



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15690-TDI/1464

RELAÇÃO ENTRE OS PICOS DE CAMPO ELÉTRICO DAS DESCARGAS DOS RAIOS NEGATIVOS

Alcides de Oliveira Filho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Junior,
aprovada em 26 de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.02.21.42>>

INPE
São José dos Campos
2009

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15690-TDI/1464

RELAÇÃO ENTRE OS PICOS DE CAMPO ELÉTRICO DAS DESCARGAS DOS RAIOS NEGATIVOS

Alcides de Oliveira Filho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Junior,
aprovada em 26 de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.02.21.42>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O4r Oliveira Filho, Alcides de.
Relação entre os picos de campo elétrico das descargas dos raios negativos / Alcides de Oliveira Filho. – São José dos Campos : INPE, 2009.
121 p. ; (INPE-15690-TDI/1464)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Junior.

1. Relâmpagos. 2. Raios. 3. Descarga de retorno. 4. Descarga de retorno subsequente. I. Título.

CDU 551.594.22

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. Delano Gobbi



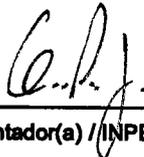
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcelo Magalhães F. Saba



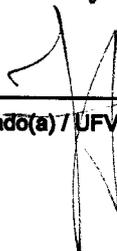
Orientador(a) / INRE / SJCampos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fernando Júnio de Miranda



Convidado(a) / UFVJM / Diamantina - MG

Aluno (a): Alcides de Oliveira Filho

São José dos Campos, 26 DE FEVEREIRO DE 2009

“Todos os homens desejam por natureza saber”

Aristóteles (384 aC – 322 aC), Metafísica

*Dedico a todos aqueles que conseguiram ir adiante depois de pensarem que
não poderiam mais.*

AGRADECIMENTOS

A Ele, que sempre esteve comigo, às vezes de maneira tão evidente.

A meus pais Alcides e Maria Aparecida, que foram meu exemplo.

A minha esposa Ida, que me acompanha há anos.

A meus filhos Beatriz e Rafael, que me ensinam lições tão sutis, que somente estão escritas nas entrelinhas do maravilhoso livro da vida.

Ao Drs. Ferro, Breno, Mário e Emmanuel, por anuírem minhas referências ao INPE.

Aos meus orientadores, Dr. Osmar, possuidor de uma visão estratégica singular, e Dr. Marcelo, possuidor de uma paciência e uma humildade quase infinita, por me por me aceitarem no grupo ELAT e me mostrarem como realmente deve ser realizada uma pesquisa científica.

Aos membros do grupo ELAT – jovens promissores, doutores e mestres - todos indiscriminadamente, pela amizade e presteza.

Aos membros da banca examinadora, que se colocaram à disposição, a favor deste trabalho

Aos professores do INPE, que compartilham suas experiências e conhecimentos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por disponibilizar toda sua estrutura física e administrativa.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados detalhes sobre a relação entre os picos de campo elétrico da primeira descarga elétrica e das subseqüentes em relâmpagos nuvem-solo negativos. Os dados de campo elétrico foram coletados nas campanhas ocorridas em São José dos Campos – SP e em Uruguaiana – RS, entre fevereiro e abril de 2007. A maneira como os dados foram coletados ocorreu de forma semelhante à Áustria e Suécia, utilizando-se basicamente uma antena de GPS sincronizada a uma antena de campo rápido e a um módulo de aquisição. Os dados coletados foram comparados com as informações fornecidas pela BrasilDat – Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas. Foram analisados 677 raios negativos, num total de 2253 descargas. Em São José dos Campos, 37% deles foram simples, e em Uruguaiana foram 25%. Obteve-se as multiplicidades médias dos raios em São José dos Campos (3,2) e em Uruguaiana (3,5), que foram comparadas aos estudos realizados nos Estados Unidos, na Áustria, na Suécia e no Brasil. Foram empregados quatro métodos para calcular as razões entre os picos de campo elétrico da primeira descarga elétrica e das subseqüentes. Os resultados foram comparados com estudos realizados nos Estados Unidos, na Áustria e na Suécia, e mostraram existir algumas discrepâncias entre as intensidades de campo elétrico da primeira descarga de retorno e das subseqüentes obtidas nos diferentes estudos. Observou-se que os valores encontrados em São José dos Campos são semelhantes aos de Uppsala (Suécia). Uruguaiana e Bad Vöslau (Áustria) possuem valores inferiores aos demais, sendo que em Bad Vöslau os valores são os menores, e Tampa (EUA) apresentou os maiores valores. Esse trabalho concluiu que não existe uma dependência entre esta relação de campos elétricos com o local de ocorrência das tempestades, mas sim com o tipo de tempestade.

THE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRIC FIELD PEAKS IN STROKES OF NEGATIVE FLASHES

ABSTRACT

This work shows details about the relationship between first and subsequent stroke electric field peak in negative cloud-to-ground lightning flashes. A field campaign during February to April - 2007 in São José dos Campos (SP) and Uruguaiana (RS) collected electric field data. The electric measuring system used in Brazil was the same as that used in Austria and Sweden. It consists basically of a GPS synchronized to a fast electric field flat-plate antenna and a data acquisition box. The data collected were compared with BrasilDat (Brazilian Lightning Location System). 677 negative flashes with 2253 strokes were analyzed. In São José dos Campos, 32% of them were single flashes and 25% of them in Uruguaina. The average flash multiplicity of São José dos Campos (3,2) and Uruguaiana (3,5) were compared with others ones obtained in the United States, Austria, Sweden, and Brazil. We used four methods to calculate the rate between first and subsequent stroke electric field peak. The results were compared with previous studies in the United States, Austria and Sweden and show some discrepancies between first versus subsequent stroke intensity reported from different studies. It was observed that the values of São José dos Campos are similar to those of Uppsala (Sweden). Uruguaiana and Bad Vöslau (Austria) have lower values than the other and Tampa (USA) showed the highest values. This study concluded that there is no dependency of the relationship between electric fields with the place of the storms occur but there is with the type of storm.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1 INTRODUÇÃO.....	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1 Definição de relâmpago	29
2.2 Classificações dos relâmpagos.....	30
2.3 Etapas de um relâmpago nuvem-solo	33
2.4 Formas de onda do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo	43
2.4.1 Quebra de rigidez.....	44
2.4.2 Líder escalonado.....	44
2.4.3 Descarga de retorno.....	45
2.4.4 Líder subsequente.....	50
2.4.5 Corrente contínua.....	51
2.4.6 Componente M.....	52
2.4.7 Descarga K.....	53
2.5 Frequência de radiação eletromagnética de um relâmpago nuvem-solo...	54
2.6 Multiplicidade.....	59
2.7 Intervalo de tempo entre descargas de retorno.....	61
2.8 Tempo de subida das descargas de retorno.....	63
2.9 Largura de pulso das descargas de retorno	65
2.10 Relação entre pico de corrente e pico de campo elétrico das descargas de retorno.....	67
3 INSTRUMENTAÇÃO	69
3.1 Equipamentos para coleta dos dados	69
3.2 Programas para coleta e análise dos dados	71
3.3 Fontes de energia elétrica.....	72
3.4 Rede Integrada Nacional de detecção de Descargas Atmosféricas	72
3.4.1 Sensores integrantes da rede BrasilDat	76
3.4.2 Precisão de localização dos raios	76
3.4.3 Parâmetros físicos dos raios	78
3.4.4 Eficiência de detecção.....	82
4 METODOLOGIA	84
4.1 Sistema de medição.....	84
4.2 Datas, horários e locais das coletas de dados.....	85
4.3 Distância entre o sistema de medição e o local de impacto da descarga ..	87
4.4 Dados considerados	88
4.5 Normalização dos valores do campo elétrico	94
4.6 Métodos para a análise dos valores do campo elétrico.....	96
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
6 CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Classificação dos relâmpagos em função do local de origem e término	31
2.2 – Imagens de diversos tipos de relâmpagos	32
2.3 – Processo físicos de um relâmpago nuvem-solo	33
2.4 – Relâmpago nuvem-solo negativo e sua descarga conectante.	35
2.5 – Encaminhamneto do líder escalonado.	36
2.6. - Relâmpago nuvem-solo negativo e seu líder contínuo	37
2.7 – Desenvolvimento da “árvore” de um relâmpago nuvem-solo negativo....	40
2.8 – Histograma da distribuição da descargas que seguiram um novo canal	42
2.9 – Imagens de um relâmpago nuvem-solo negativo bifurcado	43
2.10 – Campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo e múltiplo	47
2.11 – Campo elétrico devido à quebra de rigidez e ao líder escalonado	48
2.12 – Campo elétrico devido a uma descarga de retorno	50
2.13 – Campo elétrico devido a primeira descarga de retorno	51
2.14 – Campo elétrico e imagens de um relâmpago nuvem-solo negativo	52
2.15 – Campo elétrico devido à quebra de rigidez e ao líder subsequente	54
2.16 – Campo elétrico devido à corrente contínua	55
2.17 – Luminosidade devida à corrente contínua e suas componentes M	56
2.18 – Campo elétrico devido às descargas de retorno e às descargas K	57
3.1 – Equipamentos para coletados dados de campo elétrico	70
3.2 – Imagens do sistema de medição	71
3.3 – Localização dos sensores da rede BrasilDat	73
3.4 – Método da direção magnética	74
3.5 – Método do tempo de chegada	75
3.6 – Distribuição gaussiana dos erros de localização	78
3.7 – Parâmetros das descargas detectadas pelos sensores da BrasilDat	80
3.8 – Algoritmo de agrupamento das descargas de retorno	82
4.1 – Imagens do satélite GOES-10 para as regiões sudeste e sul	86
4.2 – Parâmetros para cálculo da distância entre dois pontos na Terra	87
4.3 – Localização da descargas nuvem-solo negativas consideradas	89
4.4 – Descargas que ocorrem em um intervalo de tempo superior a 500 ms	91
4.5 – Campo elétrico com alto ruído e baixa intensidade de radiação	92
4.6 – Campo elétrico característico de uma descarga de retorno	92
4.7 – Campos elétricos desconsiderados	93
4.8 – Amostra de parte da tabela para análise dos dados coletados	100
5.1 – Histograma do pico de campo elétrico em função do número de eventos considerados	103
5.2 – Histograma da quantidade das descargas de retorno consideradas	105
5.3 – Histograma da multiplicidade das descargas de retorno	106
5.4 – Histograma das médias geométricas dos campos elétricos	107
5.5 – Histograma das descargas subsequentes maiores que a primeira	110

