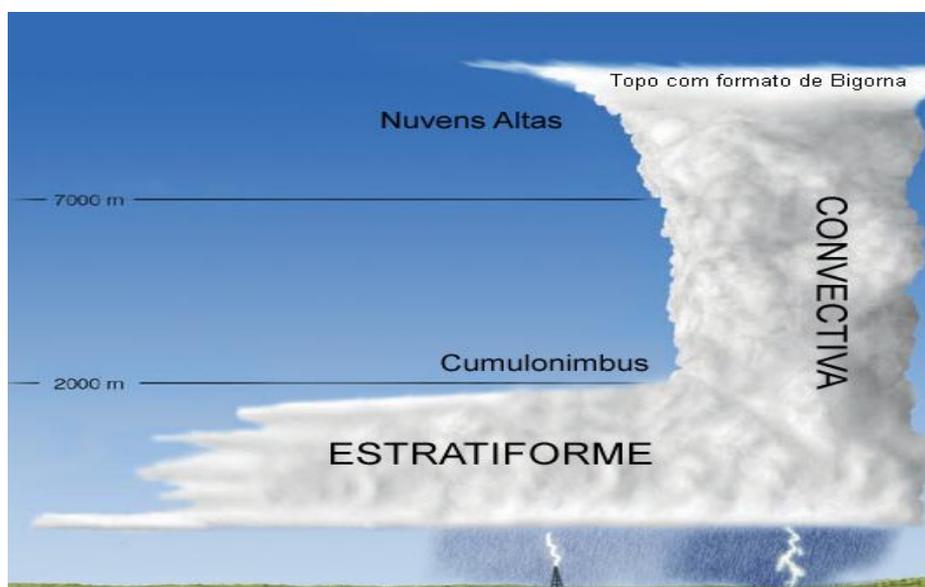


Figura 2.2 - Nuvem de tempestade  
Fonte: Adaptado de Thomson (2007)

## 2.2 Relâmpagos

Quando o campo elétrico produzido pelas cargas existentes no interior das nuvens excede a capacidade isolante do ar (em um dado ponto no interior da nuvem de tempestade) ocorre uma descarga elétrica atmosférica com o objetivo de reagrupar essas cargas (NACCARATO, 2006).

Essas descargas, também conhecidas como relâmpagos, possuem características semelhantes em todas as partes do mundo. As suas diferenças se devem a distintas condições meteorológicas, estações do ano, condições orográficas, entre outros (PINTO Jr, e PINTO, 1996).

As dimensões do canal do relâmpago variam entre 2 a 5 cm de diâmetro, alguns quilômetros de comprimento e temperaturas que podem chegar até 30.000°C com duração de alguns milissegundos. (MCGRAW, 1997)

Os relâmpagos além de estarem associados a nuvens de tempestade, também podem ocorrer em tempestades de areia, neve, erupções vulcânicas, entre outros (RAKOV, UMAN, 2003). Além disso, pode-se também desenvolver relâmpagos artificiais, por meio de explosões nucleares, nos fundos dos oceanos e por lançamentos de foguetes que estendem fios condutores na atmosfera (SABA et al., 2002). As Figuras 2.3(a), (b) e (c) exemplificam alguns tipos desses relâmpagos.

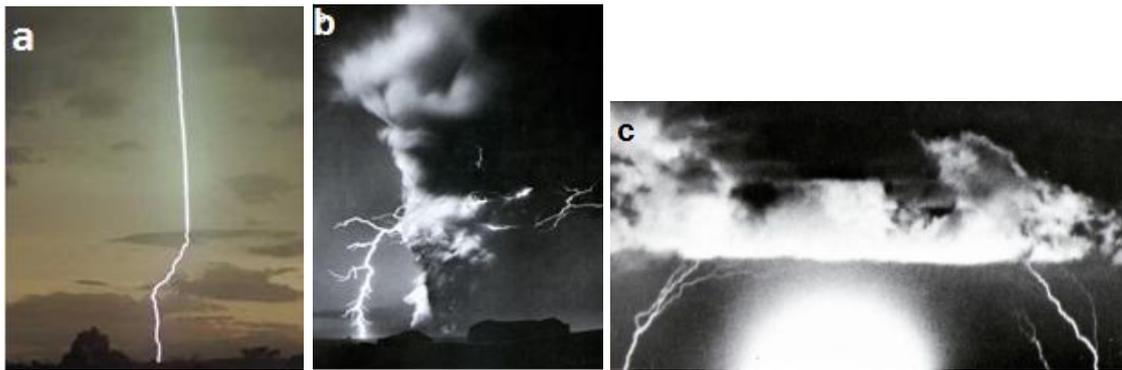


Figura 2.3 - (a) Relâmpago trígado por foguete (b) Relâmpago em erupção vulcânica (c) Relâmpago em explosão nuclear

Fontes: (a) SABA (2000); (b) SALANAVE (1980); (c) SALANAVE (1980)

A classificação dos relâmpagos ocorre de acordo com o local que se originam e/ou terminam. Eles podem ser de dois tipos: os que não tocam o solo (intra-nuvem) e os que tocam o solo (ascendentes e/ou descendentes) (OGAWA, 1995). A Figura 2.4 esquematiza essa classificação.

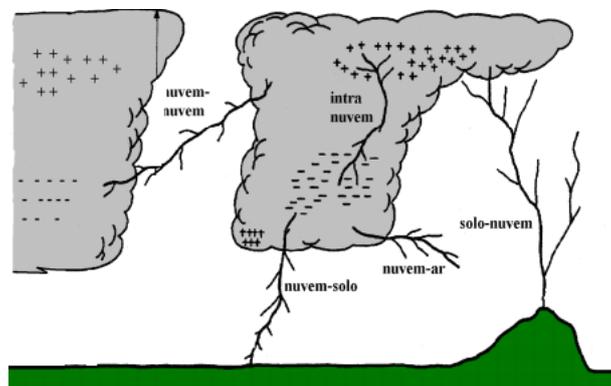


Figura 2.4 - Tipos de Relâmpagos

Fonte: FERRAZ (2001)

### 2.2.1 Relâmpagos intra-nuvem

Os relâmpagos que não tocam o solo, denominados *intra-nuvem (IN)*, ocorrem em 80 a 90% dos casos em uma determinada tempestade, isso é devido a dois principais fatores: as cargas opostas se encontram mais próximas umas das

outras dentro das nuvens e a capacidade isolante do ar diminui com a altura em decorrência da diminuição da densidade do ar (PINTO e PINTO Jr, 2000).

Como a maior parte desses relâmpagos ocorrem dentro da nuvem, sua visualização fica comprometida. Apenas em alguns casos, quando parte das descargas ocorrem em regiões pouco opacas na nuvem e/ou ocorrem na base inferior da nuvem é possível visualizar parte do canal, como podemos ver na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Relâmpago intra-nuvem registrado em São Paulo

### **2.2.2 Relâmpagos nuvem-solo (descendente)**

Os relâmpagos que conectam com o solo correspondem a 10 a 20% do total e podem ser classificados de duas maneiras: aqueles que se iniciam na nuvem e se conectam no solo, denominados relâmpagos *nuvem-solo (NS)* e aqueles que se iniciam em estruturas altas e vão em direção às nuvens, chamados *solo-nuvem (SN)* ou *ascendentes*. Esses relâmpagos ainda podem ser classificados quanto à polaridade da carga que é transferida para o solo: relâmpagos positivos (quando transfere carga positiva) e relâmpagos negativos (quando transfere carga negativa). A Figura 2.6 esquematiza melhor essa classificação.

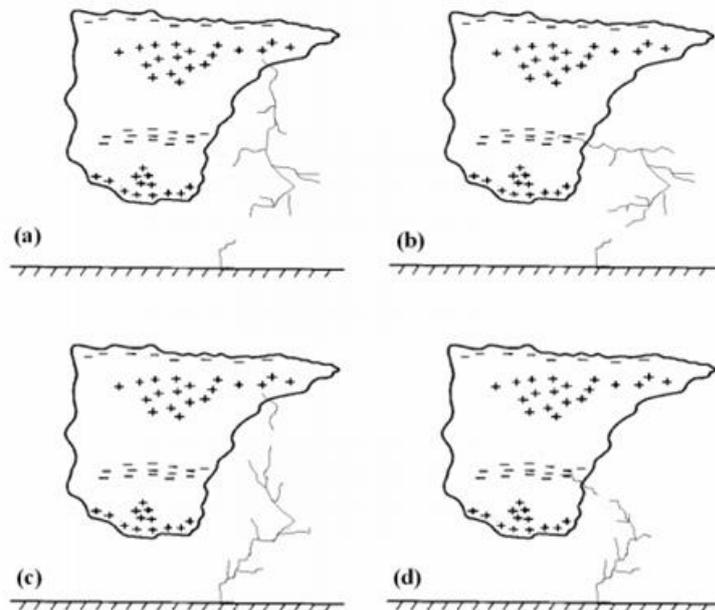


Figura 2.6 - Tipos de Relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo

Fonte: NACCARATO (2001)

Os relâmpagos descendentes são os mais frequentes e mais estudados devido aos seus efeitos sobre o ambiente e o ser humano.

Os relâmpagos negativos correspondem a 90% de todos os relâmpagos descendentes. Isso se deve ao fato de existir um centro menor de cargas positivas abaixo de um centro maior de cargas negativas na parte inferior da nuvem. Acredita-se que na interface destes centros surge um líder bidirecional cuja extremidade negativa parte em direção ao solo dando origem ao relâmpago negativo.

Antes de chegar ao solo, os relâmpagos descrevem um processo com várias etapas, como se pode ver na Figura 2.7.

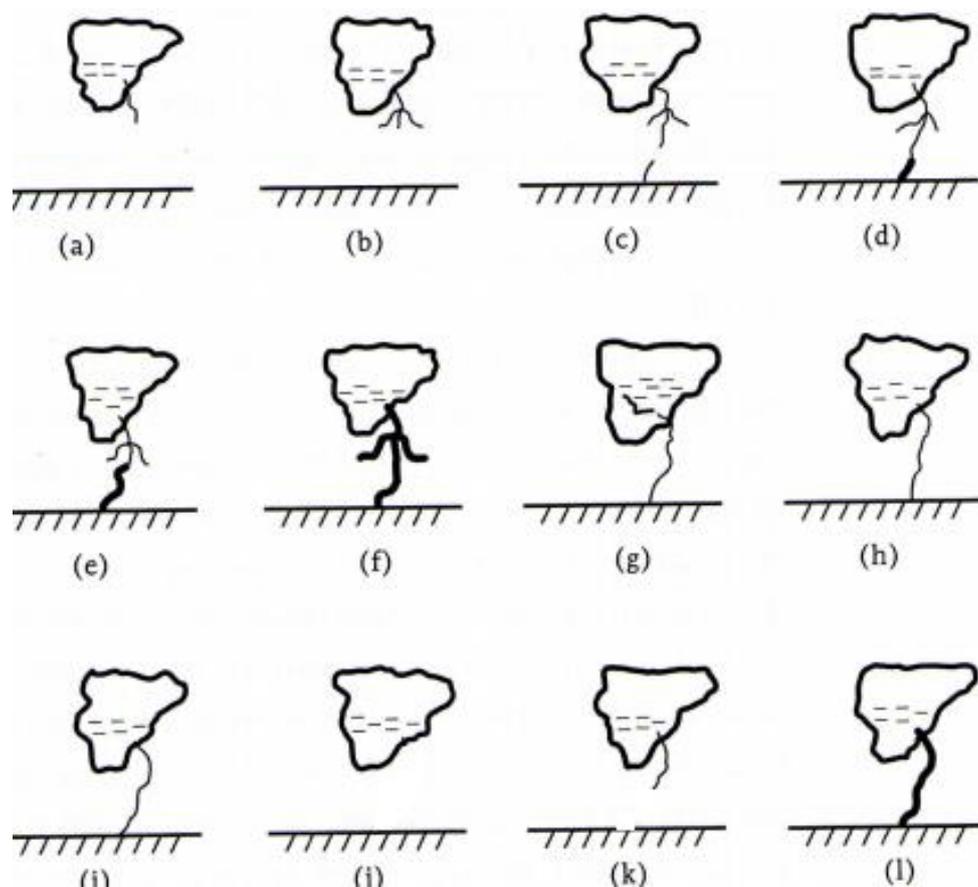


Figura 2.7 - Processos físicos de um relâmpago negativo

Fonte: PINTO (2008)

Primeiramente, como vemos na Figura (2.7a) dentro da nuvem ocorre uma sucessão de descargas fracas dando início a chamada *ruptura preliminar*. Nesse processo há um deslocamento das cargas no interior da nuvem para sua base, que logo em seguida, caminha em direção ao solo formando o *líder escalonado*, como se observa na Figura (2.7b). Na ponta desse líder há uma concentração de cargas negativas que, quebrando a rigidez dielétrica com o ar, irá percorrer o caminho mais favorável até tocar o solo.

Quando o líder estiver próximo ao solo, partirá do chão uma *descarga conectante* (Figura 2.7c) de carga oposta ao líder escalonado (devido ao campo elétrico intenso formado pelo líder). O encontro do líder com a descarga

conectante permitirá um fluxo intenso de cargas elétricas, o qual denomina-se *descarga de retorno* (Figuras 2.7d, e, f). Nesse instante ocorre um pico de corrente e luminosidade no canal formado.

Uma vez formado o canal, ele poderá ou não ser acompanhado de corrente contínua, que é uma corrente de baixa intensidade e uma duração longa em comparação com a descarga de retorno. Ela pode ser classificada em muito curta (3 a 10 ms), curta (10 a 40 ms) e longa (maior que 40 ms) (BALLAROTTI et al. 2005). Durante a corrente contínua o canal mantém uma certa luminosidade persistente. Alguns processos dentro da nuvem podem ocorrer, ocasionando uma súbita intensificação da luminosidade desse canal, conhecida por "*componente M*", como mostra a Figura 2.8.

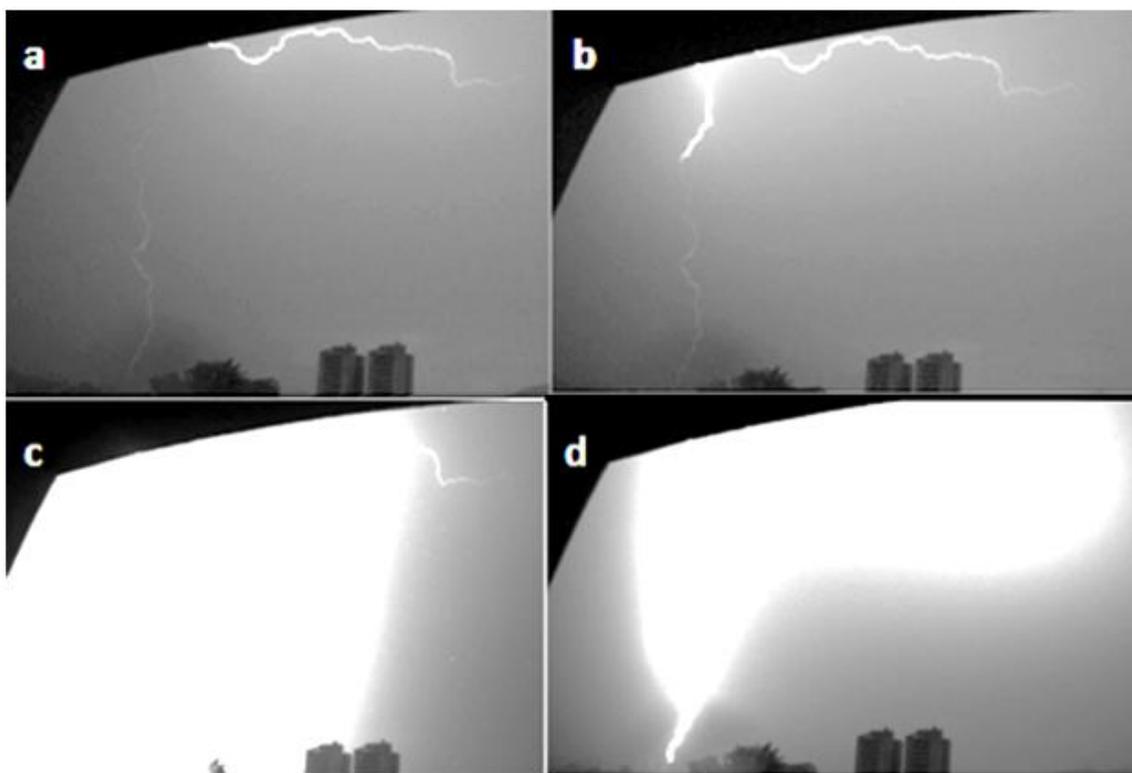


Figura 2.8 – Exemplo de Componente M

Podemos observar na Figura 2.8a e 2.8b uma corrente contínua de baixa luminosidade seguida por uma descarga componente M, intensificando o canal (figuras 2.8c e 2.8d).

Cessando a corrente contínua, poderá ainda ocorrer outra descarga percorrendo o canal que se encontra ionizado, que denominamos *líder contínuo* (Figura 2.7g, h, i, j, k,) Ao tocar o solo, dá-se início a segunda descarga de retorno, denominada *descarga de retorno subsequente* (Figuras 2.7l).

Os relâmpagos negativos possuem, em média, uma multiplicidade entre 3 a 4. Denominamos *multiplicidade* de um relâmpago o número de descargas de retorno que ele apresenta. A corrente das descargas varia de alguns quiloampères até dezenas de quiloampères e as cargas transferidas para o solo são da ordem de 20 C, podendo em alguns casos, atingirem centenas de coulombs (Uman, 1987).

A Figura 2.9 ilustra qual seria a variação de corrente ao longo do tempo para um raio descendente com 2 descargas de retorno subsequentes e um evento de corrente contínua (com componentes M) após a terceira descarga de retorno subsequente.