LISTA DE TABELAS

2.1 – Características e valores dos relâmpagos nuvem-solo negativos.....	45
2.2 – Valores da frequência de radiação do campo elétrico.....	58
2.3 – Multiplicidades obtidas por diferentes técnicas de observação.....	59
2.4 – Multiplicidades obtidas neste trabalho e em outros estudos.....	60
2.5 – Intervalos de tempo entre descargas de retorno.....	62
2.6 – Tempo de subida das descargas de retorno.....	64
2.7 – Largura de pulso das descargas de retorno.....	66
3.1 – Características dos sensores LPATS e IMPACT65.....	77
4.1 – Data e horário das gravações e localização do sistema de medição.....	85
4.2 – Dados considerados para análise.....	95
4.3 – Valores arbitrários de pico campo elétrico.....	96
4.4 – Esquematização do método A1.....	97
4.5 – Esquematização do método A2.....	97
4.6 – Esquematização do método B.....	98
4.7 – Esquematização do método C.....	99
5.1 – Porcentagem de relâmpagos nuvem-solo negativos com pelo menos uma descarga subsequente maior que a primeira, e descargas subsequentes maiores que a primeira.....	109
5.2 – Relação entre os campos elétricos da primeira descarga de retorno e das subsequentes.....	111

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ELAT	Eletricidade Atmosférica
SP	São Paulo
RS	Rio Grande do Sul
GPS	<i>Global Positioning System</i>
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
BrasilDat	nova denominação dada à RINDAT a partir de 2007
UT	<i>universal time</i>
VLF	<i>very low frequency</i>
LF	<i>low frequency</i>
VHF	<i>very high frequency</i>
MDF	<i>Magnetic Direction Finding</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
LPATS	<i>Ligthing Position and Tracking System</i>
IMPACT	<i>Improved Accuracy Using Combined Technology</i>
TLM	<i>Transmission Line Model</i>
d/m/a	dia, mês e ano
h:m:s	horas, minutos e segundos
fev.	fevereiro
mar.	março
abr.	abril
dec.	decimal
CPTEP	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
arccos	arco cosseno
sen	seno
cós	cosseno
SJC	São José dos Campos
DR	descarga de retorno
geom.	geométrica
arit.	aritmética

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	centímetro
m	metro
km	quilômetro
μ s	microsegundo
ms	milissegundo
s	segundo
mV	milivolt
MV	megavolt
A	Ampere
kA	quiloampere
m/s	metro por segundo
V/m	Volt por metro
MS/s	megasample por segundo
K	graus Kelvin
J	Joule
C	Coulomb
Hz	hertz
kHz	quilohertz
MHz	megahertz

1 - INTRODUÇÃO

No início da década de 90 foram realizados vários estudos a respeito das descargas de retorno subsequentes em relâmpagos nuvem-solo negativos, entre eles: Rakov et al. (1990), Thottappillil et al. (1992) e Rakov et al. (1994).

Rakov et al. (1994) verificaram uma razão de ordem 2 entre os picos de campo elétrico entre a primeira descarga de retorno e as subsequentes. Notaram também que aproximadamente um terço de relâmpagos possuíam pelo uma descarga subsequente maior que a primeira, fato não tão incomum como se acreditava,

Entretanto, medidas de campo elétrico realizadas na Áustria por Schulz et al. (2005) e Schulz e Diendorfer (2006), na Suécia por Schulz et al. (2008), além de observações realizadas nos Estados Unidos por Nag et al. (2008), mostraram não existir uma concordância sobre essa relação entre os valores de pico de campo elétrico da primeira descarga e das subsequentes em relâmpagos nuvem-solo negativos. Na Áustria, por exemplo, o valor encontrado da razão foi da ordem de 1.

Neste presente trabalho é feita a comparação entre os resultados obtidos no Brasil com aqueles deparados anteriormente, com o objetivo de se encontrar alguma similaridade – ou não - a respeito da razão entre os picos de campo elétrico.

Foram coletados, durante a campanha que ocorreu entre fevereiro e abril de 2007, dados de raios negativos ocorridos a uma distância de até 200 km de São José dos Campos - SP, e também de Uruguaiana - RS, totalizando 677 raios, com 2253 descargas em oito dias de tempestade.

Oliveira et al. (2007) fizeram uma apresentação preliminar deste trabalho, com os dados obtidos em São José dos Campos.

Utilizou-se para a coleta e análise desses dados um GPS sincronizado a uma antena plana de campo rápido de largura de banda de 306 Hz a 1,5 MHz e taxa de aquisição de dados de 5 MS/s (cinco milhões de aquisições por segundo), além de um módulo de aquisição da National Instruments PCI-6110 de 12 Bits e com quatro entradas analógicas.

Esses dados foram ainda confrontados com os dados de relâmpagos nuvem-solo detectados pela RINDAT - Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas, hoje ampliada e denominada BrasilDat.

Para uma melhor apresentação e entendimento, essa dissertação é constituída por 6 capítulos: introdução, fundamentação teórica, instrumentação, metodologia, resultados e discussões, e conclusão.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, enfocando os aspectos físicos dos relâmpagos mais relacionados a esse trabalho: sua classificação, e as formas de onda de campo elétrico gerados por eles. O capítulo 3 descreve toda a instrumentação e os softwares utilizados na obtenção e análise dos dados. O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada na coleta e tratamento dos dados. O capítulo 5 apresenta o resultado das análises realizadas e as considerações sobre os resultados obtidos. No capítulo 6 são expostas as conclusões obtidas.

O trabalho encerra com as referências bibliográficas.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica clássica apresentada neste trabalho é procedente de uma vasta bibliografia, aqui representada por Cooray (2003), Rakov e Uman (2003), Pinto Jr. (2000), entre outras.

2.1 – DEFINIÇÃO DE RELÂMPAGO

Relâmpagos são descargas elétricas que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de nuvens de tempestade cumulonimbus. Eles também podem ocorrer em tempestades de neve, em tempestades de areia, durante erupções vulcânicas, ou ainda artificialmente, em explosões nucleares, ou induzidos por cabos condutores levados próximo às nuvens por foguetes ou aviões, ou ainda induzidos através de feixes de raio laser.

Esse trabalho diz respeito aos relâmpagos criados exclusivamente em nuvens de tempestades.

Quando as cargas elétricas no interior da nuvem alcançam valores suficientes para que o campo elétrico gerado por elas rompa a rigidez dielétrica do meio onde se encontram (cristais de gelo, gotas de água, granizo), inicia-se uma descarga elétrica dentro da nuvem, originando o relâmpago.

Os relâmpagos duram em média 160 ms, segundo Saba et al. (2006). Nesse intervalo a corrente elétrica sofre grandes variações, chegando a 30 kA, transferindo uma carga média de 20 C ao longo do canal. A temperatura desse canal pode chegar a dezenas de milhares de graus Celsius e a uma pressão de dezenas de atmosferas.

A maior parte da energia elétrica do relâmpago, em torno de 75% do total, é convertida em energia térmica e acústica. Cerca de 1% dessa energia é convertida em energia eletromagnética, suficiente até mesmo para produzir interferência nas transmissões de radio e TV.

2.2 – CLASSIFICAÇÕES DOS RELÂMPAGOS

Os relâmpagos são classificados, de acordo com locais onde se originam e terminam, em: **intranuvem**, **nuvem-nuvem**, **nuvem-ar**, **nuvem-solo** e **solo-nuvem**, como mostram adiante as Figuras 2.1 e 2.2.

Os relâmpagos que têm contato com o solo (nuvem-solo e solo-nuvem) são denominados **raios**, e correspondem em torno de 10% a 20% das ocorrências. Destes, o tipo nuvem-solo é o mais freqüente e o mais estudado devido aos seus efeitos sobre o ambiente e o ser humano. O relâmpago solo-nuvem é o menos comum, ocorrendo normalmente em estruturas altas.

Por outro lado, a grande maioria dos relâmpagos, cerca de 80% a 90% são aqueles que não têm contato com o solo (intranuvem, nuvem-nuvem e nuvem-ar), contudo devido a pouca transparência das nuvens, a maioria destes relâmpagos não é visto.

Os relâmpagos nuvem-solo podem ser subdivididos em relâmpagos **nuvem-solo negativos** e em **nuvem-solo positivos**, de acordo com a polaridade da carga que transferem para o solo quando da sua ocorrência. Um relâmpago nuvem-solo negativo transfere para o solo cargas negativas, enquanto que o relâmpago nuvem-solo positivo transfere para o solo cargas positivas, ou seja, transfere elétrons do solo para a nuvem.

Cerca de 90% dos relâmpagos nuvem-solo são negativos. Isso pode encontrar explicação no fato de que as cargas negativas concentram-se na base da nuvem, estando, portanto, a uma menor distância do solo em relação ao centro de carga positiva. Sendo sua distância em relação ao solo é menor, o caminho a ser vencido pela descarga será menor, logo a probabilidade de ocorrer uma descarga negativa é maior.

Na troposfera, estendendo-se até a mesosfera – entre 70 e 90 km de altitude, ocorrem ainda emissões de baixa intensidade: são os **sprites** - de cor avermelhada, os **blue jets** – azuis, e os **elves** – alaranjados.

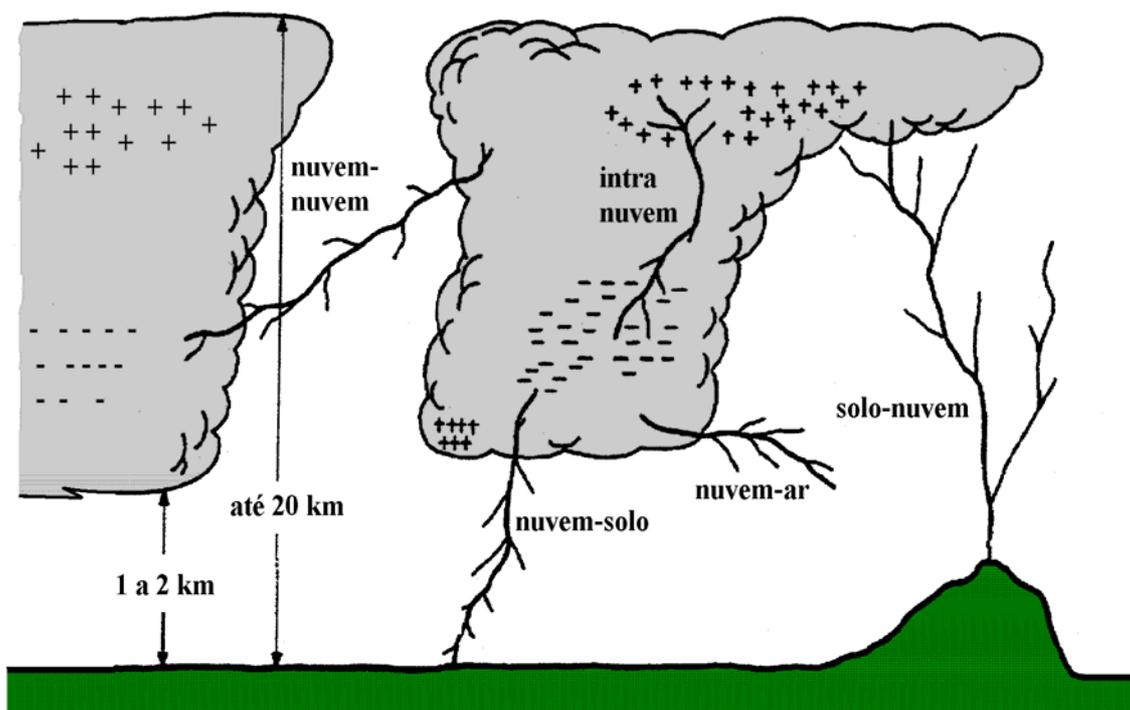


Figura 2.1: Classificação dos relâmpagos em função dos locais de origem e término
Fonte: Adaptada de Carvalho (2001).



(a) relâmpago intranuvem



(b) relâmpago nuvem-nuvem



(c) relâmpago nuvem-solo



(d) relâmpago nuvem-ar



(e) relâmpago solo-nuvem

Figura 2.2: Imagens de diversos tipos de relâmpagos

Fontes: (a) Robison (2008); (b) Karwath (2008); (c) Warner (2008 a), (d) Edwards (2008); (e) Noyes (2008).

2.3 - ETAPAS DE UM RELÂMPAGO NUVEM-SOLO

Um relâmpago nuvem-solo passa por diversas etapas, esquematizadas na Figura 2.3 e descritas a seguir.

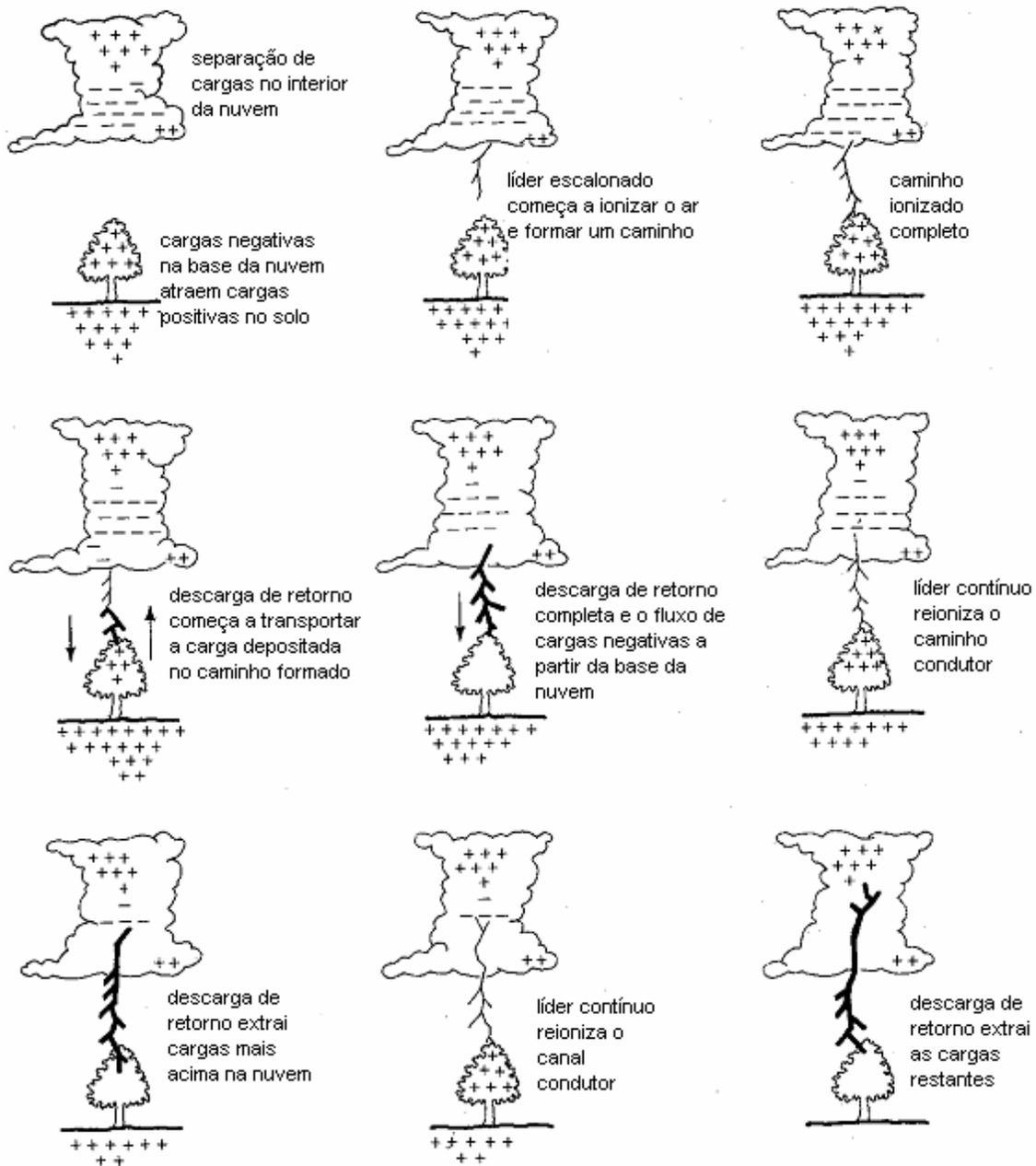


Figura 2.3 – Processos físicos de um relâmpago nuvem-solo típico desde a ruptura preliminar até a segunda descarga de retorno.