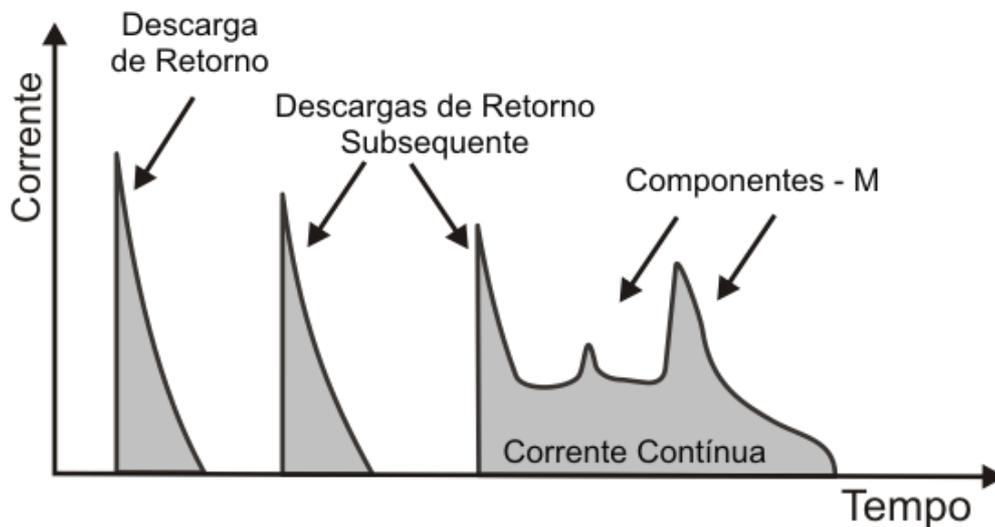


Figura 2.9 - Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago descendente

Os relâmpagos positivos possuem características distintas. Apenas 20% deles possuem multiplicidade maior que 1. Suas descargas subsequentes, na maioria das vezes, formam outro canal atingindo outro ponto de contato no solo (SCHUMANN, 2010; SABA et al, 2010). No que se refere a corrente contínua, os relâmpagos positivos possuem correntes contínuas longas em 70% dos casos (SABA et al, 2010). Também costumam apresentar picos de correntes de maior intensidade (ORVILLE e HUFFINES. 2001; RAKOV e UMAN. 2003; SCHULZ et al. 2005; NACCARATO. 2006, SABA.2010).

### 2.2.3 Relâmpagos solo-nuvem (ascendente)

Um segundo tipo de relâmpagos que tocam o solo, são os chamados relâmpagos ascendentes (RA), que se iniciam de estruturas altas e propagam-se em direção às nuvens de tempestades. Eles ocorrem com menor frequência que os relâmpagos descendentes. Sua ocorrência pode no entanto ser muito intensa em locais específicos, como estruturas muito altas, podendo até superar a ocorrência de raios descendentes (HEIDLER, 2012). A Figura 2.10

mostra um exemplo de relâmpago ascendente, partindo de uma torre de telecomunicação, registrado em São Paulo.



Figura 2.10 - Relâmpago ascendente

Fonte: PAIVA et al (2014)

Os raios ascendentes começaram a ser estudados na década de 30 (McEACHRON, 1939). Nos últimos anos, devido a rápida expansão de instalação de torres de geração de energia eólica e a enorme quantidade de antenas de telecomunicações, houve um crescente interesse em estudar esses relâmpagos. Alguns desses estudos se realizam no Japão (TAKAGI et al., 2006; WANG et al., 2008), na Alemanha e na Áustria (MIKI et al., 2005; FLACHE et al., 2008), nos Estados Unidos (MAZUR; RUHNKE, 2011) e o mais recentemente, no Brasil (SABA et al, 2012).

A iniciação dos raios ascendentes se dá quando uma tempestade ocorre perto de uma estrutura alta. Uma intensificação do campo elétrico no topo da

estrutura possibilita a ruptura dielétrica do ar e um líder ascendente se inicia propagando-se em direção à base da nuvem (SABA et al, 2012).

Há também trabalhos que relatam que os ascendentes são iniciados por outro relâmpago descendente, positivo em sua maioria, que ocorre nas proximidades dessas estruturas (WANG et al., 2010; MAZUR;RUHNKE, 2011; WARNER et al., 2012). No Brasil, em 2012, as análises dos relâmpagos ascendentes começaram ser estudadas com sensores de campo elétrico (SCHUMANN et al., 2014) e por câmeras de alta resolução temporal (SCHUMANN et al., 2014a).

A Figura 2.11 explica detalhadamente as etapas do relâmpago ascendente.

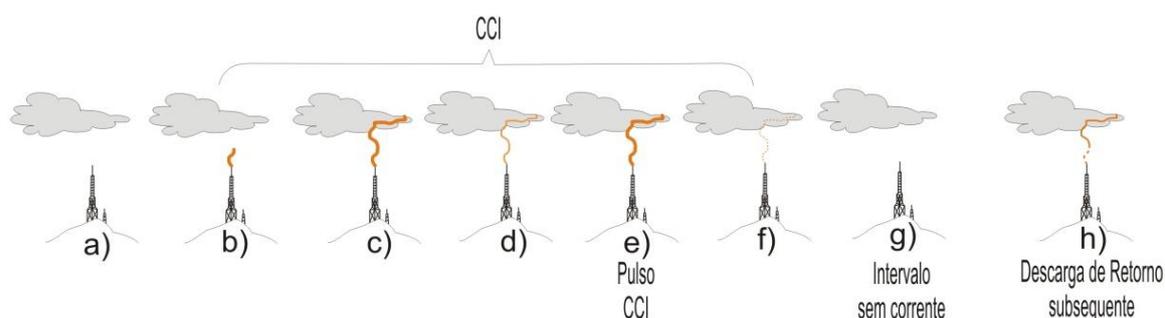


Figura 2.11 – Etapas de um relâmpago ascendente (SCHUMANN, 2012)

Durante a propagação do líder ascendente em direção à nuvem de tempestade, há o aparecimento de uma corrente contínua inicial (CCI) ao longo do canal até a base da nuvem. Isso ocorre até centenas de milissegundos depois de iniciada a descarga. Durante a CCI podemos observar súbitas intensificações de corrente que são denominadas Pulsos de CCI ou componentes M (Figura 2.9e). Cessando a CCI, o raio ascendente pode terminar ou após um curto intervalo de tempo dar início a descarga de retorno subsequente (figura h) reutilizando o mesmo canal anterior.

A Figura 2.12 ilustra qual seria a variação de luminosidade ao longo do tempo para um raio ascendente iniciado pela corrente contínua inicial (com componentes M) e seguido por duas descargas de retorno subsequentes.

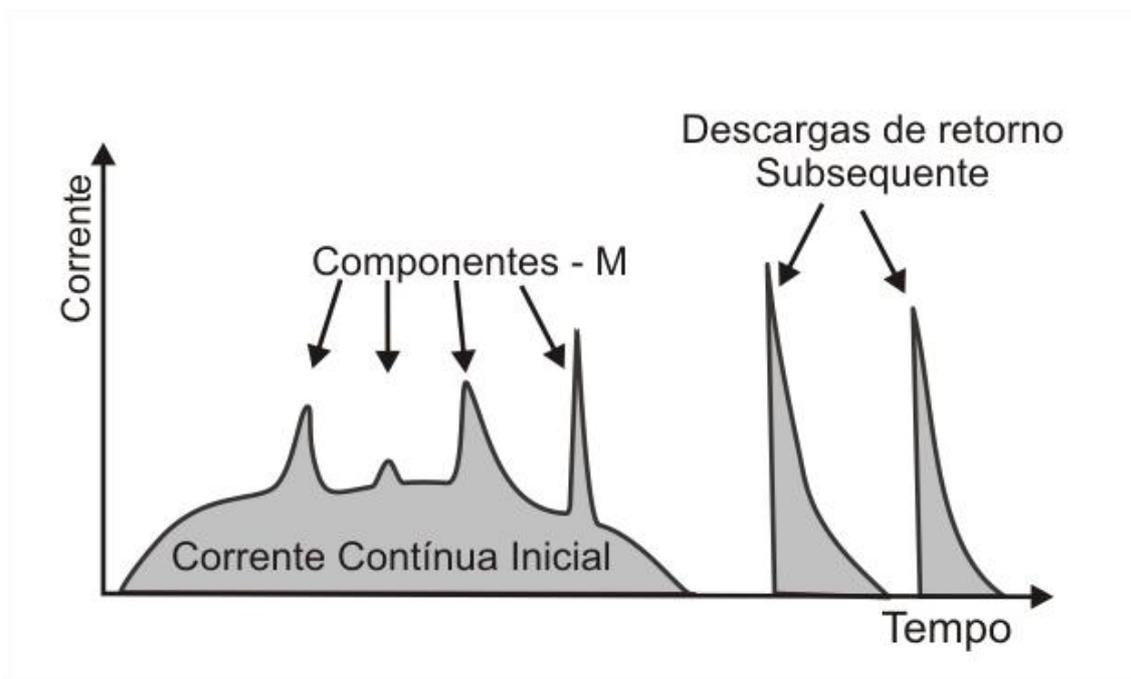


Figura 2.12 - Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago ascendente



### 3 INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.1 Locais de Observação

##### 3.1.1 Região do Pico do Jaraguá

O Pico do Jaraguá é o ponto mais alto da cidade de São Paulo, localizado a aproximadamente 1100 metros de altitude em relação ao nível do mar. Na parte superior do pico há 10 torres de telecomunicação, de 20 a 139 metros de altura. Até o momento foram registrados relâmpagos apenas em 3 torres, no qual nomeou-se de T1, T2 e T3, como ilustra a figura 3.1.

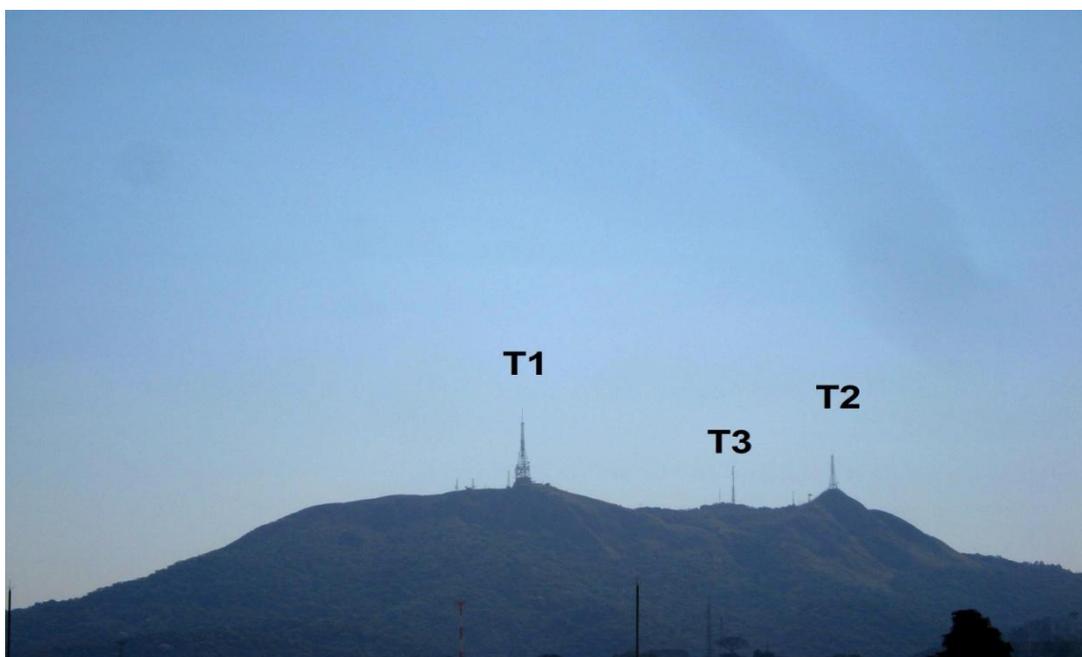


Figura 3.1 - Torres do Pico do Jaraguá

A torre T1, com 139 metros, é responsável pela maioria dos relâmpagos ascendentes registrados desde 2012, chegando até a presente data a um total de 76 relâmpagos. A T2 com 90 metros registrou 11 raios ascendentes e a T3 registrou apenas 1 raio ascendente. A figura 3.2 mostra com mais detalhes as alturas do relevo.

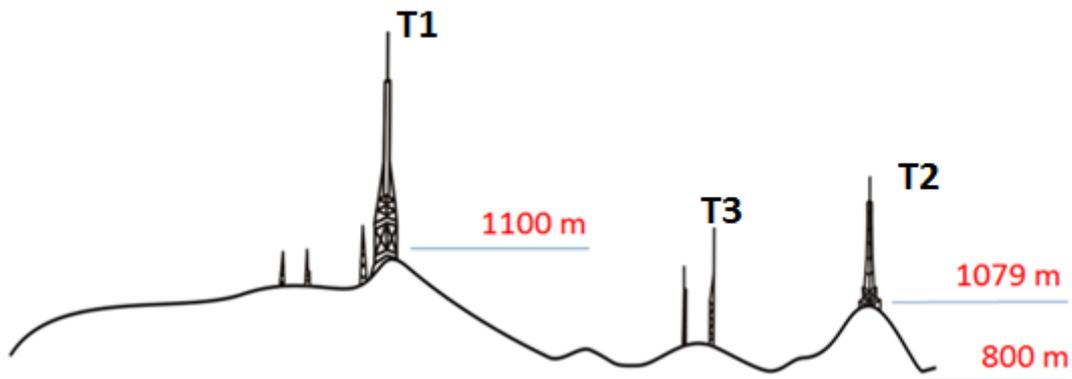


Figura 3.2 - Relevo do Pico do Jaraguá

Para realizar a observação dos relâmpagos ascendentes e descendentes na região, são utilizadas câmeras de alta resolução e sensores de campo elétrico, localizados a uma distância de 5 km e 10 km, respectivamente, como ilustra a figura 3.3.



Figura 3.3 - Local da Instrumentação em São Paulo. O indicador amarelo indica o local do Pico do Jaraguá, o vermelho indica o local do sensor de campo elétrico e em azul, as câmeras de alta resolução voltadas para o Pico.

Fonte: Google Earth (2015)

### 3.1.2 Região da Avenida Paulista

O segundo ponto de observação de raios ascendentes utilizado neste trabalho foi a região da Avenida Paulista, escolhida para registrar relâmpagos ascendentes pela grande quantidade de torres e antenas existentes. Pelo campo de visada da câmera (Figura 3.4), conseguimos observar cerca de 23 torres e/ou antenas que estão localizadas em cima dos prédios, como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.4 - Câmeras observando a região da Av. Paulista



Figura 3.5 - Torres e antenas da região da Av. Paulista

As torres mais altas possuem 220 e 198 metros e estão cerca de 8 quilômetros de distância do ponto de observação das câmeras.

Diferente do Pico do Jaraguá que vêm sendo observado desde 2012, as torres da Av. Paulista foram observadas apenas no último verão (novembro de 2013 a março de 2014).

### 3.2 Sensor de campo elétrico

Um dos instrumentos utilizados para a elaboração dessa pesquisa é o sensor do campo elétrico gerado pelos relâmpagos. Esse aparelho pertence ao grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do CCST/INPE

Para obter as formas de onda do campo elétrico, foi utilizada uma antena de placas paralelas ligada a um integrador, uma antena GPS sincronizada no tempo e um computador para recebimento dos dados (SCHUMANN, 2012), como mostra a Figura 3.6 (a) e (b).

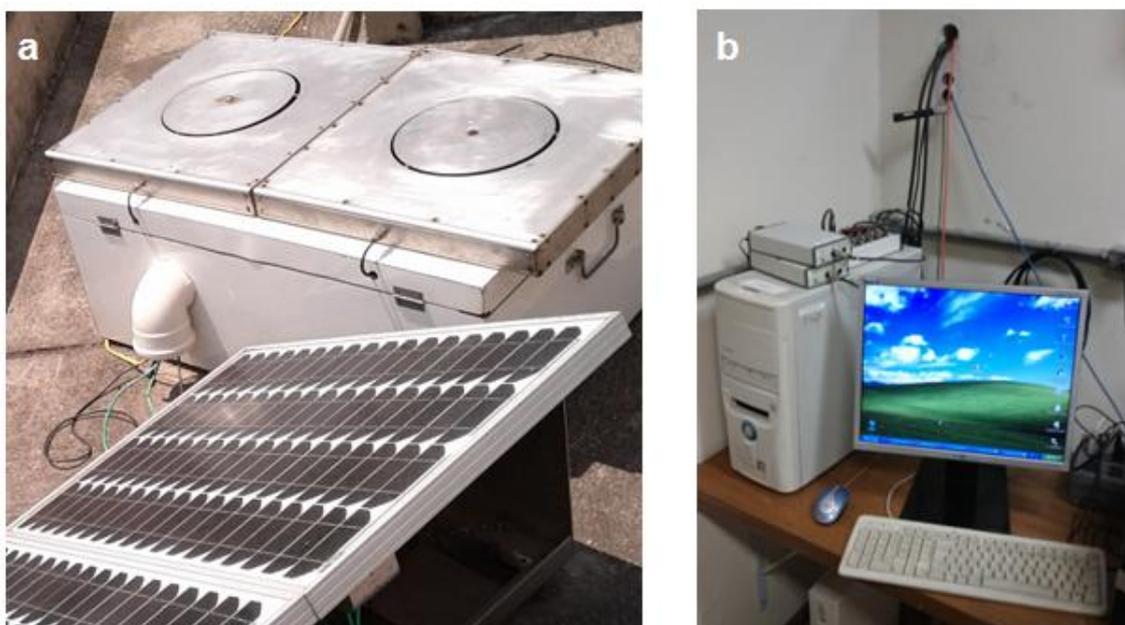


Figura 3.6 - Sensor de campo elétrico e o painel solar utilizado na alimentação dos integradores

Quando a antena do campo elétrico recebe um pulso de onda eletromagnética, este sinal é filtrado para passar apenas uma faixa de frequência de interesse (300 Hz – 1.5 MHz) e também amplificado em um integrador. O sinal é então transmitido por fibra óptica por um conversor eletro/ótico até a placa de aquisição. O link de fibra óptica tem como finalidade minimizar o ruído ambiente no sinal do campo elétrico. A montagem desse instrumento é mostrada com detalhes na Figura 3.7.