Fonte: Adaptada de Lutgens e Tarbuck (1982).

A primeira etapa ocorre dentro da nuvem e é caracterizada por fracas descargas devido à separação de cargas elétricas entre o centro positivo menor da base da nuvem e o centro negativo, liberando elétrons ligados às partículas de água ou gelo. Esta descarga é conhecida como **Pulso de Quebra de Rigidez Preliminar**.

Ao final desse processo uma fraca descarga, geralmente não visível, sai da nuvem e se propaga em direção ao solo. Essa descarga, denominada **Líder Escalonado**, percorre aproximadamente 50 metros em 1 μs e para durante 20 μs a 50 μs e assim sucessivamente, em busca do caminho de menor resistência para escoar as cargas, criando um canal ionizado até aproximadamente 50 m do solo, com velocidade média da ordem de 2×10^5 m/s. O líder escalonado procura sempre um caminho que apresente maior condutividade elétrica, geralmente resultando em ramificações descendentes e tortuosidades, mas nem sempre todos os seus ramos estendem-se até o solo.

Ao se aproximar do solo, o campo elétrico na extremidade do Líder Escalonado é da ordem de 100 milhões de V/m. Esse imenso campo elétrico faz com que a rigidez dielétrica do ar seja quebrada em um ou mais pontos no solo, originando uma ou mais descargas que partem do solo em direção ao líder escalonado. Essas descargas são chamadas **Descargas Conectantes**.

Uma vez feita a conexão entre o líder escalonado e a descarga conectante, um canal ionizado (condutor) é produzido. O caminho para o solo está estabelecido e o processo de escoamento dos elétrons se inicia. Um imenso clarão propaga-se, iluminando o canal de escoamento dos elétrons e todas as ramificações. Essa descarga é chamada **Descarga de Retorno**, cujo valor médio do pico de corrente é de 30 kA, podendo atingir 100 kA. Essa corrente se propaga a uma velocidade de 10^8 m/s a 2×10^8 m/s, alcançando a nuvem em aproximadamente 70 μs .

O caminho visível, construído pelo líder escalonado, geralmente tortuoso e às vezes ramificado, por onde segue a descarga de retorno, é conhecido como sendo o canal do relâmpago. É composto por plasma e possui um diâmetro de alguns centímetros, podendo atingir uma temperatura de cerca de 30.000°C. O rápido e intenso aquecimento do ar na região do canal resulta em uma súbita expansão do ar dentro do canal e em sua vizinhança, a ponto de gerar um som ruidoso conhecido como **trovão**.

A Figura 2.4 mostra um exemplo do líder escalonado e da descarga conectante, momentos antes de se encontrarem.



Figura 2.4 – Fotografia de um relâmpago nuvem-solo negativo e sua descarga conectante.

Fonte: Warner (2008 b).

A Figura 2.5 apresenta a seqüência de imagens da propagação, em direção ao solo, do líder escalonado pertencente a um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido em São José dos Campos em 15/12/2006 e distante 19 km do sistema de medição e de filmagem. Os primeiros quatro quadros mostram a propagação do líder escalonado em direção ao solo. O penúltimo quadro mostra o exato momento em que um dos ramos do líder escalonado encontra a descarga conectante e a descarga de retorno inicia sua propagação

ascendente em direção ao centro de carga na nuvem. O último quadro é inundado pela intensa luminosidade resultante da descarga de retorno.

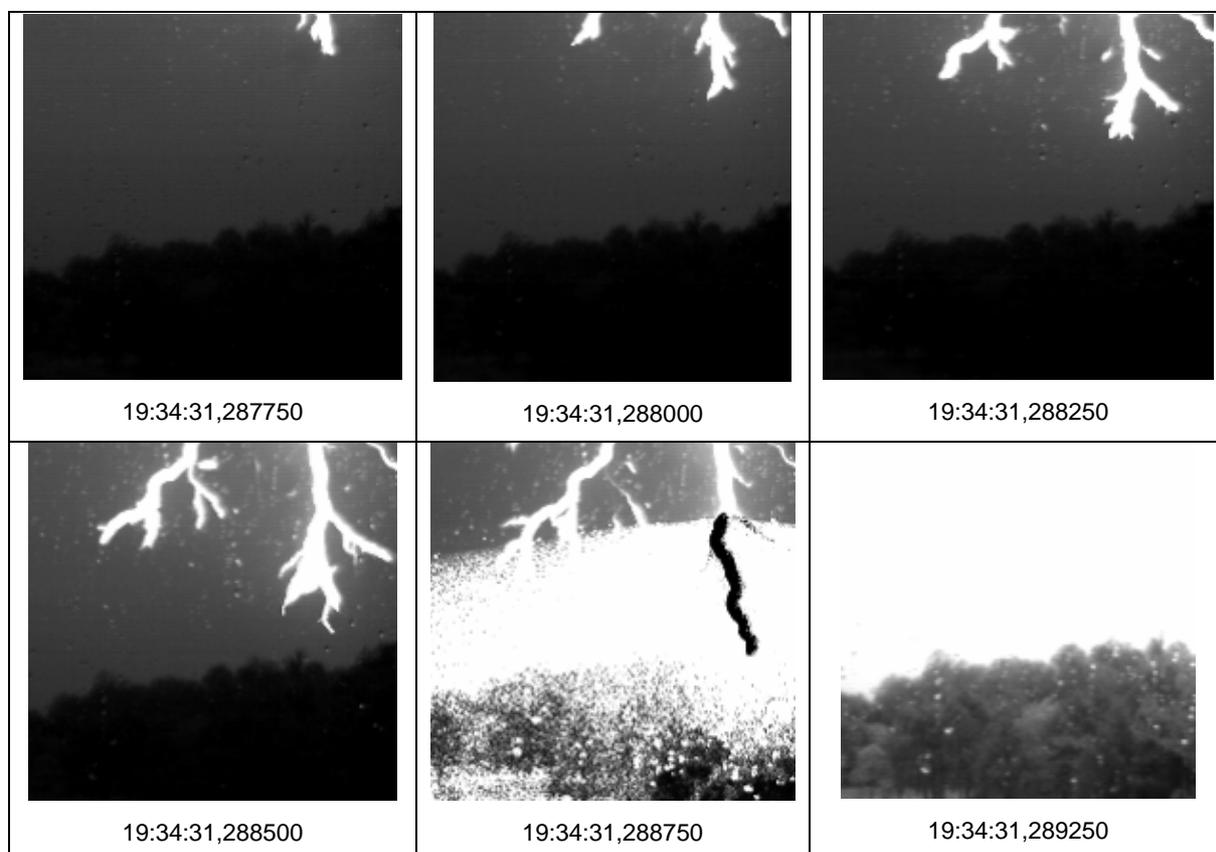


Figura 2.5 – Encaminhamento do líder escalonado e o instante em que ele encontra a descarga conectante. Neste momento a descarga de retorno inicia sua propagação ascendente em direção à nuvem, gerando uma faixa com luminosidade muito intensa.

Se ainda existirem outros centros de carga na nuvem o canal ionizado poderá ser utilizado para uma nova descarga. O novo líder não será escalonado, pois não se desloca em trechos. Ele segue o trajeto do canal ionizado e é denominado **Líder Contínuo**. Possui uma velocidade de 10^7 m/s a 2×10^7 m/s. A nova descarga de retorno é conhecida como **Descarga de Retorno Subsequente** e ocorre em média após algumas dezenas de milissegundos da

primeira. A velocidade desta descarga é de mesma magnitude da primeira descarga de retorno.

A Figura 2.6 mostra uma continuação da seqüência de imagens do mesmo relâmpago apresentado na Figura 2.5. Aqui é registrada a propagação do líder contínuo em direção ao solo, seguindo o mesmo caminho da primeira descarga de retorno. Os dois últimos quadros mostram a segunda descarga de retorno que ilumina o canal criado pela descarga anterior.

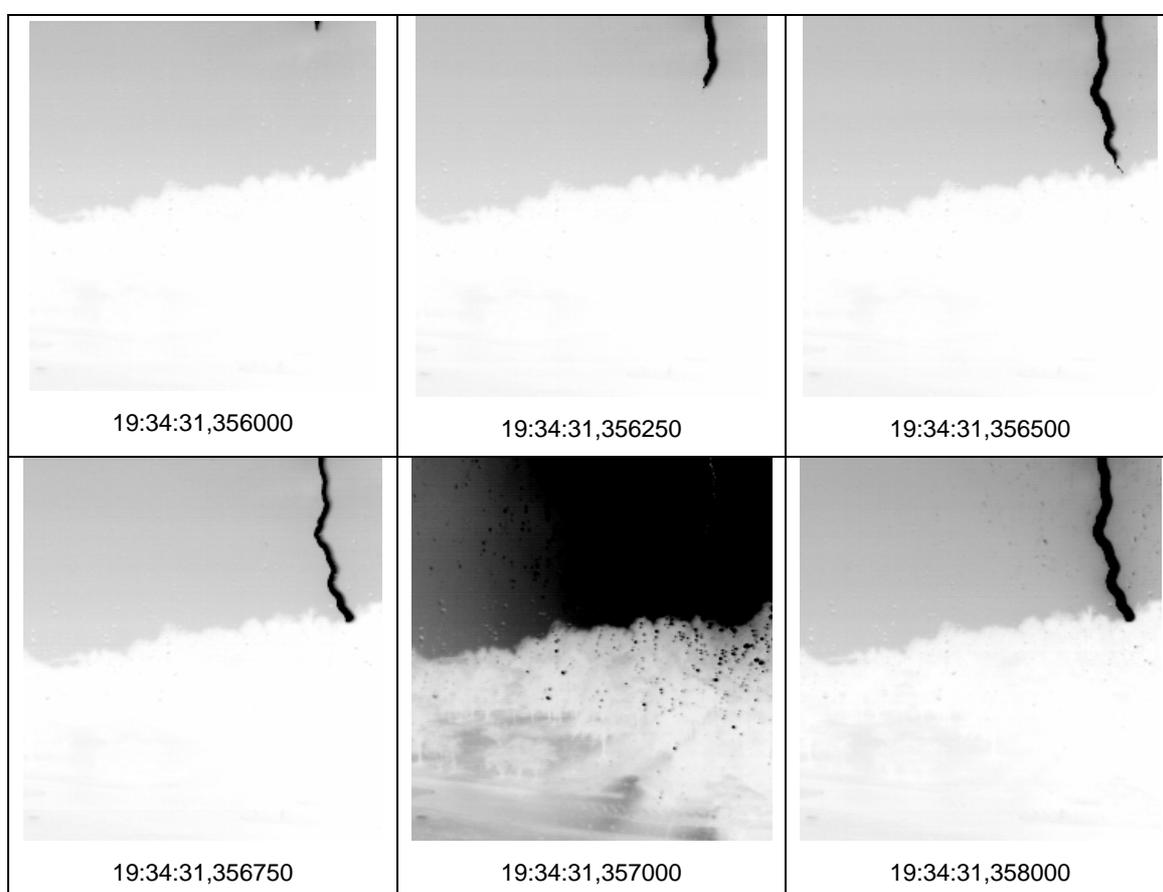


Figura 2.6 – Continuação da seqüência de imagens do mesmo relâmpago apresentado na Figura 2.5. Pode-se distinguir agora o líder contínuo que sucede a primeira descarga de retorno e a luminosidade causada pela descarga subsequente.

Quando um relâmpago termina depois de ocorrida uma descarga de retorno, ele é denominado **Relâmpago Simples**. Se ocorrerem outras descargas de retorno subsequentes o relâmpago é denominado **Relâmpago Múltiplo**.

O número de descargas de retorno por relâmpago é conhecido como multiplicidade e segundo Rakov (1999), após a primeira descarga geralmente ocorrem 3 a 5 descargas subsequentes separadas entre si por dezenas de milissegundos e precedidas por líderes contínuos. Segundo Miranda (2000), os intervalos de tempo entre as descargas de retorno consecutivas não dependem da sua ordem e, além disso, seguem uma distribuição lognormal.

Segundo Rakov e Uman (2003), em média, 80% dos relâmpagos nuvem-solo são múltiplos, e a multiplicidade é de 3 a 5. No capítulo 5 são apresentados valores de multiplicidade encontrados em outros estudos

Várias descargas subsequentes podem ocorrer, desde que outras cargas na nuvem ocupem a região onde o líder escalonado teve início. Essa movimentação de cargas no interior da nuvem está associada ao fenômeno denominado **Descarga K**.

A descarga K é caracterizada por pequenas e rápidas descargas que causam variações de campo elétrico que surgem entre as descargas de retorno e também após a última descarga, geralmente em intervalos de 2 a 20 milissegundos.

Miranda (2003), através de medições de campo elétrico em São José dos Campos de 26 relâmpagos nuvem-solo negativos, com 131 descargas de retorno, encontrou os seguintes valores para o intervalo entre descargas K: 18,5 ms para a média aritmética e 12 ms para a média geométrica. Observou também que: (a): não houve dependência do tempo do intervalo com a ordem da descarga; (b): a distribuição do tempo do intervalo entre descargas seguiu

uma curva lognormal; (c): seus resultados foram semelhantes aos realizados em outras regiões.

Sob o ponto de vista da **Teoria do Líder Bidirecional**, descrita em Ferro (2008), a grande maioria de todos os relâmpagos que são iniciados em nuvens de tempestade são “árvores” com dupla terminação que interligam regiões do espaço carregadas com cargas de polaridades opostas.

Um típico relâmpago nuvem-solo negativo com múltiplas descargas, consiste segundo esta teoria, na propagação de um líder negativo escalonado para o solo, seguido pelo desenvolvimento de um líder positivo dentro da nuvem (caracterizando um **Líder Bidirecional**). A Figura 2.7 mostra o desenvolvimento da “árvore” de um relâmpago nuvem-solo negativo composta de líderes positivos acima e líderes negativos abaixo. No instante t_1 inicia-se o líder bi-direcional; t_2 mostra a progressão da parcela negativa do líder bi-direcional em direção ao solo; no instante t_3 o líder negativo encontra o solo; t_4 mostra a descarga de retorno; t_5 mostra a interrupção da corrente e a progressão do líder positivo com a ocorrência de líderes de retorno negativos intermitentes (setas) viajando em direção à origem do relâmpago (também conhecidas como descargas K).

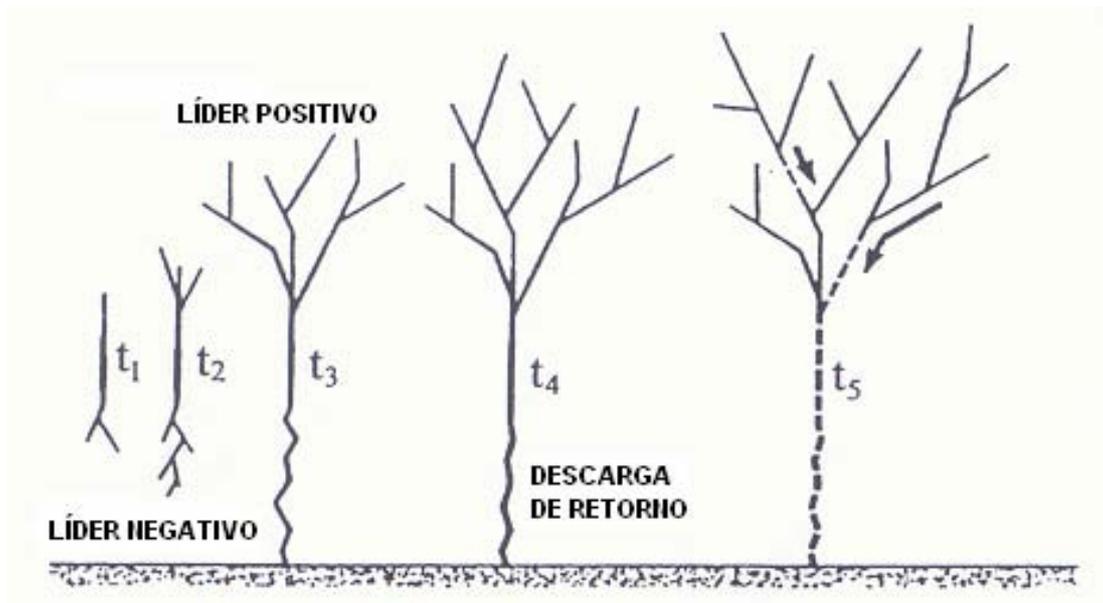


Figura 2.7 - Desenvolvimento da “árvore” de um relâmpago nuvem-solo negativo, segundo a teoria do líder bi-direcional. Os instantes anotados são: t_1 : início do líder bi-direcional; t_2 : progressão da parcela negativa do líder bi-direcional em direção ao solo; t_3 : contato do líder negativo com o solo; t_4 : ocorrência da descarga de retorno; t_5 : interrupção da corrente e a progressão do líder positivo com a ocorrência de líderes de retorno negativos intermitentes (setas) viajando em direção à origem do relâmpago.