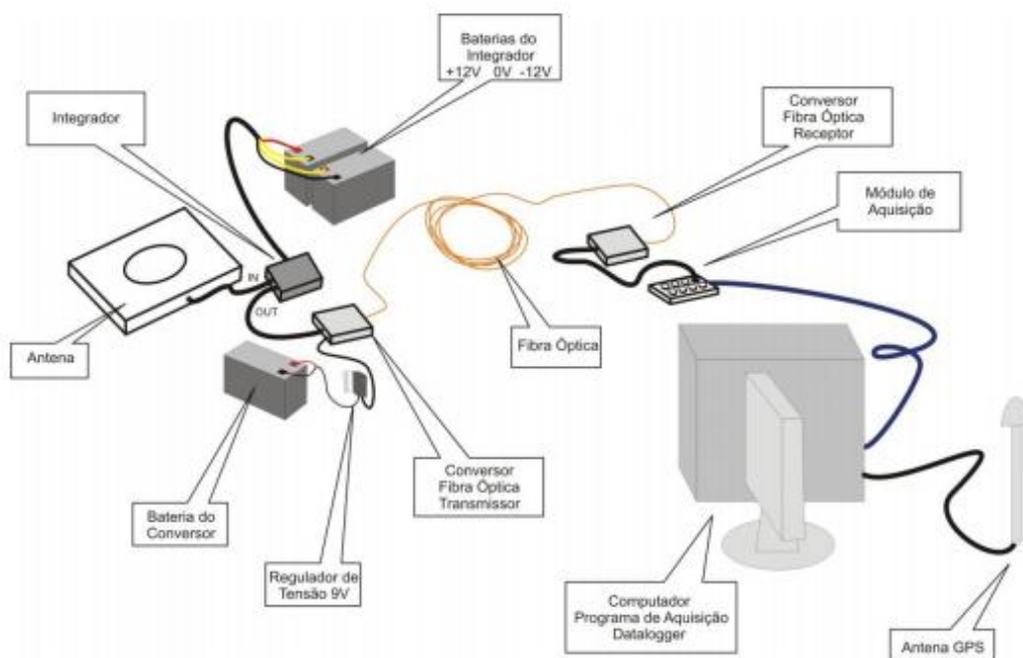


Figura 3.7 - Montagem do campo elétrico

A configuração desse instrumento permite gravar os dados de forma contínua durante a tempestade, podendo mostrar variações de pequena e grande intensidade provocadas no campo elétrico durante um relâmpago. Os dados são gravados em arquivos de 1 segundo de duração. Isso permite estudar as variações do campo elétrico das distintas fases de um relâmpago, tais como

descargas de retorno, pulsos de corrente contínua, descarga de retorno subsequente, entre outras.

Um exemplo da forma de onda produzida por esse campo elétrico é mostrado na Figura 3.8.

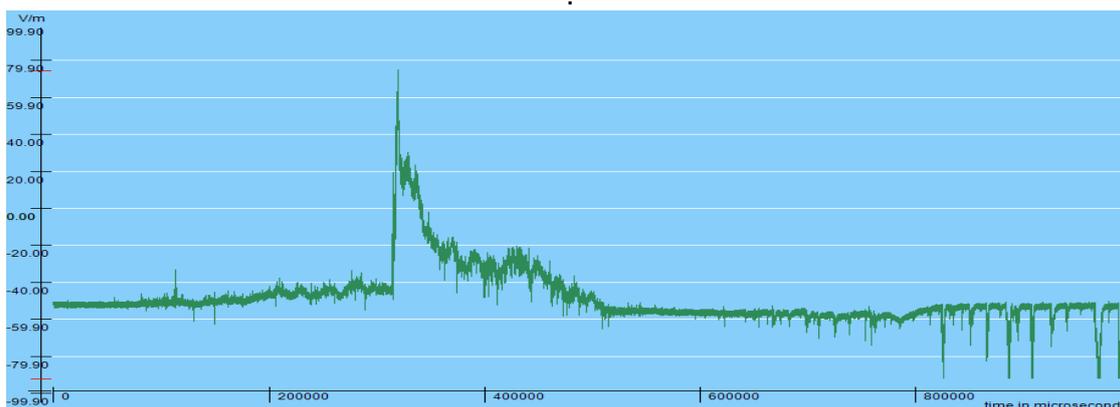


Figura 3.8 – Exemplo da variação do campo elétrico gerado por um relâmpago ascendente

### 3.3 Câmeras de alta resolução

O estudo de relâmpagos utilizando câmeras de alta velocidade deu início em 1920, obtendo uma resolução de 200 imagens por segundo (MOREAU et al., 1992). No Brasil, estudos começaram a ser desenvolvidos com câmeras cada vez mais aprimoradas e sofisticadas (BALLAROTTI, 2005; SABA et al., 2006; CAMPOS et al., 2007, SABA et al., 2010).

Nesse trabalho, foram utilizados três tipos de câmeras com diferentes resoluções, sendo elas: Miro 4 (1.000 imagens por segundo), Phantom V310 (10.000 imagens por segundo) e Photron (1.000 imagens por segundo). Podemos ver a ilustração dessas câmeras nas Figuras 3.9 (a), (b) e (c), respectivamente.



Figura 3.9 (a) Miro 4; (b) Phantom V310; (c) Photron

O procedimento operacional das câmeras é basicamente o mesmo. As câmeras são direcionadas para a tempestade que se quer observar e em seguida é feito o ajuste da luminosidade para se obter o contraste adequado. Essas câmeras gravam uma sequência de imagens sincronizada com o tempo do GPS de forma contínua. Quando o operador vê a descarga, aciona manualmente o *trigger* para finalizar a gravação. Pelos programas internos de cada câmera é permitido ajustar e gravar o intervalo anterior e posterior do *trigger* ter sido acionado. Em nosso estudo, foi ajustado o intervalo de 2 segundos para a aquisição das imagens (sendo 1 segundo *pré-trigger* e 1 segundo *pós-trigger*).

Para a análise dos registros dos relâmpagos, foi utilizado o *software* da câmera Phantom, como é mostrado na Figura 3.10.

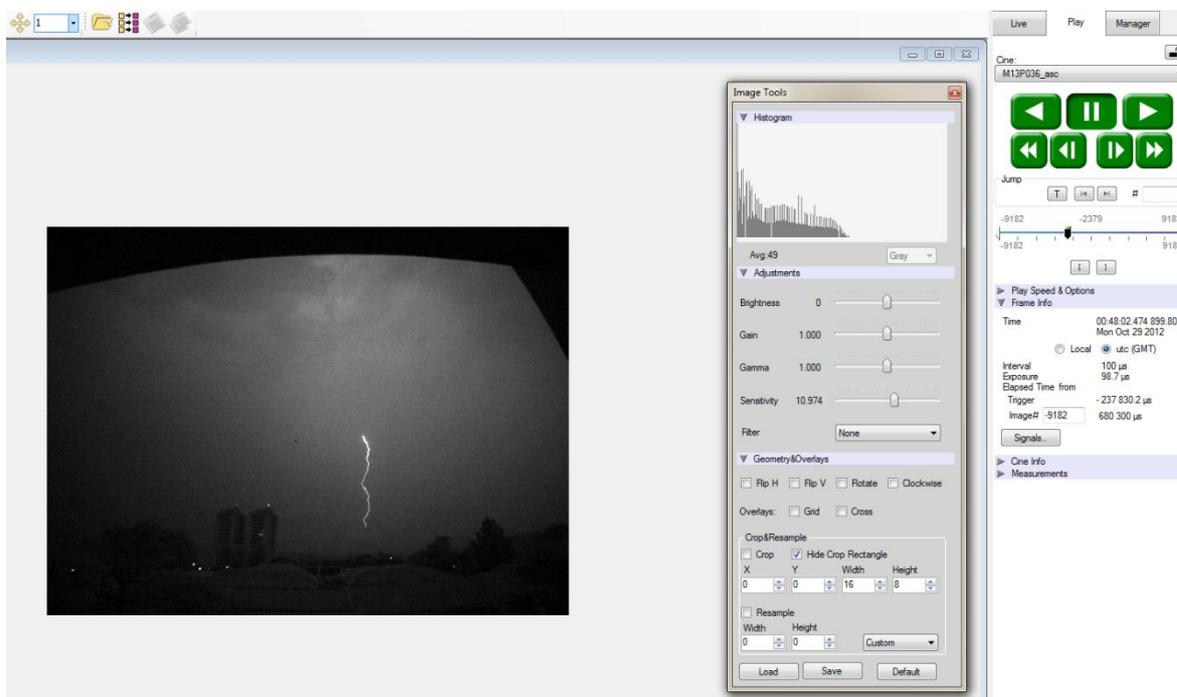


Figura 3.10 - *Software* utilizado para analisar os relâmpagos

### 3.4 Sistemas de localização de descargas

Para detectar os relâmpagos a partir da radiação eletromagnética emitida por eles, foi desenvolvido em 1953 um método utilizando medidas em pontos específicos (STOREY, 1953). Somente em 1987, identificou-se o espectro efetivo de emissão eletromagnética das descargas elétricas (LE VINE, 1987). A partir daí outros pesquisadores, como Uman, demonstraram que as descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo emitiam radiação eletromagnética de baixa frequência (LF- Low Frequency) variando entre 10 a 300 kHz (UMAN, 1987). Os relâmpagos intra-nuvem por serem processos de ruptura, emitiam radiação eletromagnética, de alta frequência denominada VHF (Very High Frequency), que variam entre 100 a 800 MHz (KRIDERr, 1996). Uma

descrição mais completa de ambos os sistemas de frequências encontra-se em Cummins (2009) e Nag et al. (2014).

Na Figura 3.11 ilustra os principais sistemas de detecção de relâmpagos e suas respectivas faixas de frequência de operação.

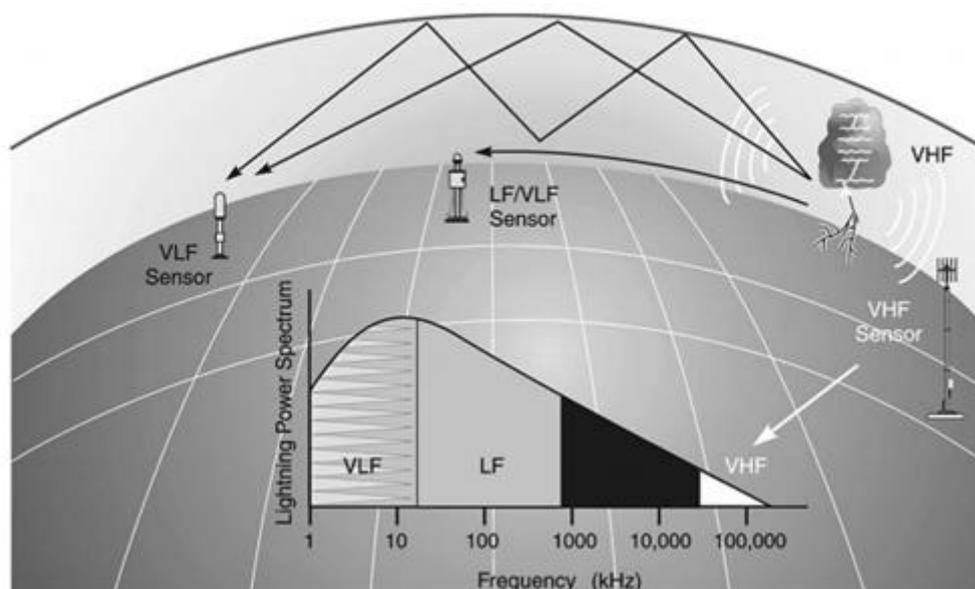


Figura 3.11 - Principais tipos de sistemas de detecção pela frequência

Fonte: Cummins e Murphy (2009)

Com o avanço da tecnologia ao longo dos anos, conseguiu-se obter as medidas das radiações em tempo real a partir de sensores no solo, possibilitando, além de localizar as descargas atmosféricas, também classificá-las como NS e IN, determinar seu horário de ocorrência, tempo de subida, largura de pulso da forma de onda, multiplicidade, polaridade e valor da corrente no canal (GAI. 1999; VAISALA 2003, 2004).

Diante de uma demanda cada vez maior de informações, foi preciso expandir essas redes de sensores de radiação em escala mundial. Começaram então a se desenvolver vários tipos de sensores (com diferentes tecnologias de detecção) aumentando assim a eficiência de detecção, surgindo os sistemas

de localização relâmpagos ou redes de detecção (ORVILLE,1983; ORVILLE,1991; ORVILLE e HUFFINES, 1999).

Cada sistema é composto de vários sensores eletromagnéticos que tem o objetivo de captar e classificar, em tempo real, as emissões eletromagnéticas provenientes de relâmpagos nas faixas LF. Como explicado anteriormente, essa faixa permite a detecção da descarga de retorno dos relâmpagos NS (RAKOV, UMAN, 2003). Após detectado, os sensores enviam os dados recebidos a uma central de processamento, que compara os horários certificando-se que pertencem ao mesmo relâmpago e em seguida, calculam o ponto exato de impacto da descarga.

Com o avanço tecnológico, diferentes tipos de sistemas de localização de relâmpagos foram surgindo cada vez mais sofisticado e buscando otimizar a eficiência de detecção e precisão de localização. As técnicas mais utilizadas em redes de detecção e também neste trabalho são a DF/MDF (Magnetic Field Direction Finding) e TOA (Time Of Arrival Lightning Location retrieval) (NAG et al., 2014).

A Tabela 3.1 faz uma descrição das redes de detecção utilizadas nesse trabalho com as respectivas técnicas e faixa de frequência utilizada em cada uma delas.

Tabela 3.1 – Redes de detecção e suas características

Tecnologia	Tipo Detecção	Frequência	Técnica
<b>RINDAT</b>	NS	LF	MDF/TOA
<b>BrasilDAT</b>	NS e IN	LF	TOA

A rede BrasilDAT (Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas Totais) começou a ser implementada no Brasil em 2011 pelo Grupo de

Eletricidade Atmosférica (ELAT) do CCST/INPE, em parceria com a EarthNetworks dos EUA. O principal objetivo dessa rede é o monitoramento em tempo real das descargas atmosféricas NS e IN (NACCARATO et al. 2012).

Já a rede RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) é uma rede formada por sensores de diversas instituições espalhados por várias regiões do país que permitem detectar as descargas atmosféricas que atingem o solo (NACCARATO et al. 2012, RINDAT, 2015). Os principais sensores que integram essa rede são os sensores da IMPACT/LS7000 (cujos métodos utilizados são MDF e TOA) e os da LPATS (método TOA). A localização destes sensores se encontra na metodologia deste trabalho.

#### **3.4.1 DF/MDF**

A técnica MDF (Magnetic Direction Finder) se baseia na detecção de relâmpagos por meio da direção magnética. Com dois ou mais sensores é possível determinar o ponto de origem da descarga elétrica (UMAN, 1987; KRIDER, 2014).

Cada sensor é formado por dois fios enrolados na forma de bobina, ortogonais entre si, que captam a componente magnética do relâmpago. A intensidade da radiação recebida pelo sensor depende da direção entre a onda magnética e cada bobina. Essa intensidade determina a direção que ocorreu o relâmpago, representada pelo seu azimute (ângulo em relação ao norte verdadeiro) (NACCARATO, 2006; SARAIVA, 2010) como mostra a Figura 3.12.

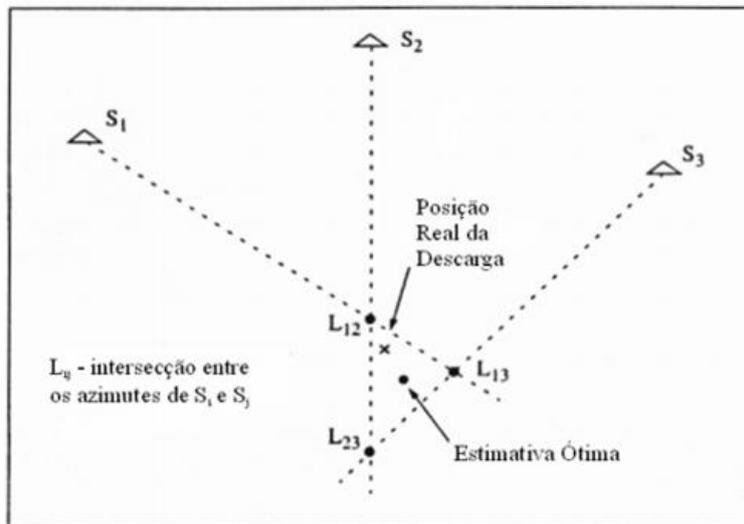


Figura 3.12 - Algoritmo usado no método MDF

Fonte: NACCARATO (2001)

Para minimizar o erro de localização é necessário três ou mais sensores para ser efetuado o procedimento de *triangulação*.

### 3.4.2 TOA

Outra técnica utilizada pelo sistema de detecção de relâmpagos é determinada pelo horário de chegada da radiação eletromagnética gerada por uma descarga. Com o avanço tecnológico dos sistemas de GPS, cada vez mais tem-se aprimorado a precisão do sincronismo temporal, otimizando muito esse método na localização dos relâmpagos. Com isso, os sistemas modernos existentes oferecem erros de localização inferiores a 100 metros.

Cada par de sensores define uma curva hiperbólica descrevendo os possíveis locais da descarga, a qual consiste no lugar dos pontos de mesma diferença temporal entre eles. O ponto de intersecção entre os sensores determina o ponto de impacto do relâmpago, como podemos ver na Figura 3.13 (a). Em algumas circunstâncias, as curvas definidas por três sensores podem se interceptar duas vezes, como mostra a Figura 3.13 (b), resultando em uma solução ambígua.

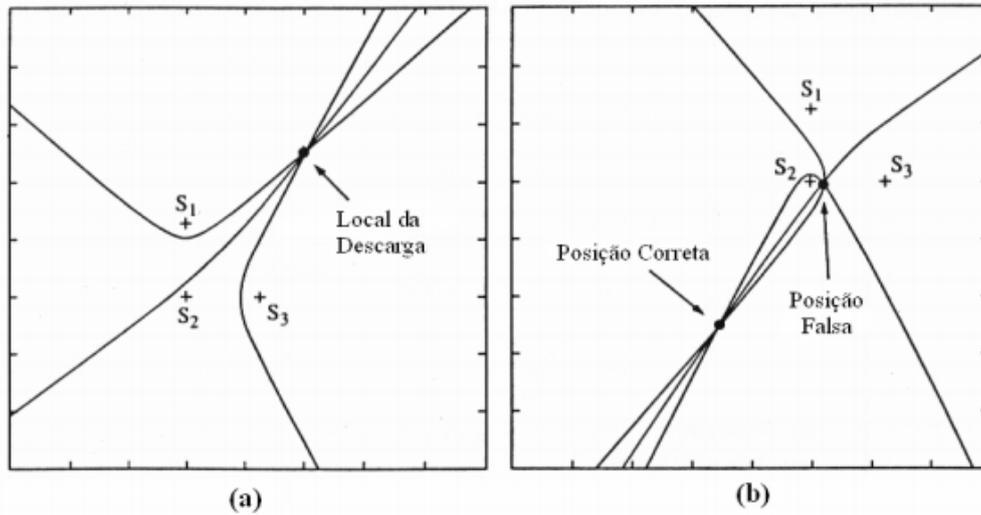


Figura 3.13 (a) Método TOA utilizando curvas hiperbólicas. (b) Exemplo de localização ambígua utilizando curvas hiperbólicas

Fonte: NACCARATO (2001)

Sendo assim, foi implementado o método das intersecções circulares, que é utilizado para determinar, de maneira otimizada, tanto a localização como o instante de ocorrência do relâmpago. Cada sensor participante da solução registra um horário diferente para a chegada da radiação eletromagnética gerada pela descarga. a partir do horário de chegada registrado, cada sensor começa a regredir no tempo gerando círculos que mostram a possível localização da descarga. O ponto de impacto e o horário de ocorrência da descarga será dado pela intersecção de todos os círculos gerados pelos sensores participantes, como mostra a Figura 3.14.

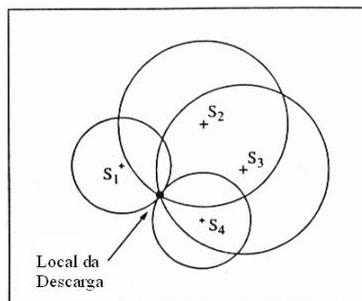


Figura 3.14 - Método TOA utilizando curvas circulares

Fonte: NACCARATO (2001)

### 3.4.3 Estimativa do pico de corrente

Além da localização das descargas atmosféricas, os sensores também utilizam a forma de onda eletromagnética emitida pelos pulsos dos relâmpagos para determinar o pico de corrente estimado. Esses valores são calculados a partir do pico de radiação eletromagnética gerada pela corrente que flui no canal. Os modelos matemáticos utilizados para estimar a corrente levam em consideração que o valor de pico do campo elétrico irradiado pela descarga é diretamente proporcional ao pico de corrente que flui pelo canal, segundo a expressão 3.1 (WACKER E ORVILLE, 1999):

$$I_{pk} \approx \frac{2\pi D}{\mu_0 v} E_{pk} \quad (3.1)$$

sendo  $I_{pk}$  a intensidade do pico da corrente,  $D$  a distância horizontal da fonte de radiação,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo;  $v$  a velocidade de propagação do pico de corrente de retorno (constante);  $E_{pk}$  a intensidade do pico da radiação do campo elétrico vertical no solo.

Deve-se levar em consideração à atenuação que a radiação eletromagnética sofre conforme ela se propaga (proporcional a distância percorrida), denominada efeito de propagação. Esse feito faz com que haja redução do valor do pico de corrente e aumento do tempo de subida. Por isso, como a radiação percorre distintas distâncias até chegar aos sensores, é importante obter uma normalização da intensidade do sinal pela distância (RNSS). A expressão utilizada para o cálculo da RNSS, dada por Cummins et al. 1998a pode ser vista na fórmula 3.2 a seguir:

$$RNSS = C \cdot SS \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^p e^{\frac{r-D}{A}} \quad (3.2)$$

sendo  $C$  uma constante unitária,  $SS$  a intensidade do sinal eletromagnético medido pelo sensor,  $r$  a distância da fonte de radiação (em km),  $D$  a distância de normalização (definida como 100 km),  $p$  o expoente de atenuação (dado por Orville (1991) com o valor de 1,13) e  $A$  sendo a escala de comprimento da atenuação da radiação.

Ambas as redes BrasilDAT e RINDAT utilizam esse processo, com diferentes parâmetros para estimar o valor de pico da corrente que circula pelo canal do relâmpago detectado.



## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Registros de relâmpagos ascendentes e descendentes

Registros de relâmpagos ascendentes vêm sendo realizados desde o mês de janeiro do ano de 2012 no Pico do Jaraguá e na região da Av. Paulista no período correspondente a novembro de 2013 até março de 2014. Com câmeras de alta resolução cerca de 5 quilômetros de distância do Pico do Jaraguá foram filmados 84 relâmpagos ascendentes partindo dessas torres e 4 relâmpagos ascendentes da Av. Paulista.

Com as câmeras voltadas para o pico, também registrou-se relâmpagos descendentes em alguns locais conhecidos, como prédios ou outras torres, dentro do campo de visada da câmera. Podemos ver na Figura 4.1 os lugares onde já ocorreram esses relâmpagos, indicado pelas setas.

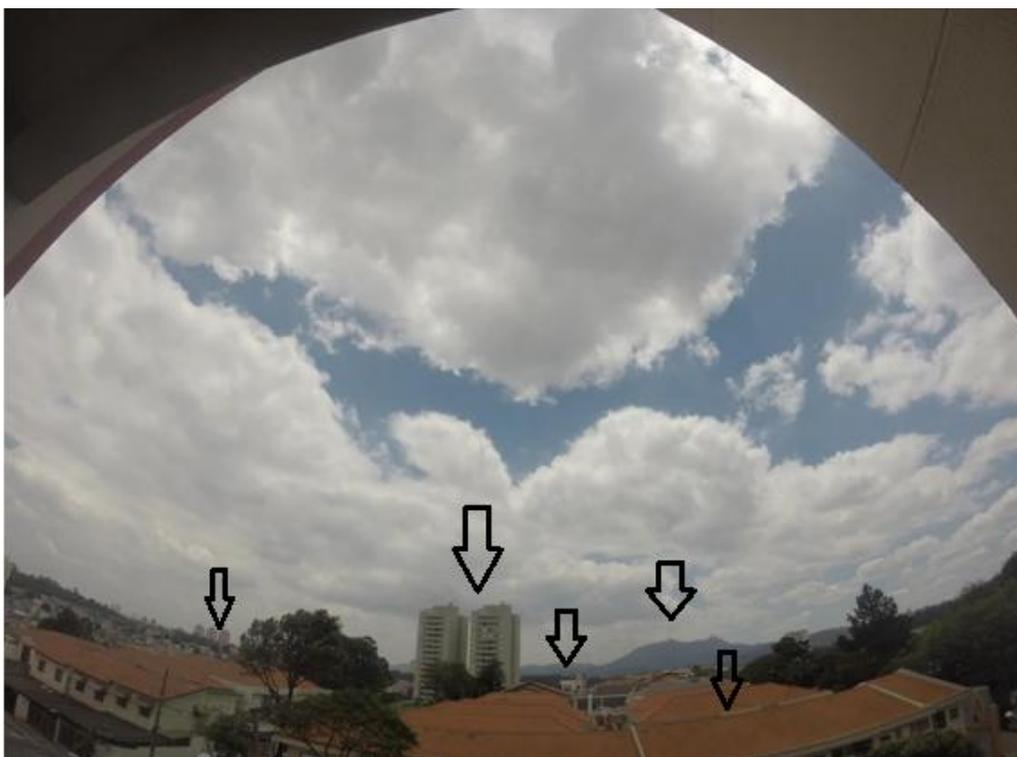


Figura 4.1 - Locais onde ocorreram relâmpagos descendentes

Além dos relâmpagos ascendentes, foi escolhido registrar relâmpagos descendentes em local conhecido pois é possível calcular o erro de localização fornecido pelo sistema de localização de relâmpagos, que será explicado no próximo tópico. Até o momento foram capturados 27 relâmpagos descendentes com essa característica. Este número baixo representa a dificuldade de se obter esse tipo específico de relâmpago, pois nem sempre ele atinge um ponto conhecido no solo.

As câmeras registram e gravam os relâmpagos com precisão de milissegundos e são sincronizados com o sistema GPS. Após o registro do relâmpago, foi feita a análise minuciosa buscando identificar cada pulso, principalmente as descargas de retorno subsequente e componente M, definidas no capítulo 2.

#### **4.2 Dados dos sistemas de localização de relâmpagos**

Conforme já explicado, os sistemas de localização de relâmpagos detectam os pulsos eletromagnéticos produzidos pelas descargas e determinam o horário de sua ocorrência com precisão de milissegundos. Além dessas informações, são fornecidas a localização (latitude e longitude) do ponto de impacto (através da qual consegue-se determinar seu erro de localização) e a estimativa do valor de pico da corrente.

Sabendo o horário exato da ocorrência dos processos físicos do relâmpago (obtido a partir dos vídeos com a precisão de milissegundos), buscou-se informações dos sistemas de detecção das redes BrasilDAT e RINDAT a fim de saber quais pulsos foram detectados. Os dados encontrados foram comparados com os pulsos vistos pelas câmeras de alta resolução com o objetivo de inferir a eficiência de detecção das redes e o erro de localização.

Outra informação fornecida por essas redes foi a estimativa do pico de corrente de cada pulso, para os quais calculou-se a média dos valores de picos de correntes das descargas de retorno subsequente e das componentes M para

os relâmpagos ascendentes e descendentes. Sabendo isso, conseguiu-se determinar que tipo de pulso foi mais forte em cada relâmpago.

As redes BrasilDAT e RINDAT são as principais redes de localização de descargas atmosféricas instaladas no Brasil e contam com vários sensores espalhados por diversas regiões do país.

A localização desses sensores pode ser visualizada nas Figuras 4.2a, para a rede BrasilDAT e 4.2b para a rede RINDAT.

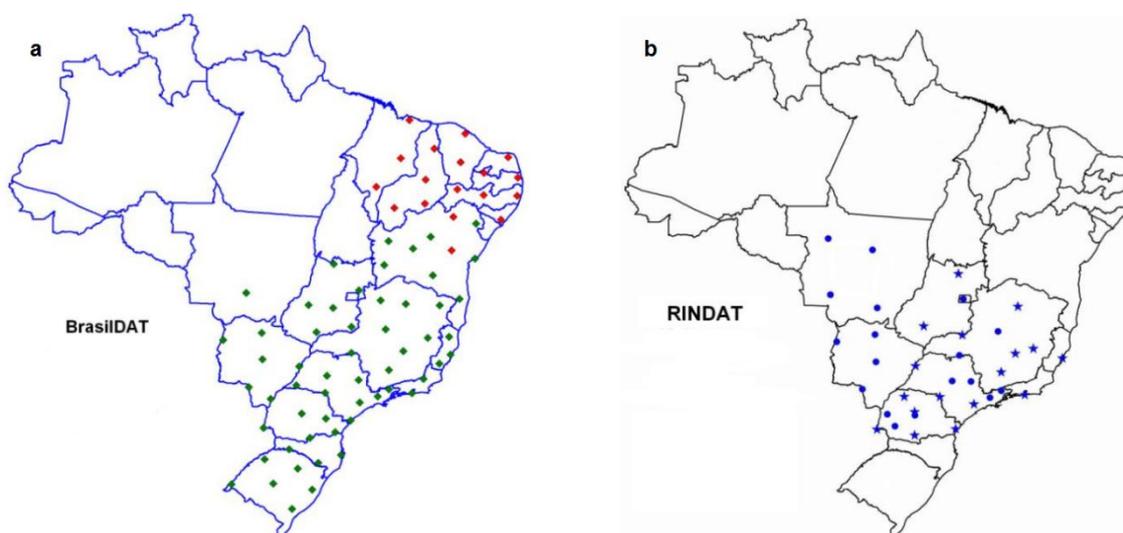


Figura 4.2 - Localização dos Sensores de detecção de relâmpagos.

(a)BrasilDAT, (b) RINDAT

FONTE: NACCARATO et al. (2012)

A rede BrasilDAT possui 56 sensores em operação (verde) e 19 novos sensores que ainda serão instalados (vermelho). Já a rede RINDAT possui 35 sensores em operação, sendo sensores da família IMPACT/LS7000 (indicados por círculos) e os antigos LPATS (indicados por estrelas).

### 4.3 Dados do campo elétrico

No início da tempestade é acionado remotamente via internet o sensor de campo elétrico que se encontra a 10 quilômetros do Pico do Jaraguá e a uma distância que varia de 3 a 10 km das torres que se situam na região da Av. Paulista. Os dados de campo elétrico são sincronizados com o sistema GPS de forma que cada arquivo inicia-se e termina exatamente em um segundo.

No final da tempestade foram coletados os dados do campo elétrico dos horários onde ocorreram os relâmpagos filmados e logo após foram analisados de forma minuciosa o tempo de subida e a amplitude máxima (pico) de cada pulso do relâmpago.

Para analisar as formas de onda do campo elétrico, levou-se em consideração o Tempo de Subida, definido como o tempo entre 10 e 90% do valor do Pico do Campo Elétrico (para desprezar efeito do ruído e flutuações no valor do pico), conforme ilustra a Figura 4.3. Estes valores são parâmetros importantes para a caracterização da descarga como IN ou NS pelo sistema de localização de descargas (quanto menor o tempo de subida, maior a probabilidade de ser classificado como intranuvem). A Figura 4.3 ilustra como foi determinado esse parâmetro.

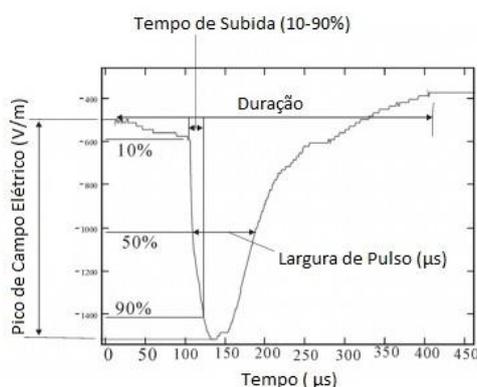


Figura 4.3 – Definição dos parâmetros do Campo Elétrico

Fonte: Adaptado de Miki et al (2006)

#### 4.4 Correlação entre o pico de corrente com o pico do campo elétrico

Como já mencionado anteriormente, quando um pulso é detectado pela rede, algumas características são fornecidas, como latitude, longitude, horário da ocorrência com precisão de milissegundos, pico de corrente, polaridade, entre outros.

Levando em consideração que a corrente que flui pelo canal da descarga é proporcional ao pico do campo elétrico, como explicado no capítulo 3, conseguiu-se estimar os valores dos picos da corrente elétrica para alguns pulsos não detectados.

Para casos de relâmpagos com pulsos detectados e campo elétrico medido, obteve-se uma relação linear (para cada relâmpago) entre o pico de corrente estimado e o pico de campo elétrico. A partir da equação da reta ajustada, foram obtidos os picos de corrente para os pulsos que não foram detectados pelas redes de detecção (vide Figura 4.4).

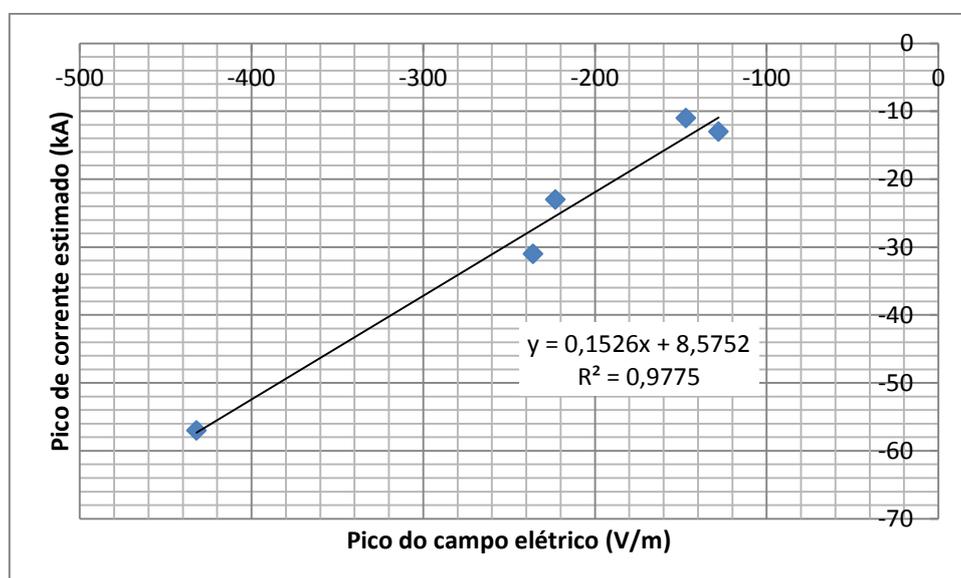


Figura 4.4- Exemplo de como determinou-se o Pico de Corrente Estimado para pulsos de um relâmpago

É importante destacar que, para cada relâmpago analisado, foi gerado uma correlação específica entre o pico de corrente estimado e o pico do campo elétrico, com a finalidade de calcular os valores de pico dos pulsos não detectados.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Relação das Componentes M e Descargas de Retorno Subsequentes dos relâmpagos ascendentes e descendentes

#### 5.1.1 Região do Pico do Jaraguá

Conforme já descrito, desde 2012 relâmpagos ascendentes e descendentes vêm sendo registrados na região do Pico do Jaraguá. A Tabela 4.1 resume a quantidade de pulsos para cada processo físico estudado: componente M e descarga de retorno subsequente para cada tipo de relâmpago. Note que nesse período, apenas 29 relâmpagos ascendentes e 16 descendente foram selecionados para essa análise. Esse número reduzido se deu pelo fato de nem todas descargas apresentarem os dois processos físicos em questão, existindo apenas o líder ascendente para o relâmpago ascendente ou a primeira descarga de retorno do relâmpago descendente.

Tabela 5.1 - Quantidade de Pulsos para cada Processo Físico dos Relâmpagos

<b>Tipo de Relâmpago</b>	<b>Total de Relâmpagos analisados</b>	<b>Componente M</b>	<b>Descarga de Retorno Subsequente</b>
<b>Ascendente</b>	29	77	17
<b>Descendente</b>	16	8	32

De acordo com o resultado dessa primeira análise, observou-se um fato considerável e importante. Os relâmpagos ascendentes possuem um número mais elevado de componentes M do que descargas de retorno subsequentes, diferentemente dos relâmpagos descendentes, que se caracterizaram por apresentarem um maior número de descarga de retorno subsequente.

### 5.1.2 Região da Avenida Paulista

De Novembro de 2013 à Março de 2014 que se observou a região da Avenida Paulista, apenas 4 eventos de raios ascendentes foram registrados. O registro de um deles é mostrado na Figura 5.1. Este evento de raio ascendente envolveu 3 torres.



Figura 5.1 - Raios ascendentes saindo de três torres, simultaneamente, da Avenida Paulista-SP

Os registros obtidos na Avenida Paulista apresentaram pulsos componente M ou descarga de retorno subsequente. As redes BrasilDAT e RINDAT não detectaram esses relâmpagos e o sensor de campo elétrico também não forneceu uma forma de onda nítida para esses casos. Por esses motivos, esses dados foram excluídos na elaboração deste trabalho.

## **5.2 Validação do sistema de localização de relâmpagos**

### **5.2.1 Eficiência de Detecção**

Algumas descargas atmosféricas que ocorrem ao longo de uma tempestade não são detectadas pelo sistema de localização de relâmpagos. Como explicado no capítulo 3, os sensores captam pulsos eletromagnéticos conforme alguns parâmetros e enviam esses sinais para uma central de processamento que processará e analisará essas informações. Caso essa análise não tenha uma correlação que atenda critérios de qualidade pré-definidos, a localização desse relâmpago não será produzida e, portanto, não será detectado.