Fonte: Adaptada de Mazur (2002).

Quando uma descarga de retorno subsequente atinge o solo em um ponto diferente daquele atingido pela primeira descarga de retorno, o relâmpago é dito **Bifurcado**.

Essa bifurcação consiste em um novo canal e está associada a um decaimento da ionização de uma região no antigo canal ou a “aniquilação total” desta região do canal, as quais podem estar associadas, por exemplo, à varreduras de matéria ionizada por ventos (Miranda, 2000).

Segundo Saba et al. (2006), em uma amostra com 138 relâmpagos nuvem-solo negativos, 51% eram bifurcados, atingindo o solo em 235 pontos diferentes.

Ferro (2008) analisou 167 relâmpagos bifurcados que produziram 779 descargas de retorno, das quais 264 (34%), independente da sua ordem, seguiram um novo canal e para o solo.

Rakov e Uman (1990) e Rakov et al. (1994) observaram que a porcentagem dos líderes subseqüentes que criam um caminho para o solo diferente do utilizado pela descarga imediatamente anterior decresce rapidamente com a ordem da descarga. 37% de todos os segundos líderes analisados seguiram um novo caminho para o solo, diferente daquele seguido pela primeira descarga de retorno. Da mesma forma, 27 % de todos os terceiros líderes e 2% de todos os quartos líderes também seguiram caminhos diferentes do imediatamente anterior. Nenhum novo canal foi criado por líderes de ordem cinco ou superior.

Mazur et al. (1995), Valine and Krider (2002), Saba et al. (2006) e Ferro (2008) também reforçam a afirmação de Rakov et. al. (1994) de que a probabilidade de criação de um novo canal para o solo decai com a ordem da descarga.

A Figura 2.8, elaborada por Ferro (2008), mostra a porcentagem de novos canais para o solo criados por descargas de diferentes ordens.

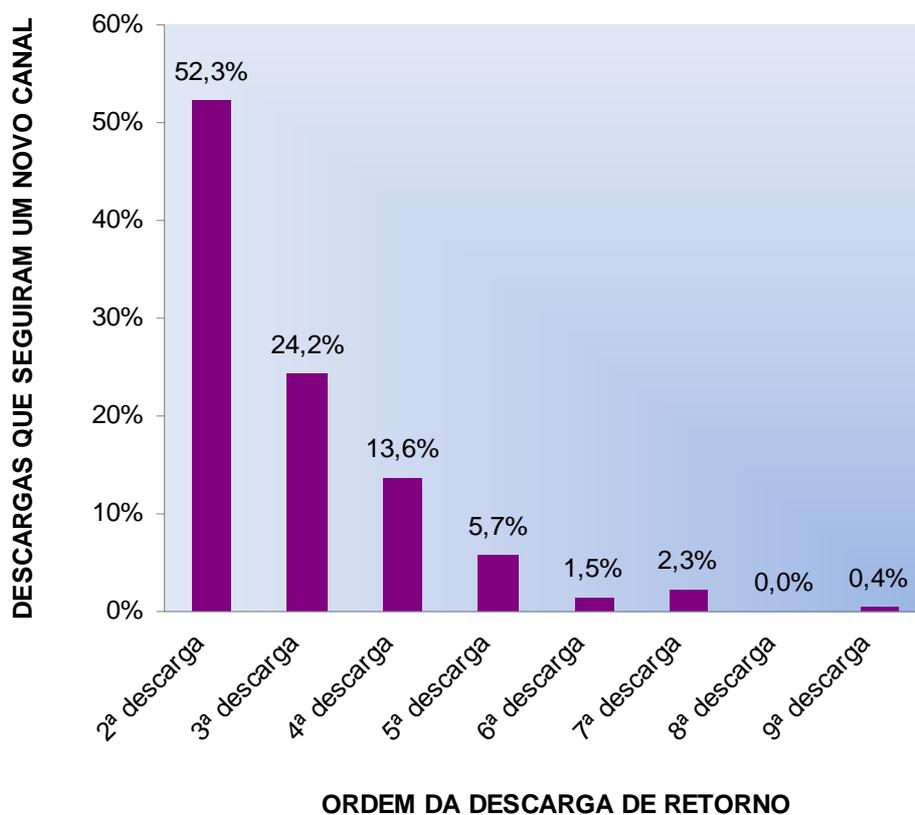


Figura 2.8 – Distribuição das descargas que percorrem um novo canal em função da ordem da descarga.

Fonte: Adaptada de Ferro (2008).

Ferro (2008) conclui ainda que:

- embora a maioria dos novos canais ocorra em seguida à primeira descarga de retorno (84 % nesse estudo), o condicionamento do canal em função do número de descargas que por ele passam não garante o estabelecimento de um caminho inalterado para o solo;
- a média geométrica do intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga que retorna ao canal original é duas vezes menor que a média geométrica do intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga imediatamente anterior a ela;
- a redução do valor do pico de corrente da descarga de retorno quando ela dá início a uma corrente contínua longa prevalece sobre o aumento do valor do

pico de corrente que é comumente observado quando uma descarga segue um novo canal;

- a observação feita por Rakov e Uman (1990) de que descargas que iniciam correntes contínuas longas (maiores de 40 ms) tendem a ter um pico de campo elétrico menor que o das descargas de retorno regulares, aparentemente é válida também para descargas que criam um novo caminho para o solo e são seguidas por corrente contínua longa.

A Figura 2.9 mostra as imagens de um relâmpago nuvem-solo negativo bifurcado, com duas descargas separadas por um intervalo de tempo de aproximadamente 2 ms, que atingiram o solo em pontos diferentes.

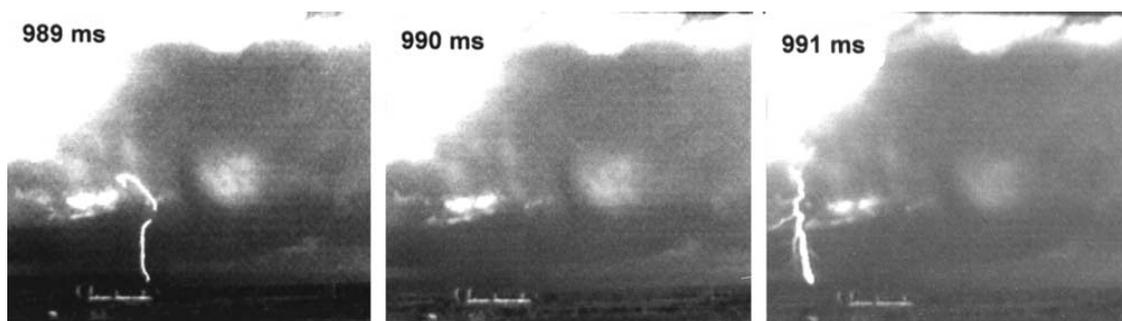


Figura 2.9 – Imagens de um relâmpago nuvem-solo negativo bifurcado, com duas descargas de retorno que atingiram o solo em pontos diferentes.

Fonte : Adaptada de Saba et al. (2006).

Quando um líder contínuo desvia do canal previamente formado, ele passa a ter um comportamento semelhante ao do líder escalonado e denomina-se **Líder Contínuo-escalonado**

As descargas de retorno subsequentes são normalmente seguidas por **Corrente Contínua** com intensidade média de 100 A, e duração de até centenas de milissegundos. Devido à transferência de grande quantidade de cargas elétricas – em torno de 10 C a 20 C, a corrente contínua é responsável

pela maioria dos danos associados aos efeitos térmicos causados por relâmpagos em redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica

Diferentemente de uma descarga de retorno, que elimina as cargas elétricas depositadas no canal do relâmpago criado pelo líder que a precede, transferindo-as para o solo, a corrente contínua por sua vez, transfere cargas de novas regiões do interior da nuvem para o solo. Correia e Saba (2008) observou que aproximadamente 28% dos relâmpagos nuvem-solo negativos contêm corrente contínua com duração superior a 40 milissegundos.

Os transientes que ocorrem durante o processo de corrente contínua são denominados **Componentes M** e são responsáveis pelo aumento da luminosidade do canal como consequência de um momentâneo aumento de corrente. Segundo Campos et al. (2007), a duração média de uma componente M é de 4,8 ms, e o intervalo de tempo entre elas é de 11 ms.