Geralmente, se a forma de onda do pulso não obedecer a determinadas regras de seleção (como, por exemplo, tempo de subida e largura de pulso pequenos), haverá grande probabilidade da descarga não ser detectada. Além disso, outros fatores podem impedir a detecção de um relâmpago e consequentemente reduzir a eficiência de detecção do sistema, como por exemplo: a distância da descarga até a rede de sensores, quantidade pequena de sensores que detectam os pulsos de radiação, distribuição geométrica dos sensores, entre outros. Mais detalhes sobre a eficiência de detecção ver em Cummins et al. (1995, 1998a, 1998b) e Naccarato (2006).

Devido os fatores que atrapalham a eficiência de detecção de descargas atmosféricas, espera-se que sejam detectados 40-60% dos pulsos pela rede BrasilDAT e 55% pela rede RINDAT (NACCARATO, 2012), como mostra a tabela 5.2

Tabela 5.2 - Eficiência de Detecção esperada das redes BrasilDAT e RINDAT

<b>Redes</b>	<b>Eficiência de Detecção</b>
<b>BrasilDAT</b>	40-60%
<b>RINDAT</b>	55%

Para os registros de relâmpagos ascendentes e descendentes buscou-se identificar a eficiência de detecção dessas redes a fim de descobrir a sua eficiência para a região do Pico do Jaraguá.

Como apresentado na tabela 5.1, foram 16 casos analisados de relâmpagos descendentes com local conhecido pois apenas esses casos apresentaram componente M e descarga de retorno subsequentes. Para cada processo físico procurou identificar a eficiência de detecção de cada rede, como pode-se ver na Tabela 5.3.

Para a rede BrasilDAT encontrou-se uma eficiência de detecção de 37% para componente M e 43% para as descargas de retorno subsequentes. Já para a rede RINDAT esse número apresentou-se inferior, chegando a 12% para componentes M e descargas de retorno subsequentes.

Tabela 5.3 - Eficiência de detecção para relâmpagos descendentes

<b>Relâmpago</b>	<b>Total</b>	<b>Rede</b>	<b>Eficiência de Detecção</b>
<b>Descendente</b>			
<b>Componente M</b>	8	BrasilDAT	<b>37% (3)</b>
		RINDAT	<b>12% (1)</b>
<b>Descarga de Retorno Subsequente</b>	32	BrasilDAT	<b>43% (13)</b>
		RINDAT	<b>12% (4)</b>

( ) \* número de pulsos detectados

A eficiência de detecção para os relâmpagos descendentes da rede BrasilDAT está dentro do esperado, conforme mostra na Tabela 4.2. Para a rede RINDAT, no entanto, ainda é preciso fazer uma avaliação um pouco mais detalhada pois não se esperava uma eficiência tão baixa quanto se encontrou. Acredita-se que possa ser um problema de configuração da central de processamento, requerendo assim o reprocessamento de todas as informações e uma reanálise. Para um melhor resultado é necessário também de um número maior de casos.

Já para os 29 relâmpagos ascendentes analisados, a Tabela 5.4 mostra que com um total de 94 processos físicos, obteve-se 43% de eficiência da rede BrasilDAT para componentes M e 56% para as descargas de retornos subsequentes. Novamente, a rede RINDAT obteve uma eficiência de 11% para componentes M e apenas 18% em descargas de retorno subsequentes, pelo mesmo motivo explicado anteriormente.

Tabela 5.4 - Eficiência de detecção para relâmpagos ascendentes

<b>Relâmpago Ascendente</b>	<b>Total</b>	<b>Rede</b>	<b>Eficiência de Detecção</b>
<b>Componente M</b>	77	BrasilDAT	<b>43% (33)</b>
		RINDAT	<b>11%(9)</b>
<b>Descarga de Retorno Subsequente</b>	17	BrasilDAT	<b>56%(9)</b>
		RINDAT	<b>18%(3)</b>

( ) \* número de pulsos detectados

Como, em geral, um sistema de localização de relâmpagos é projetado para detectar apenas descargas descendentes e intra-nuvem, o resultado encontrado pela rede BrasilDAT no que se refere a relâmpagos ascendentes é considerado muito satisfatório.

### 5.2.2 Erro de Localização dos Relâmpagos

Dos relâmpagos detectados pelas redes BrasilDAT e RINDAT foi calculado o erro de localização de acordo com respectivo processo físico: descarga de retorno subsequente e componente M dos relâmpagos ascendentes e descendentes. Dessa maneira, criou-se figuras que mostram onde as redes detectaram os pulsos e onde ele de fato ocorreu (representado por círculo vermelho).

Para os relâmpagos descendentes, a Figura 5.2 mostra os erros de localização da rede BrasilDAT para os pulsos de componente M (representado por quadrado azul) e as descargas de retorno subsequentes que tocaram o mesmo canal (representada por losangos laranja).

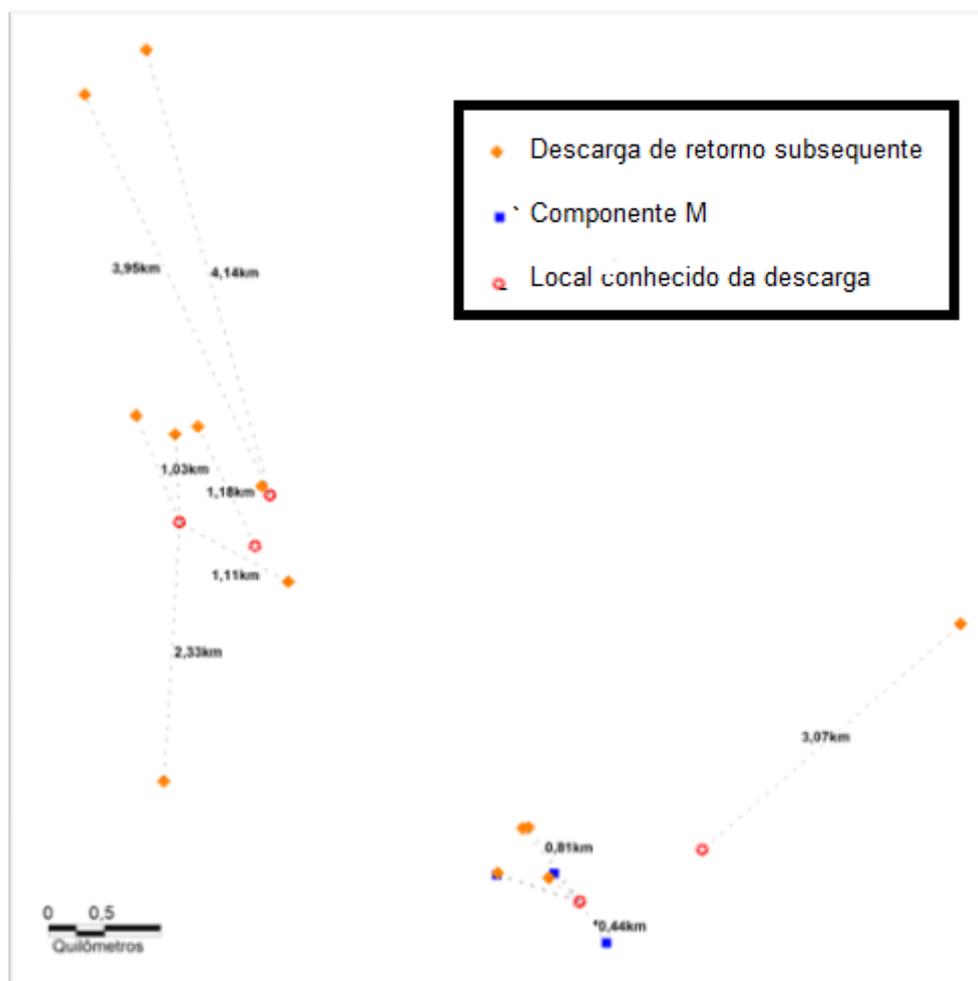


Figura 5.2 - Erros de localização de relâmpagos descendentes da rede BrasilDAT

A rede BrasilDAT detectou apenas 3 descargas caracterizadas como componente M, sendo o maior erro de localização de 0,81 km. Já para as descargas de retorno subsequente foram detectados 13 pulsos, sendo o maior erro de localização de 4,14 km.

A mesma representação foi feita para a rede RINDAT, apresentada na Figura 5.3.

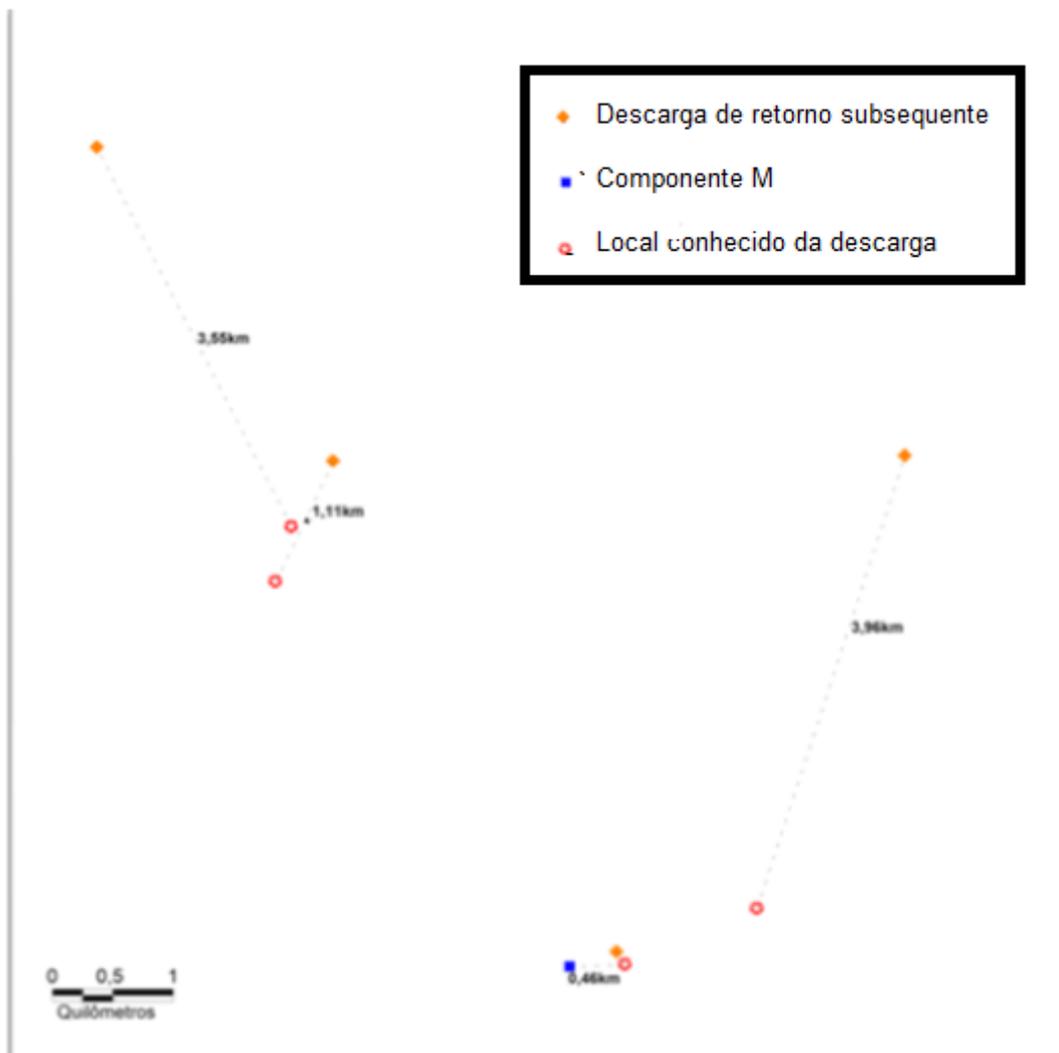


Figura 5.3 - Erros de localização de relâmpagos descendentes da rede RINDAT

Como a eficiência de detecção da rede RINDAT foi baixa, esperava-se que seriam encontrados poucos pontos para determinar o erro de localização. Para os relâmpagos descendentes, essa rede detectou apenas um pulso de componente M com 0,46 km de erro e 4 descargas de retorno subsequentes sendo 3,55 km o maior erro de localização. É sabido que há necessidade de se obter um maior número de casos para que possa validar essa informação.

Para os relâmpagos ascendentes obteve-se um maior número de pulsos a serem analisados. A rede BrasilDAT detectou 33 pulsos de componentes M e

10 descargas de retorno subsequentes, cujo maior erro de localização calculado foi de 2,11 e 1,58 km respectivamente, como pode se observar na figura 5.4

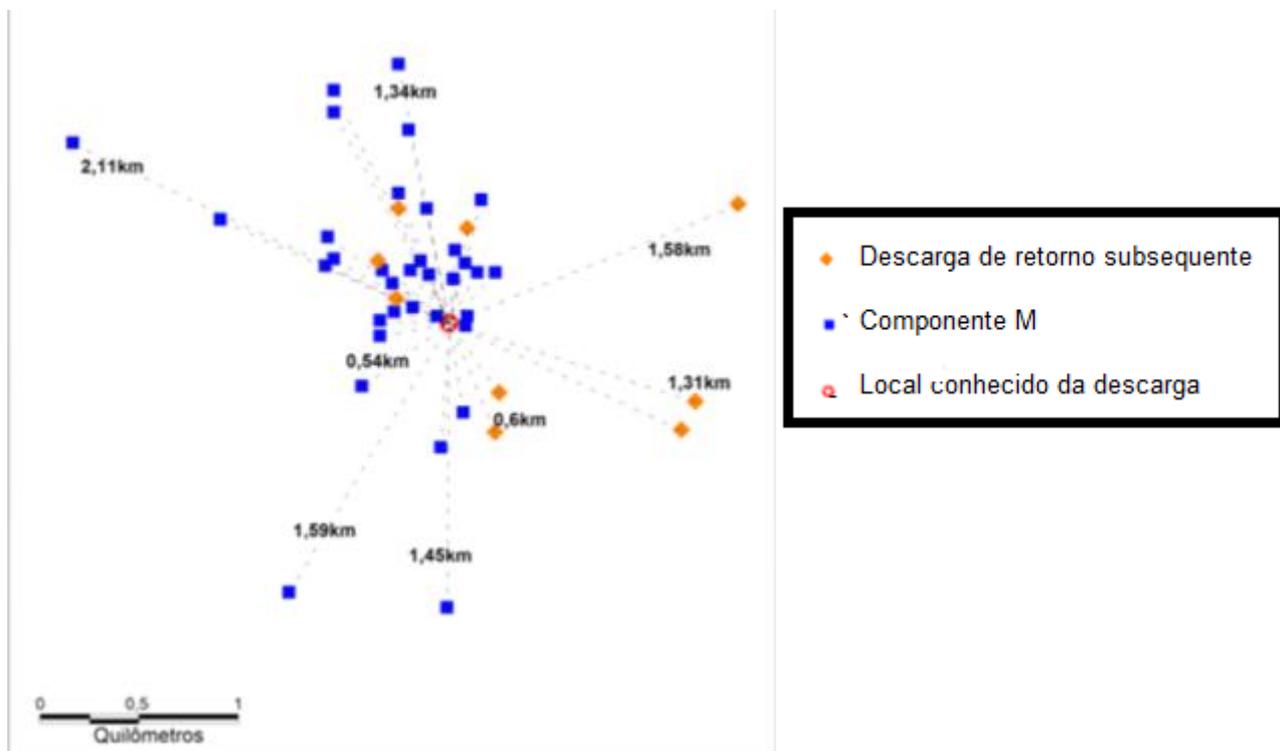


Figura 5.4 - Erros de localização de relâmpagos ascendentes para a rede BrasilDAT

Já a rede RINDAT detectou apenas 9 pulsos de componentes M e 3 descargas de retorno subsequentes, com erro de localização de 2,25 e 4,53 km respectivamente. A Figura 5.5 ilustra essas informações.

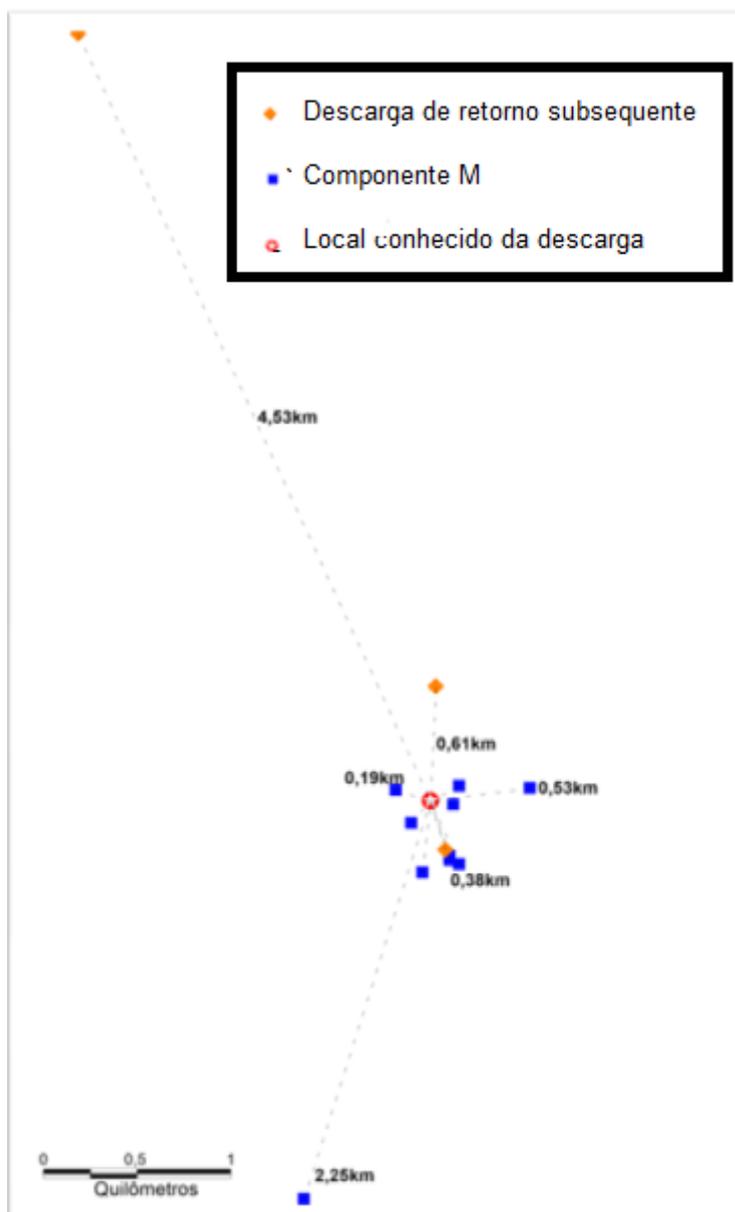


figura 5.5 - Erros de localização de relâmpagos ascendentes para a rede RINDAT

Como pode ser observado na Tabela 4.5, as médias dos erros de localização dos relâmpagos foi de até no máximo, 2 km aproximadamente.