Assim como os processos das descargas de retorno e das correntes contínuas em um relâmpago nuvem-solo, a componente M também transfere carga elétrica da nuvem para o solo.

A Tabela 2.1 exhibe as principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos nuvem-solo negativos apresentados na literatura por Rakov e Uman (2003) e também os obtidos no Brasil por Saba et al. (2006). Estes valores podem sofrer alterações entre uma tempestade e outra, bem como em função da localização e das condições meteorológicas (Beasley et al., 1982).

Tabela 2.1 – Principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos nuvem-solo negativos. Os valores encontrados no Brasil estão indicados com asterisco (continua).

Fonte: Uman (1987); Rakov e Uman (2003); Saba et al. (2006).

CARACTERÍSTICA	VALOR TÍPICO
Líder Escalonado	
Comprimento dos passos	50 m
Intervalo de tempo entre passos	20 – 50 μ s
Tempo de duração	35 ms
Velocidade média de propagação	2×10^5 m/s
Corrente média	100 - 200 A
Carga total transferida	5 C
Potencial elétrico	50 MV
Temperatura do canal	10.000 K
Primeira Descarga de Retorno	
Tempo de duração	70 μ s
Velocidade média de propagação	$(1 - 2) \times 10^8$ m/s
Pico de corrente	30 kA
Carga total transferida	5 C
Raio do canal	1 – 2 cm
Temperatura do canal	30.000 K
Líder Contínuo	
Tempo de duração	1 – 2 ms
Velocidade média de propagação	$(1 - 2) \times 10^7$ m/s
Pico de corrente	1 kA
Carga total transferida	1 C
Potencial elétrico	15 MV
Temperatura do canal	20.000 K
Descarga Subsequente	
Velocidade média de propagação	$(1 - 2) \times 10^8$ m/s
Pico de corrente	10 - 15 kA
Carga total transferida	1 C
Raio do canal	1 – 2 cm
Temperatura do canal	30.000 K
Corrente Contínua	
Tempo de duração	100 ms
Corrente média	100 – 200 A
Carga total transferida	10 – 20 C
Porcentagem de descargas de retorno com corrente contínua de duração igual ou maior a 10 ms	50% *

Tabela 2.1 – (conclusão).

Componente M	
Pico de corrente	100 – 200 A
Carga total transferida	0,1 – 0,2 C
Características Gerais de Relâmpagos NS	
Duração total do relâmpago	163 ms*
Carga total transferida	20 C
Energia envolvida	$10^9 - 10^{10}$ J
Diâmetro do canal	1 – 2 cm
Porcentagem de relâmpagos múltiplos	80%
Número de descargas de retorno	3,8 *
Intervalo de tempo entre descargas	61 ms *
Porcentagem de relâmpagos bifurcados	51% *

2.4 – FORMAS DE ONDA DO CAMPO ELÉTRICO DE UM RELÂMPAGO NUVEM-SOLO

Cada etapa de um relâmpago nuvem-solo é responsável pela geração de formas de onda de campo eletromagnético distintas; isso possibilita, através de modelos matemáticos ou de instrumentação adequada, a realização de estudos dos processos que ocorrem durante o relâmpago.

Um exemplo da forma de onda do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo e múltiplo é mostrado na Figura 2.10. Ocorreu em São José dos Campos, às 20:31.35 (UT) de 11 de março de 2007, entre 11 e 14 km do sistema de medição. Foram registradas quatro descargas de retorno, indicadas na figura por DR.

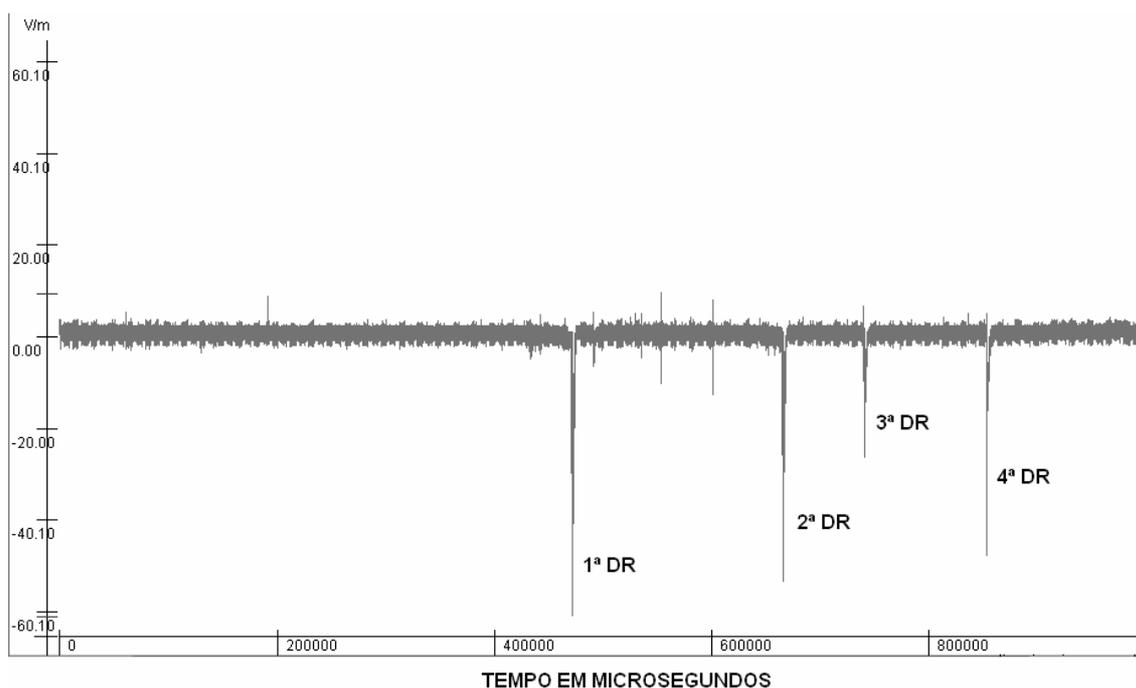


Figura 2.10 - Forma de onda do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo e múltiplo típico. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

2.4.1 – QUEBRA DA RIGIDEZ

Durante o processo de quebra de rigidez, os pulsos característicos são bipolares. A polaridade inicial desses pulsos normalmente é a mesma do pulso do campo elétrico da descarga de retorno seguinte. Possuem duração total de aproximadamente 1 ms. Rakov e Uman (2003) observaram que ocorrem em média dez pulsos com duração de 20 μ s a 40 μ s cada um, separados entre si por um intervalo de 70 μ s a 130 μ s.

2.4.2 – LÍDER ESCALONADO

Após a ocorrência dos pulsos devidos a quebra de rigidez pode ocorrer um intervalo relativamente sem perturbações. Imediatamente anterior à primeira

descarga de retorno e a algumas descargas de retorno subsequentes, ocorrem os pulsos de campo elétrico referentes ao líder escalonado. São unipolares, com duração total de 1 μs a 2 μs , e intervalo entre pulsos de 15 a 25 μs . O pico do pulso aumenta à medida que o líder se aproxima do solo. O último pulso do líder escalonado é geralmente o maior, e seu pico, em média, é cerca de 10% do pico do pulso da descarga de retorno (Rakov e Uman, 2003).

A Figura 2.11 é um exemplo da variação do campo elétrico devido à quebra da rigidez preliminar e ao líder escalonado, que antecederam a primeira descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido em São José dos Campos.



Figura 2.11 – Variação do campo elétrico devido à quebra de rigidez preliminar e ao líder escalonado, que antecederam a descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

2.4.3 – DESCARGA DE RETORNO

As descargas de retorno são as maiores fontes de radiação eletromagnética de um relâmpago e parte dela encontra-se na faixa visível do espectro luminoso.

O tempo em que a forma de onda da radiação emitida (campos elétrico e magnético) leva para variar desde o seu início até o seu valor de pico, é basicamente conhecido como **tempo de subida**. A duração do pulso de radiação é basicamente conhecida como **largura do pulso** de radiação. Estes parâmetros são importantes, pois são grandezas que caracterizam a forma de onda da radiação, e do ponto de vista prático, são utilizados na detecção das descargas de retorno pelos sistemas de detecção de relâmpagos.

Rakov e Uman (2003), através da Figura 2.12, apresentam detalhes típicos da forma de onda do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo. Em (a) é mostrado a primeira descarga de retorno; em (b), uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo-escalonado; em (c) tem-se uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo. Cada forma de onda é mostrada em duas escalas de tempo, 5 us por divisão e 10 us por divisão. Os campos são normalizados para uma distância de 100 km, e cada forma de onda é apresentada em duas escalas de tempo - 5 us por divisão e 10 us por divisão.