Tabela 5.5 - Média dos erros de localização das redes BrasilDAT e RINDAT

Erro de Localização (km)	Componente M		Descarga de Retorno Subsequente	
	BrasilDAT	RINDAT	BrasilDAT	RINDAT
<b>Ascendente</b>	0,63 (33)	0,48 (9)	0,78 (10)	1,80 (3)
<b>Descendente</b>	1,57 (3)	0,45 (1)	0,52 (13)	2,18 (4)

\* ( ) número de casos detectados

Uma pesquisa semelhante feita na Flórida verificou que o erro de localização da rede ENTLN (Earth Networks Total Network Lightning, a mesma tecnologia da rede BrasilDAT) foi de aproximadamente 0,6 km (MALLICK et. al.,2014).

### 5.3 Relação entre Luminosidade e Campo Elétrico

#### 5.3.1 Descrição

A partir de medições em torres, Diendorfer et al. (2003) relatou que a luminosidade do canal é diretamente proporcional à corrente elétrica que o atravessa.

Como foi explicado anteriormente, descargas de retorno subsequentes são pulsos que percorrem o caminho realizado pela descarga anterior, quando não há corrente contínua. Já os pulsos de corrente contínua (ou componente M) são pulsos que geram intensificação da luminosidade do canal durante a corrente contínua, sendo em geral de intensidade menor que as descargas de retorno subsequentes.

As observações dos relâmpagos feitas pelas câmeras de alta resolução nos permite diferenciar estes dois pulsos pela luminosidade que os precedem.

Um estudo realizado por Saba et al. (2010) mostra as relações entre a luminosidade do canal que precede a ocorrência desses pulsos e as formas de onda do campo elétrico relacionado a esses eventos. Para determinar a luminosidade do canal foi utilizado um algoritmo computacional para encontrar o valor dos pixels das imagens obtidas pelas câmeras de alta velocidade. O valor máximo para a luminosidade do pixel era de 256 unidades. As análises deste estudo se basearam em um único relâmpago que obteve 8 pulsos. A relação entre a luminosidade e o tempo de subida do pico do campo elétrico é mostrada na Figura 5.6.

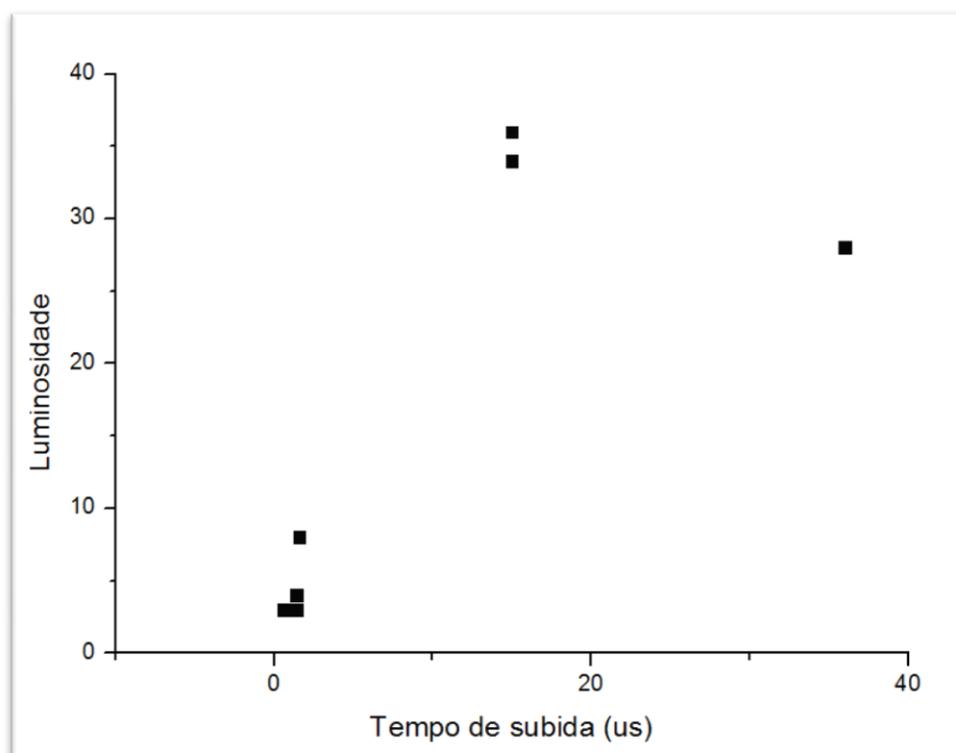


Figura 5.6 - Relação da Luminosidade e Campo elétrico para pulsos de um relâmpago.

Pode-se observar na figura que quando a luminosidade do canal é baixa (portanto, baixa corrente contínua), o tempo de subida também é baixo.

Saba et al., 2012 verificou que algumas componentes M podem produzir formas de onda semelhantes às descargas de retorno subsequentes, caso a

luminosidade anterior ao pulso seja fraca (e portanto, baixa corrente contínua). Diante disso, esses pulsos tenderiam a ser detectados pelos sistemas de detecção de relâmpagos.

### **5.3.2 Análises**

Como o trabalho realizado por Saba et al. (2010) se referiu a apenas um caso, estendeu-se as análises para todos os relâmpagos ascendentes e descendentes utilizados neste trabalho, com a finalidade de se distinguir os pulsos componente M e descarga de retorno subsequentes baseado no critério da luminosidade. Feito isso, buscou-se os possíveis motivos de alguns desses pulsos não terem sido detectados.

Para as análises do tempo de subida das formas de onda dos campos elétricos adotou-se o mesmo critério explicado na Figura 4.3. Já para a luminosidade, o valor máximo dos vídeos das câmeras de alta velocidade foi de 16.384 unidades (14 bits e não 8 bits como o trabalho desenvolvido por Saba et al. em 2010).

A Figura 5.7 mostra os resultados encontrados para os relâmpagos ascendentes (pontos em vermelho) e descendentes (pontos em preto).

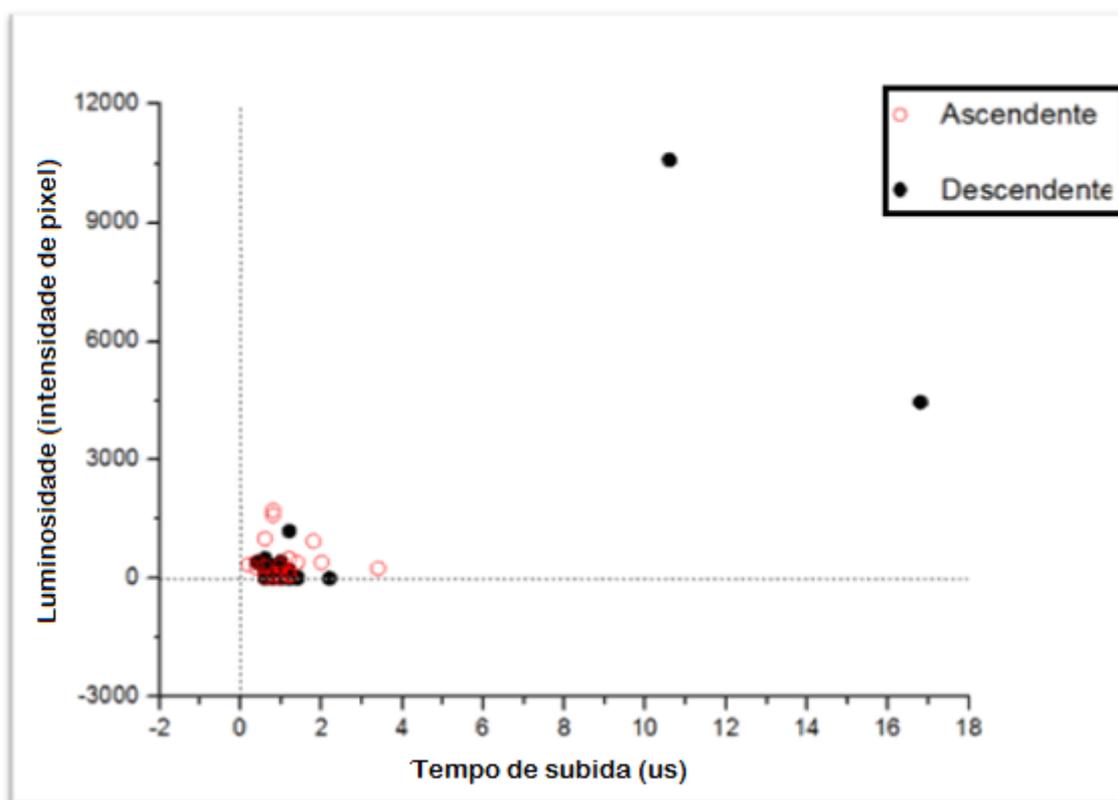


Figura 5.7 - Relação da Luminosidade e Tempo de subida dos campos elétricos dos relâmpagos ascendentes e descendentes

Na Figura 5.7 destacam-se vários casos com tempo de subida e luminosidade baixa. Apenas dois casos de componente M dos relâmpagos descendentes apresentaram tempo de subida e luminosidade elevados, não sendo detectados pelas redes de detecção de descargas atmosféricas.

Todos os pulsos (componentes M e descargas de retorno subsequentes) dos relâmpagos ascendentes apresentaram tempo de subida curto e baixa luminosidade do canal. Assim, os pulsos de componente M dos raios ascendentes são muito parecidos com os pulsos das descargas de retorno subsequentes. O fato de as componentes M serem abundantes ao longo da corrente contínua inicial dos raios ascendentes e dos valores de tempo de subida destes serem baixos, explica o porque desses relâmpagos ascendentes serem detectados pelas redes.

Para entender por que as componentes M dos raios ascendentes apresentam tempo de subida pequeno (ao contrário das componentes M dos raios descendentes) verificamos qual costuma ser a intensidade das correntes contínuas iniciais dos raios ascendentes e das correntes contínuas dos raios descendentes.

Berger (1978) observou através de medidas direta de correntes de raios ascendentes na Suíça que a carga média transferida durante as corrente contínua inicial (CCI) é de 12 coulombs e que a duração média das CCI é de 163 ms. Assim a corrente média das CCI é de 70 A. Ferraz (2009) através de medidas de campo elétrico de raios descendentes, observou que a corrente média das correntes contínuas é de 328 A (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Média das correntes contínuas ascendentes e descendentes

<b>Média das Correntes Contínuas</b>	<b>Tipo de Relâmpago</b>	<b>Média (A)</b>
<b>Berger (1978)</b>	Ascendente	70
<b>Ferraz (2009)</b>	Descendente	328

Como vemos, a intensidade média das correntes contínuas para relâmpagos descendentes é aproximadamente 4 vezes superior à intensidade das CCI nos relâmpagos ascendentes. Assim, como o tempo de subida de um pulso é tanto menor quanto mais baixa for a intensidade da corrente que precede o pulso, as componentes M dos ascendentes possuem tempo de subida baixo, se assemelhando às descargas de retorno subsequentes e portanto sendo igualmente detectadas.

Já no caso dos relâmpagos descendentes, as componentes M ocorrem durante a corrente contínua cuja intensidade é mais alta. Assim, os tempos de subida são maiores e elas são raramente detectadas pelas redes.

#### 5.4 Pico de corrente dos relâmpagos ascendentes e descendentes

Para que os relâmpagos sejam detectados, os seus pulsos de corrente devem ser suficientemente intensos para que possam ser detectados por um número mínimo de sensores que compõem a rede de detecção a fim de que todos os critérios de qualidade sejam satisfeitos.

Fizemos uma análise da intensidade destes pulsos para raios ascendentes e descendentes através dos valores medidos pela rede e pelo campo eléctrico como explicado na seção 4.3.

Para obtermos a intensidade de corrente necessitamos de pulsos que tivessem sido detectados e para os pulsos não detectados, que houvesse ao menos o campo eléctrico medido. A tabela 5.7 apresenta o número de picos de corrente obtidos.

Tabela 5.7 - Quantidade de picos de corrente analisados

<b>Casos Analisados</b>	<b>Total</b>	<b>Componente M</b>	<b>Descarga de Retorno Subsequente</b>
<b>Relâmpago Ascendente</b>	44	35	9
<b>Relâmpago Descendente</b>	28	5	23

## Ascendentes

Para os relâmpagos ascendentes, os picos de corrente para as componentes M variaram entre -5 e -55 kA; já as descargas de retorno subsequentes tiveram picos entre -10 e -30 kA. A Figura 5.8 mostra o histograma desses valores.

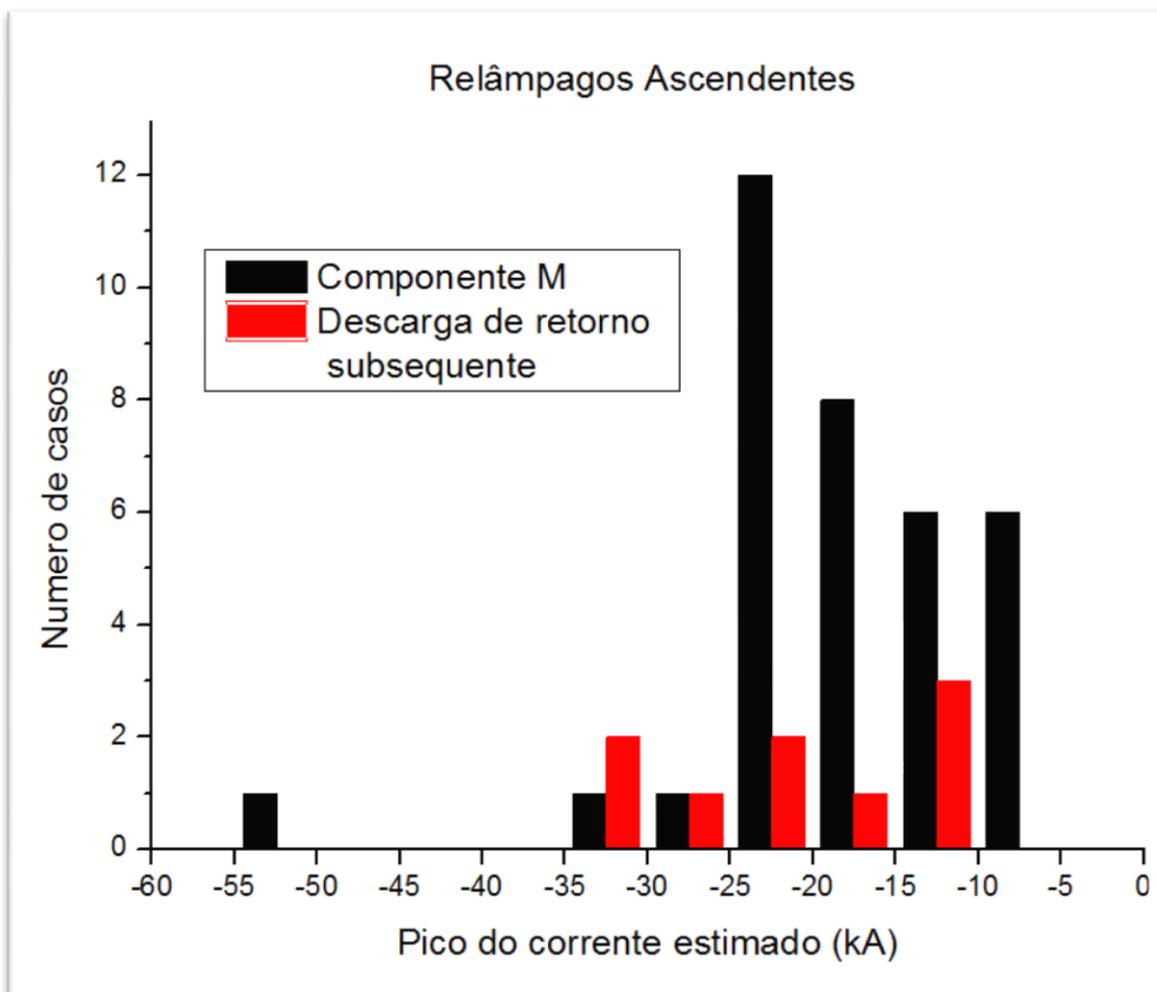


Figura 5.8 - Picos de Corrente estimado para relâmpagos ascendentes

Um trabalho semelhante foi feito por Diendorfer et al. (2009) e analisou os picos de corrente dos pulsos de componente M e descargas de retorno subsequentes de 457 relâmpagos que partiram de uma torre na Áustria. Os dados coletados compreendeu o período de 2000 a 2007.

Os resultados deste trabalho mostram que a mediana do pico de corrente encontrada para 728 registros de pulsos componente M foi de 4,2 kA, sendo que o valor máximo encontrado foi de 22 kA.

No estudo da região do Pico do Jaraguá encontrou-se, para um número total de 35 casos de componente M, uma mediana de 18,8 kA.

Para os casos de descarga de retorno subsequente de relâmpagos ascendentes, Diendorfer et al. (2009) calcularam a mediana dos 615 pulsos obtidos obtendo o valor de 9,2 kA.

No estudo aqui apresentado obteve-se uma mediana de 23 kA para 9 pulsos de descarga de retorno subsequente.

### **Descendentes**

Os relâmpagos descendentes analisados possuem valores de -10 até -60 kA para descargas de retorno subsequente e -10 até -30 kA para pulsos componente M. A figura 5.9 ilustra esses valores.

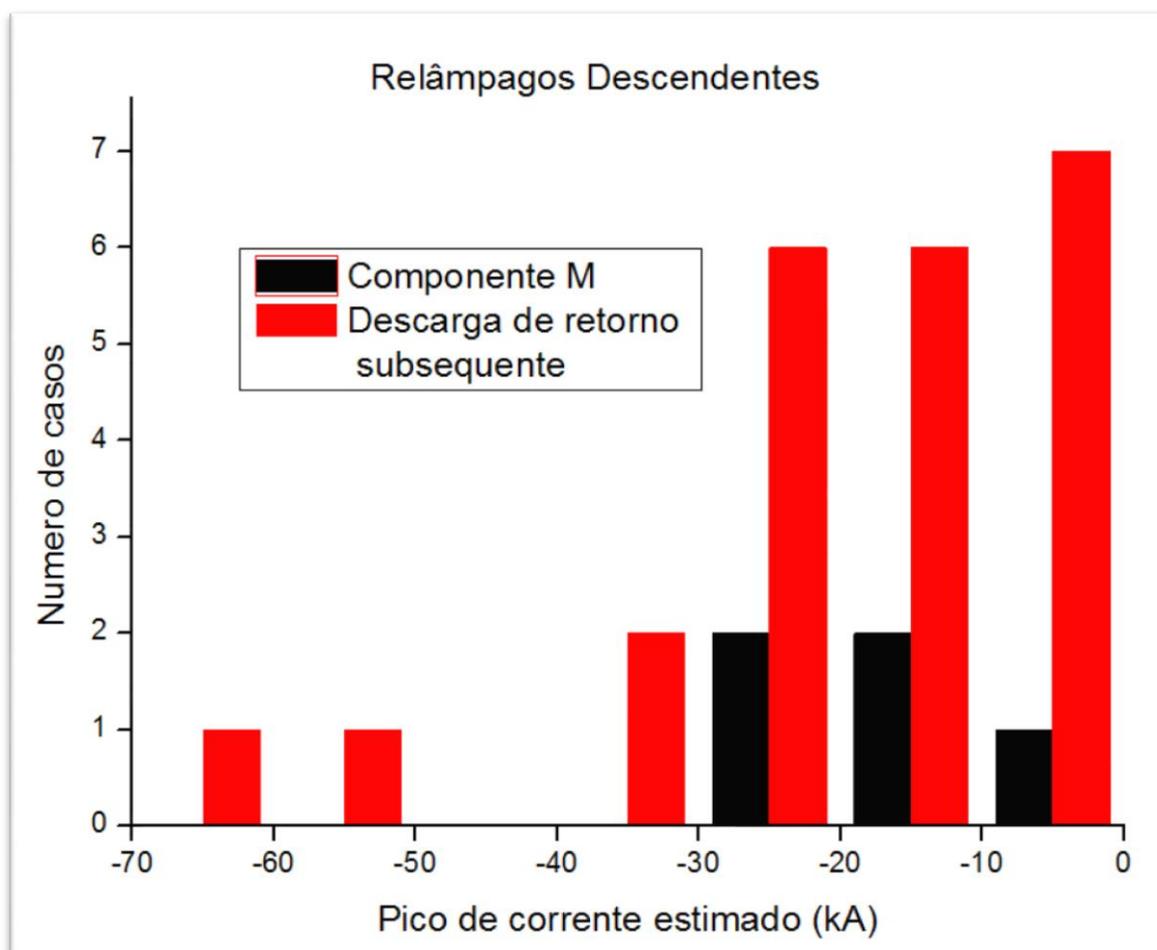


Figura 5.9 - Picos de Corrente estimado para relâmpagos descendentes

A tabela 5.8 resume estes dados e a Figura 5.10 ilustra em um só histograma todos os casos analisados.

Tabela 5.8 - Resumo dos dados

Picos de Corrente		Pico de corrente encontrado			Diendorfer		
		Número	Min-Max	Média	Número	Média	Máximo
Asc	Componente M	35	5 -55	<b>18,8</b>	728	<b>4,2</b>	22
	Descarga de retorno subsequente	9	10-30	<b>23</b>	615	<b>9,2</b>	40
Des	Componente M	5	10-30	<b>13</b>	-	-	-
	Descarga de retorno subsequente	23	10-60	<b>37</b>	-	-	-

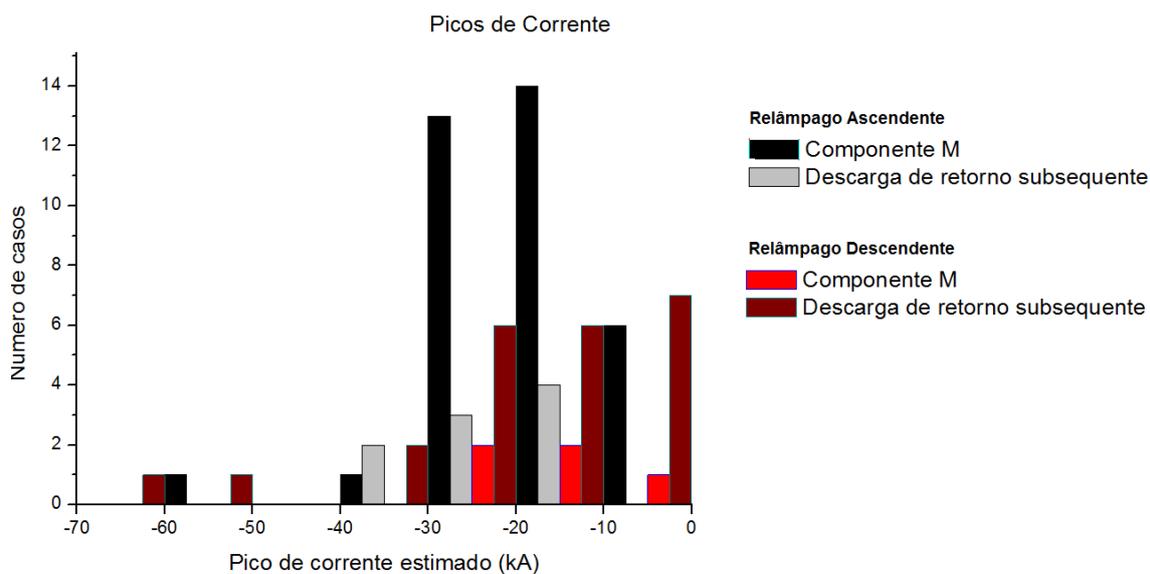


Figura 5.10 - Picos de Corrente dos relâmpagos ascendentes e descendentes

Portanto, com relação à intensidade de pulsos em raios ascendentes e descendentes, temos que:

- a intensidade dos picos de componentes M e descargas de retorno para os relâmpagos ascendentes registrados na região do Pico do Jaraguá são semelhantes

- a intensidade dos picos de componentes M e descargas de retorno para os raios ascendentes deste estudo são bem mais altas que os valores de pico encontrados por Diendorfer et al ( 2009).

Dessa forma, os pulsos detectados no estudo do Pico do Jaraguá são mais intensos que dos encontrados por Diendorfer et al (2009). É importante destacar que, para os casos em que os pulsos eram fracos, a possibilidade de que nenhum deles fosse detectado por ambas as redes (BrasilDAT ou RINDAT) era alto. Isso não aconteceu com os dados de Diendorfer et al. (2009), pois os valores de picos de corrente eram medidos diretamente na própria torre. Por isso, é bastante provável que a rede BrasilDAT tenha detectado apenas os pulsos mais fortes, fazendo com que os valores medianos fossem maiores que na Áustria.

### **5.5 Relâmpago ascendente inédito**

Ao fazer a análise dos picos de corrente, deparou-se com um único pico de corrente positivo de um relâmpago ascendente, o qual foi detectado pela rede BrasilDAT. Esse pico de corrente por ser positivo não foi incluso nas análises anteriores e será discutido nesta seção.

Na maioria dos casos, a iniciação do relâmpago ascendente se dá com um líder ascendente positivo que parte da torre em direção à nuvem de tempestade. Após um tempo de propagação do líder, algumas descargas de menores intensidades, denominadas por líderes de recuo, começam a surgir percorrendo uma direção contrária à sua propagação. Estes líderes de recuo

possuem cargas negativas e só ocorrem em canais positivos. A Figura 5.11 mostra exemplos de alguns líderes de recuo.

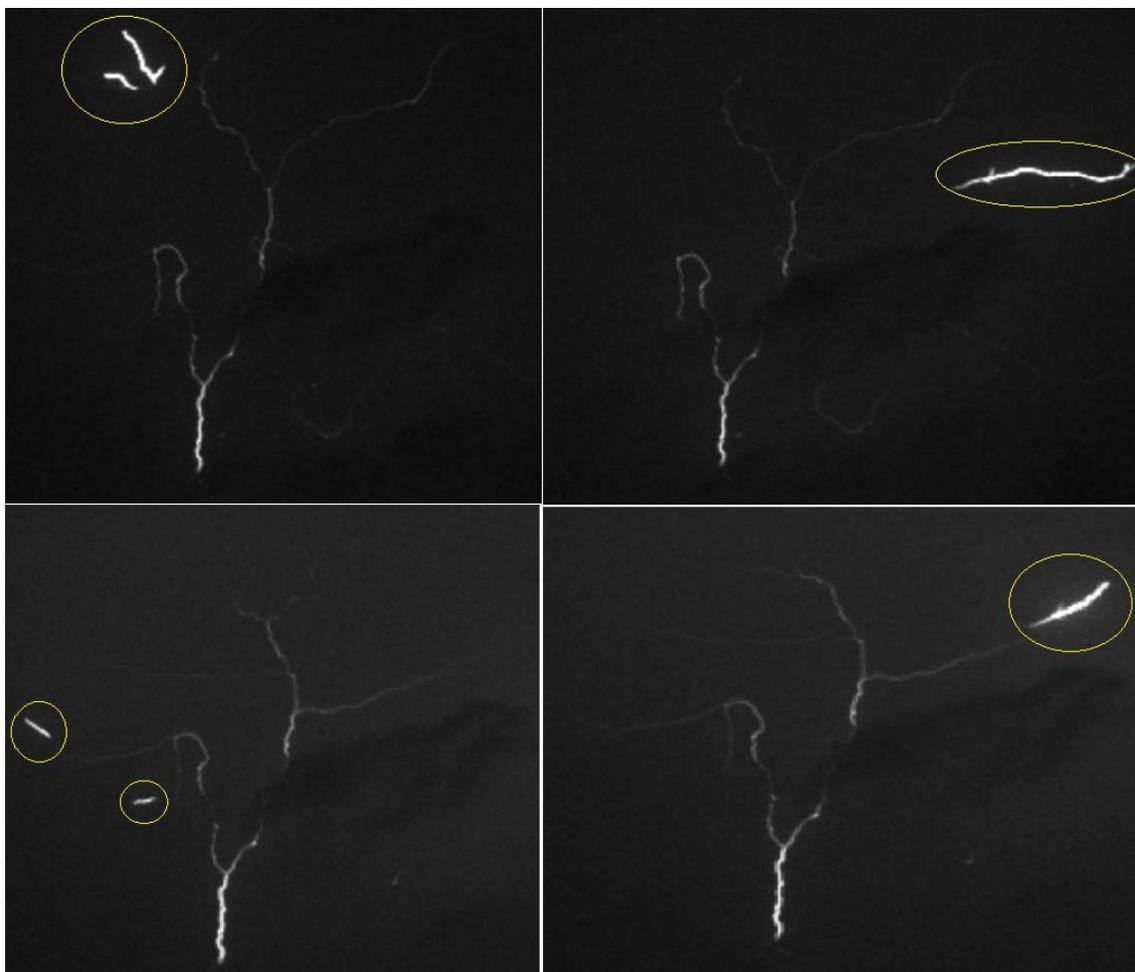


Figura 5.11 - Exemplos de líderes de recuo em um relâmpago ascendente

Quando os líderes de recuo descem pelo canal, causam um aumento de corrente conhecido como componente M, detalhado no capítulo 2.

Em janeiro de 2014 observamos um líder positivo ascendente (Figura 5.12a). Esse líder se ramifica e perde intensidade ficando invisível (Figura 5.12b). A partir da ponta da ramificação inferior, um líder de recuo negativo (Figura 5.12c) sobe e se conecta com um líder descendente positivo (Figura 5.12 d,e) ocorrendo a descarga de retorno subsequente positiva que atinge a torre

através do mesmo caminho percorrido anteriormente pelo líder ascendente positivo (Figura 5.12f).

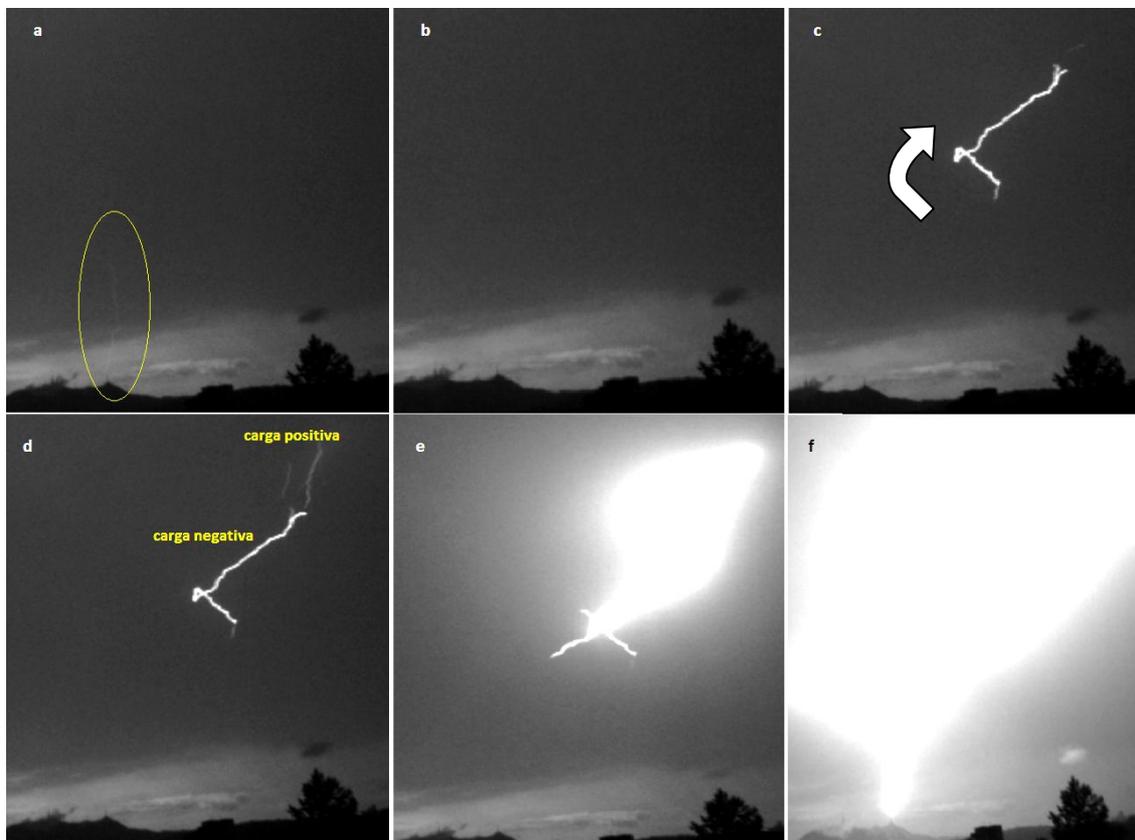


Figura 5.12 - Sequência de imagens de um relâmpago ascendente positivo

Essa foi a primeira vez que se registrou um líder ascendente positivo com uma descarga de retorno também positivo em um raio ascendente. Todos os registros de relâmpagos ascendentes tiveram um líder ascendente positivos seguido de uma descarga de retorno negativa.

O campo elétrico da descarga ilustrado na Figura 5.13 mostra que realmente a descarga de retorno teve polaridade positiva.

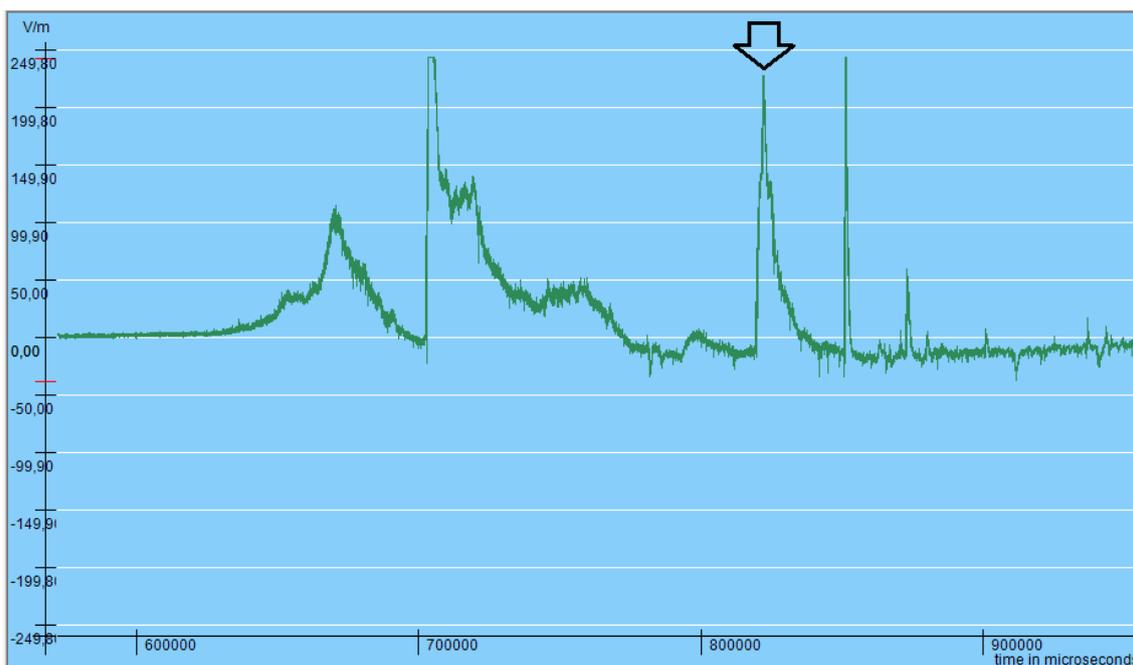


Figura 5.13 - Campo elétrico do relâmpago ascendente positivo

A descarga de retorno subsequente deste caso foi detectada pela rede BrasilDAT e sua intensidade estimada foi de 24 kA (valor positivo).

É preciso continuar os estudos para esse caso inédito a fim de se entender o processo físico que o resultou. Uma vez que espera-se que os pulsos de corrente tenham valores negativos conforme explicado anteriormente.

## 6 CONCLUSÕES

Os dados utilizados neste trabalho correspondem no período desde 2012 até 2015, sendo que foram analisados 29 relâmpagos ascendentes e 16 relâmpagos descendentes em locais conhecidos. Este trabalho foi motivado pela alta densidade de descargas encontrada em uma região no mapa da cidade de São Paulo.

O principal objetivo era descobrir se os pulsos dos relâmpagos ascendentes eram detectados pelas redes de localização de descargas atmosféricas BrasilDAT e RINDAT e, em caso negativo, entender as razões.

Através das análises de vídeo de câmera de alta resolução e medidas de campo elétrico, a primeira constatação que se obteve foi que os relâmpagos ascendentes possuem mais componentes M do que descargas de retorno subsequente, enquanto relâmpagos descendentes possuem mais descargas de retorno subsequentes do que componentes M.

Comparando os dados das redes de detecção de relâmpagos BrasilDAT e RINDAT, elas demonstraram eficiência de detecção similar para relâmpagos ascendentes e descendentes. apesar de apresentarem eficiência de detecção distinta entre si.

Para essas redes, analisou-se a eficiência de detecção e o erro de localização de todos os pulsos. Para os relâmpagos ascendentes, a rede BrasilDAT obteve uma eficiência de 43% para pulsos de componente M e 56% para descargas de retorno subsequentes. Já para os relâmpagos descendentes, obteve-se 37% (apenas 3 casos detectados) de detecção em componente M e 43% em descargas de retorno subsequente. O esperado para pulsos nuvem-solo é de 40-60%, o que foi considerável satisfatório. O erro de localização para esses relâmpagos ascendentes e descendentes ficou em torno de 0,6 km de média.

Considerou-se a rede BrasilDAT eficiente para os dois tipos de relâmpagos analisados.

Para a rede RINDAT encontrou-se uma eficiência de detecção de 11% para pulsos de componente M (9 casos detectados) e 18% de descargas de retorno subsequente (3 casos detectados) em relâmpagos ascendentes. Em relâmpagos descendentes, a eficiência de detecção encontrada foi de 12% para componente M e 12% para descarga de retorno subsequente. Para essa rede. A eficiência de detecção esperada para essa rede é de 55%. Não se esperava encontrar uma eficiência tão baixa quanto essa, acredita-se que possa ter acontecido um problema na central de processamento e uma nova análise precisa ser realizada para estes casos. Também é necessário um maior número de casos a serem analisados. Evidentemente, sendo a eficiência de detecção para a rede RINDAT baixa, encontrou-se um erro de localização elevado, chegando a aproximadamente 1,5 km. Sendo assim, a rede RINDAT foi excluída das análises posteriores.

Analisado a validação das redes de detecção dos relâmpagos ascendentes, o próximo passo do trabalho buscou entender os principais motivos de alguns pulsos não terem sido detectados pelas redes de detecção BrasilDAT.

Quando a luminosidade que precede um pulso é mais baixa, o tempo de subida tenderá a ser menor e a amplitude do pico maior. Por outro lado as redes de detecção tendem a descartar pulsos com tempo de subida longo e a não detectar pulsos de baixa intensidade.

Como foi constatado, em relâmpagos ascendentes há menor chance de existir algum pulso sobreposto a uma luminosidade alta. Em geral, o que se observou foi que as componentes M dos relâmpagos ascendentes ocorrem superpostas a canais com pouca luminosidade e são semelhantes às descargas de retorno subsequente dos relâmpagos descendentes e como dito antes, igualmente detectados.

Observou-se que as componentes M dos relâmpagos ascendentes e dos descendentes são muito distintas. Todas as componentes M dos relâmpagos ascendentes possuem tempo de subida curto. Já as componentes M dos raios descendentes costumam acontecer sobrepostas a correntes contínuas de intensidade maior e assim possuir tempo de subida mais longo, tornando difícil sua detecção, como foi observado nos 2 casos da Figura 5.7.

As razões para estas diferenças se devem provavelmente porque as componentes M nos relâmpagos descendentes ocorrem sobrepostas a uma CC que flui através de um canal bem estabelecido (após a descarga de retorno). Já nos casos dos relâmpagos ascendentes, primeiro há uma corrente contínua inicial que se inicia com a propagação do líder ascendente. Nesta fase, o canal ainda está em processo de formação e os pulsos componente M podem ocorrer quando esta corrente ainda é pequena. De fato, a literatura apresenta valores médios de CCI quatro vezes menor do que os valores médios de corrente contínua para os relâmpagos descendentes.

Para os pulsos detectados pela BrasilDAT correlacionou-se o pico de corrente fornecido com o pico do campo elétrico medido, estimando-se a média dos picos de corrente para os pulsos dos relâmpagos ascendentes e descendentes. Concluiu-se que: a intensidade dos picos de componentes M e descargas de retorno para os relâmpagos ascendentes são semelhantes; a intensidade dos picos de componentes M e descargas de retorno para os raios ascendentes são bem mais altas que os picos encontrados por Diendorfer et al (2009). Isso porque as medidas de pico de corrente realizadas na Áustria foram feitas diretamente na torre, enquanto que para o Pico do Jaraguá (Brasil), essas medidas foram inferidas a partir de uma rede de detecção, cuja eficiência é baixa para pulsos muito fracos, detectando apenas os mais intensos e, assim, aumentando a média da intensidade.

Quando um líder descendente abre um novo canal, há muita carga acumulada em sua ponta. Por isso o pico de corrente é mais elevado (logo o campo elétrico também). Os pulsos sobre uma corrente contínua são menores, pois o caminho já está ionizado, ou seja, não há necessidade de muita carga para atingir o solo novamente, a não ser que ele percorra outro caminho diferente da descarga anterior. (RAKOV, et al.. 2001)

Uma possível explicação para uma corrente contínua (dos relâmpagos descendentes) maior do que a corrente contínua inicial (dos relâmpagos ascendentes) deve-se ao fato de que a corrente contínua quando ocorre já possui o canal completamente estabelecido pela descarga de retorno que a antecede, enquanto que a corrente contínua inicial acontece durante a formação do canal no relâmpago ascendente. Como essa corrente contínua inicial é mais fraca, os pulsos que nela ocorrem são mais intensos.

Ainda, uma descarga de retorno subsequente com polaridade positiva foi detectada pela primeira vez após a ocorrência de um líder ascendente também positivo. Ainda é preciso estudar melhor este caso para se entender quais processos físicos levaram a acontecer este relâmpago.

Como sugestão para trabalhos futuros indicamos um estudo que comparasse o valor estimado do pico de corrente das descargas de retorno pelas redes de detecção com valores de correntes medidos diretamente no ponto de impacto. Este estudo proporcionaria uma excelente ocasião para calibração das redes de detecção de descargas atmosféricas e seria também uma contribuição importante à estatística de parâmetros de descargas de retorno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R. I. ; SILVA DIAS, M. A. F. Características microfísicas da precipitação convectiva e estratiforme associadas à oscilação de larga-escala no sudoeste da Amazônia. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA., 2004, Fortaleza -CE. **Anais ... 2004**. CD-ROM. (INPE-12036-PRE/7382).

BALLAROTTI, M.G.; SABA, M.M.F; PINTO JR. O. High speed camera observations of negative ground flashes on a milisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F., PINTO JR., O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmospheric Research**, v. 84, n. 4, p. 302-310. 2007.

CARN, S. A. **Atmospheric observations and meteorology**. 2009. Michigan, EUA. Michigan Technological University, Department of Geological Engineering and Sciences at Michigan Tech. Disponível em: <<http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE2640.htm>>. Acesso em: 27 de junho de 2014.

CHRISTIAN, H.J.; BLAKESLEE, R.J.; GOODMAN, S.J. The detection of lightning from geostationary orbit. **J. Geophys. Res**, v94, n 13, p 329–37, 1989.

CIGRE. **Cloud-to-ground lightning parameters derived from lightning location systems: the effects of system performance**. Task Force C4.404A, 2009.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and cloud dynamics**. Academic Press., 1989. 833 p.

CUMMINS, K. L.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L., PYLE, R. B.; PIFER, A. E. NLDN'95: A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. In: International Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static Electricity, 1995, Williamsburg, EUA. **Proceedings...** National Interagency Coordination Group, 1995, p. 72-1 to 72-15. (U.S. Navy Report NAWCADPAX--306-PR

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

CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; MALONE, M. D. The U.S. National Lightning Detection Network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.40, n.4, part 2, p. 465-480, Nov. 1998 (b).

CUMMINS K. L.; MURPHY M. J. Technical information nowcast solution LINET systems nowcast - an overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 5, n 3, p. 499, 2009.

DIENDORFER, G.; VIEHBERGER, M.; MAIR, M.; SCHULZ, W. An attempt to determine currents in lightning channels branches from optical data of a high speed video system. In: INT. CONF. ON LIGHTNING AND STATIC ELECTRICITY, 2003, BLACKPOOL, UNITED KINGDOM. **Proceedings...** Royal Aeronautical Society, 2003.

DIENDORFER, G.; PICHLER, H; MAIR, M. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg tower (2000-2007). **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. v 51, n 3, 2009.

DOWDEN, R.L.; RUNDELL J.; RODGER C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v 64 n 7, p 817-830, 2002

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, 2001.

FERRO M. A. S.; YAMASAKI J.; PIMENTEL D. R. M.; NACCARATO K. P., M. SABA M. F. An electric field-mill network in Southeastern Brazil for lightning warnings. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 14., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** 2012.

GAI (Global Atmospheric). **IMPACT ES advanced lightning direction finder** – Model 141-TES ALDF: installation, operation and maintenance manual. Tucson, 1999. 386p. (40211REV 9904).

HOUZE JR., R. A.; RUTLEDGE, S. A.; BIGGERSTAFF, M. I.; SMULL, B. F. Interpretation of Doppler weather-radar displays in midlatitude Mesoscale Convective Systems. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 70, p. 608-619, 1989.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1980. 212p.

KRIDER, E. P. 75 years of research on the physics of a lightning discharge. In: Fleming, J. R. (ed). **Historical essays on meteorology 1919-1995**. Boston: American Meteorological Society, 1996. Cap. 11, p. 321-350.

KRIDER E. P. **Atmospheric electricity lecture notes**. University of Arizona, Atmo 589 Online, Apr. 18, 2014

LE VINE, D.M. Review of measurements of the RF spectrum of radiation from lightning. **Meteorol. Atmos. Phys**, v 37, p. 195 – 204, 1987.

LIMA, K. C. **Descargas elétricas atmosféricas em sistemas convectivos de mesoescala no sul da América do Sul**. 2005. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

MALAN, D.J. **Physics of lightning**. London: The English Universities Press, 1963.

MALLICK, S.; RAKOV, V.A.; NGIN, T.; GAMEROTA, W.R.; PILKEY, J.T.; HILL, J.D.; UMAN, M.A.; JORDAN, D.M.; HECKMAN, S.; SLOOP, C.D.; LIU, C. An Update on Testing the Performance Characteristics of the ENTLN. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 15., 2014, Norman, Oklahoma. **Proceeding...** Norman, Oklahoma, U.S.A.: JUGG/IAMAS, 2014.

MAZUR, V; E RUHNKE, L. H. Physical processes during development of upward leaders from tall structures. **J. Electrostatics**, v 69, p. 97-110.

MEYER, G. Ein Versuch, das Spectrum des Blitzes zu photographieren. **Ann. Physik Chem**, v 61, p. 415- 416, 1894.

MCEACHRON, K. B. Lightning to the Empire State Building. **J. Franklin Inst.**, v.227, p. 149–217, 1939.

McGraw-Hill. **Encyclopedia of science and technology**. McGraw Hill, p. 74, 1997.

MIKI, M.; SHINDO, T.; RAKOV, V.A.; UMAN, M.A.; DIENDORFER, G.; MAIR, M.; HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; THOTTAPPILLIL, R. Characterization of current pulses superimposed on the continuous current in upward lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning. In: INTERNATION

CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 28., 2006, Kanazawa,  
**Proceedings...** Kanazawa: ICLP Centre, 2006..

MOREAU, J.; ALLIOT, J; MAZUR, V. Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. **J Geophys Res.**, 1992, doi: 10.1029/92JD01077. issn: 0148-0227 Moreau et al. [11] pioneered the use of high-speed video to observe lightning at 200 images per second

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**. 2001. 165p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001

NACCARATO K, P. **Análise das Características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2006. 316p. (INPE-14083-TDI/1069 ). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). INPE, São José dos Campos, 2006.

NACCARATO, K,P.; SARAIVA, A.C.V.; SABA, M. M.F.; SCHUMANN, C. First performance analysis of BrasilDAT total lightning network In southeastern Brazil. In: GROUND 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 2012, Bonito - MS. **Proceedings...** Bonito, 2012

NAG, A; MURPH, M. J.; SCHULZ, W.; CUMMINS. K. Lightning Locating Systems: Characteristics and Validation Techniques. In ICLP 2014 INTERNACIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2014. Shangai, China. **Proceedings...** Shangai, 2014

ORVILLE, R. E. An east coast lightning detection network. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 64, n. 9, p. 1029-1037, 1983.

ORVILLE, R. E. Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n.D9, p. 17135-17142, Sept. 1991.

ORVILLE, R. E.; SILVER, A. C. Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992 to 1995. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 4, p. 631- 638, 1997.

ORVILLE, R. E. ; HUFFINES, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995 to 1997. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 11, p. 2693-2703, 1999.

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989–98. **American Meteorological Society**. v. 129, p. 1179-1193, 2001.

PAIVA, A. R.; SABA, M. M. F. ; NACCARATO, K. P. ; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; JAQUES, R. Detection of upward lightning from towers in São Paulo, Brazil by lightning location systems. In: GROUND 2014. & 6th LPE., 2014, Manaus. **Proceedings...** 2014. DVD.

PINTO JR., O.; GIN, R. B. B.; PINTO, I. R. C. A.; MENDES JR., O.; DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M. Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the southeastern Brazil for the 1992-93 summer season. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n.D23, p. 29627-29635, Dec. 1996.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR., O.; DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M.; FILHO, A. C.; CHERCHIGLIA L. C. L.; AMORIM, G. E. A long-term study of the lightning flash characteristics in the southeastern Brazil: 2. Peak current and multiplicity. In: International Lightning Detection Conference, 16., 2000, Tucson, EUA. **Proceedings...** Tucson: Global Atmospheric, 2000.

PINTO J. O. **Relâmpagos**. 2. Ed . São Paulo, 2008.

RAKOV, V.; CRAWFORD, D.E.; RAMBO, K. J.; SCHNETZER, G. H.; UMAN, M.A. M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges. In: **Journal of geophysical research**. Vol 106. DOI: 10.1029/2000JD000243, 2001.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning** : physics and effects. Cambridge: Cambridge University Press. 2003. 850p

RINDAT. **Rede integrada nacional de detecção de descargas atmosféricas**. 2015. Disponível em: <http://simepar.br/rindat/internas/institucional.shtml>

SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A.; PISSOLATO, F. J.; EYBERT-BERNARD, A.; LEFORT, A.; POTVIN, C.; HEINE, L. F.; CHAUZY, S. An International Center for Triggered and Natural Lightning Research in Brazil. In: INTERNACIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 40. GAI, 2705 East Medina Road, Tucson, Arizona 85706-7155. **Proceedings...** 2000.

SABA, M. M. F.; NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; CABRAL, G. F. Imaging atmospheric discharges with high-speed cameras. In: Simpósio Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 7., 2003, Curitiba, Brasil. **Proceedings...** São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia (USP), 2003. p. 14-16.

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E., High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **J. Geophys. Res.**, 115, doi:10.1029/2010JD014330, 2010.

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

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **J. Geophys. Res.**, 115, doi:10.1029/2010JD014330, 2010.

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; CAMPOS, L. Z. S. M-components or cloud-to-ground subsequent strokes?. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 21., 2010, Orlando. **Proceedings...** Orlando; LDC/ILMC - Lightning's Impact on Society, 2010. v. 1.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; ALVES, J.; CAMPOS, D. R.; WARNER, T. A.; ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A. Upward lightning in Brazil First results. In: GROUND 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 2012, Bonito - MS. **Proceedings...** Bonito, 2012.

SABA, M. M. F.; ALVES, J.; SCHUMANN, C.; CAMPOS, D. R.; WARNER, T. A. Upward lightning in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE LIGHTNING DETECTION, 22., 2012, Broomfield. **Proceedings...** 2012. DVD.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; ALVES, J.; Campos, D. R.; Warner, T. A.; ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A. Upward lightning in Brazil First results. In: GROUND 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 5, 2012, Bonito - MS. **Proceedings...** Bonito, 2012b.

SALANAVE, L. Lightning and its spectrum. 1980 Ogawa, T. Lightning currents. In: Volland, H. (ed.). **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 4, p. 93-136.

SARAIVA, A. C. V. **Estudo de 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 24 jan 2015.

SOLORZANO, N. N. **Primeiras medidas de relâmpagos induzidos no Brasil**. 2003. 219p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (Não publicado).

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. **J. Geophys. Res.**, v. 110, 2005. D09101, doi:10.1029/2004JD005332.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; MEDEIROS, C. First measurements of continuing current intensity in positive ground flashes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 4., 2010, Salvador. **Proceedings...** Salvador, 2010.

SCHUMANN, C. **Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico**. 2001. 98 p. (INPE-04.23.13.25-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – INPE, São José dos Campos, 2012.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; ALVES, J.; WARNER, T. A.; ALBRECHT, R. I.; BIE, L.L. Upward lightning in Brazil. In: **AGU Fall Meeting 2012**, 2012, San Francisco. AGU Fall Meeting 2012, 2012 a

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; ALVES, J.; ALBRECHT, R. I.; HELSDON JUNIOR, J. Why some positive cloud-to-ground flashes trigger upward lightning and why some do not?. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY ANNUAL MEETING, 93. 2013, Austin. **Proceedings...**Austin, TX: ams, 2013.

SCHUMANN, C.; SABA, MARCELO M.F.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R.; WARNER, T. A.; HELSDON JUNIOR, J. Triggered upward flashes: analysis of positive cloud-to-ground waveforms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2014, Shanghai. 2014 . **Proceedings...** Shangai: IEEE, 2014.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R.; WARNER, T. A. . High-speed observation of upward lightning flashes in Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 23., 2014, Tucson. **Proceedings...** Tucson: IEEE, 2014 a.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; FERRO, M. A. S.; WARNER, T. A.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R. Mechanism of triggering upward lightning from towers in São Paulo, Brazil. In: GROUND 2014 & 6TH LPE, 2014, Manaus. **Proceedings...** Manaus, 2014 b.

STOREY, L. R. O. An investigation of whistling atmospherics. **Phil. Trans. Roy. Soc.**, London, A, v 246, n 113, 1953. DOI:10.1098/rsta.1953.0011.

TAKAGI, N.; D. WANG.;WATANABE,T. A study of upward positive leaders based on simultaneous observation of E-fields and high-speed images, **Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn.**, v. 126, p. 256– 259, 2006.

THOMSON. **Clouds with vertical development**. 2007. Disponível em: <http://introduction-to-cloud-types.weebly.com/clouds-with-vertical-development.html>. Acesso em 17 de janeiro de 2015.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 377p

WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; SAKURANO, H.;HASHIMOTO, M. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, n. 2, 2008. L02803, doi:10.1029/2007GL032136.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Classificação internacional das nuvens**. 2015. Disponível em: [www.wmo.int/](http://www.wmo.int/)

VAISALA. **LP series (LP2000, LP5000)**: user's guide. Helsinki, 2003. 258p. (M210412EN-B).

VAISALA. **CP Series (CP7000, CP8000)**: user's guide. Helsinki, 2004. 258p. (M210557EN-A).

VIEMEISTER, P. **The lightning book**. Cambridge MA: MIT Press, 1961.

WACKER, R. S.; ORVILLE, R. E. Changes in measured lightning flashes count and return stroke peak current after the 1994 U.S - national lightning detection network upgrade. 1. Observations. **Journal of Geophysical Research**. v. 104, n.D2, p. 2151-2157, Jan. 1999.