O pulso da descarga de retorno possui uma “Frente Lenta” – indicada na Figura 2.11 por F – que cresce em poucos microssegundos, alcançando uma parcela considerável do valor do campo elétrico. Entre 2,9 μ s a 5 μ s, o campo atinge de 30% a 50% de seu pico. A frente lenta é seguida por uma “Transição Rápida” – indicada na Figura 2.11 por R – com 0,1 μ s em média e que alcança o valor máximo do pico de do campo elétrico. Pequenos pulsos característicos do líder escalonado (L) antecedem a frente lenta. Após a transição rápida ocorrem picos secundários (α) e picos secundários maiores (a, b, c).

Rakov e Uman (2003) acrescentam ainda que os campos elétricos das descargas subsequentes têm uma transição rápida similar à da primeira descarga de retorno, enquanto que as frentes lentas são de menor duração – entre 0,5 μs a 1 μs – e compreende aproximadamente 20% do pico de campo.

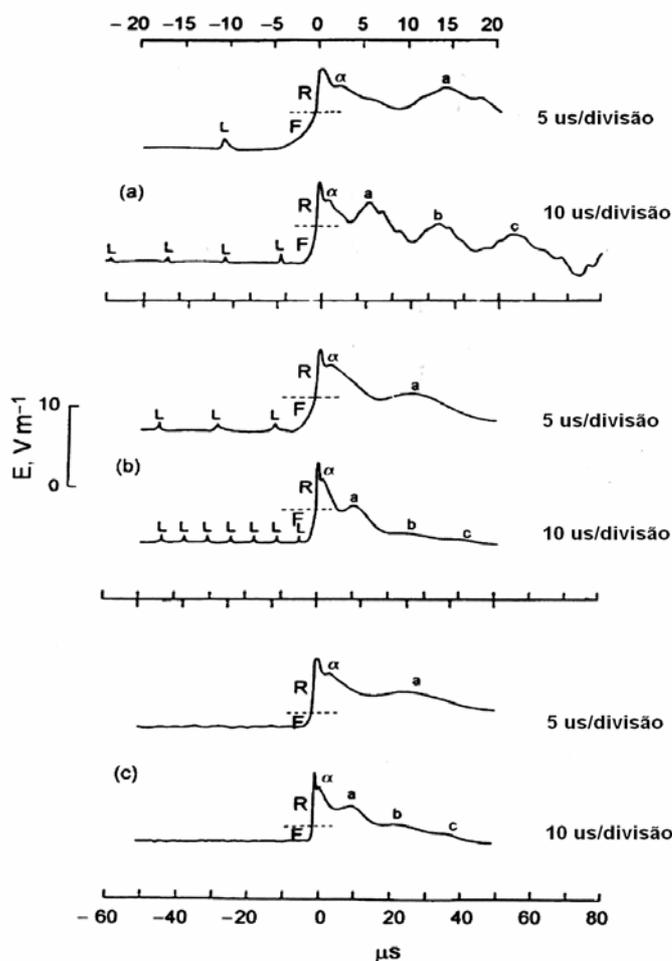


Figura 2.12 - Formas de onda do campo elétrico da descarga de retorno de um raio negativo. Em (a) é mostrado a primeira descarga de retorno; em (b), uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo-escalonado; em (c) tem-se uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo. L indica os pulsos individuais do líder escalonado, F a frente lenta e R a transição rápida, α são picos secundários, e os picos subsidiários maiores são indicados por a, b, c. Fonte : Adaptada de Rakov e Uman (2003).

A Figura 2.13 é referente a um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido em São José dos Campos, às 19:40.43 (UT) de 15 de fevereiro de 2007, a 62 km do sistema de medição. Ela confirma os estudos de Rakov e Uman (2003) resumidos na Figura 2.11. É possível observar uma pequena frente lenta (F), a transição rápida (R), o pico secundário (α) e os picos subsidiários (a, b, c, d). A escala de tempo é de 40 μ s/divisão e o sinal de campo elétrico foi obtido adotando-se a convenção de que o campo elétrico atmosférico de tempo bom é para cima e positivo, de maneira que, a variação de campo elétrico ambiente (campo elétrico da nuvem de tempestade superposto ao campo elétrico de tempo bom) devido ao relâmpago negativo, seja negativa

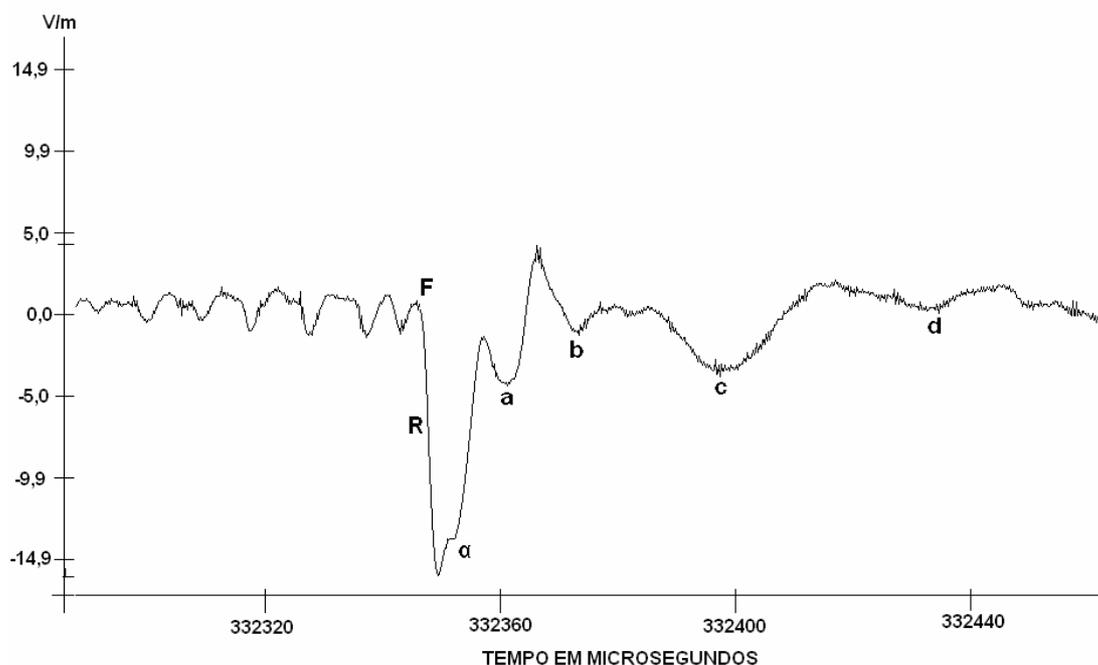


Figura 2.13 - Forma de onda do campo elétrico correspondente a primeira descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo. Nota-se a presença de uma pequena frente lenta (F), de uma transição rápida (R), do pico secundário (α), e dos picos subsidiários (a, b, c, d). A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

A Figura 2.14, de Campos et al. (2006), mostra a forma de onda do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido a 10 km do local de medição, assim como as imagens do mesmo relâmpago. A indicação (1) é referente instante imediatamente anterior ao processo de quebra de rigidez inicial; (2) a (8) são relativas à quebra de rigidez inicial e ao líder escalonado, e (9) e (10) à primeira descarga de retorno.

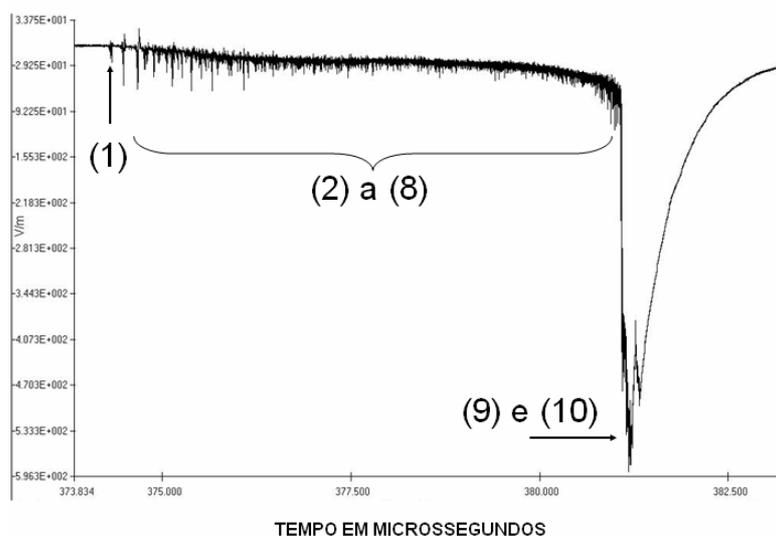


Figura 2.14 – Forma de onda do campo elétrico e imagens de um relâmpago nuvem-solo negativo. As indicações são referentes a: (1) ao momento da quebra de rigidez; (2) a (8) ao líder escalonado, e (9) e (10) à primeira descarga de retorno (continua).

Fonte : Campos et al. (2006).

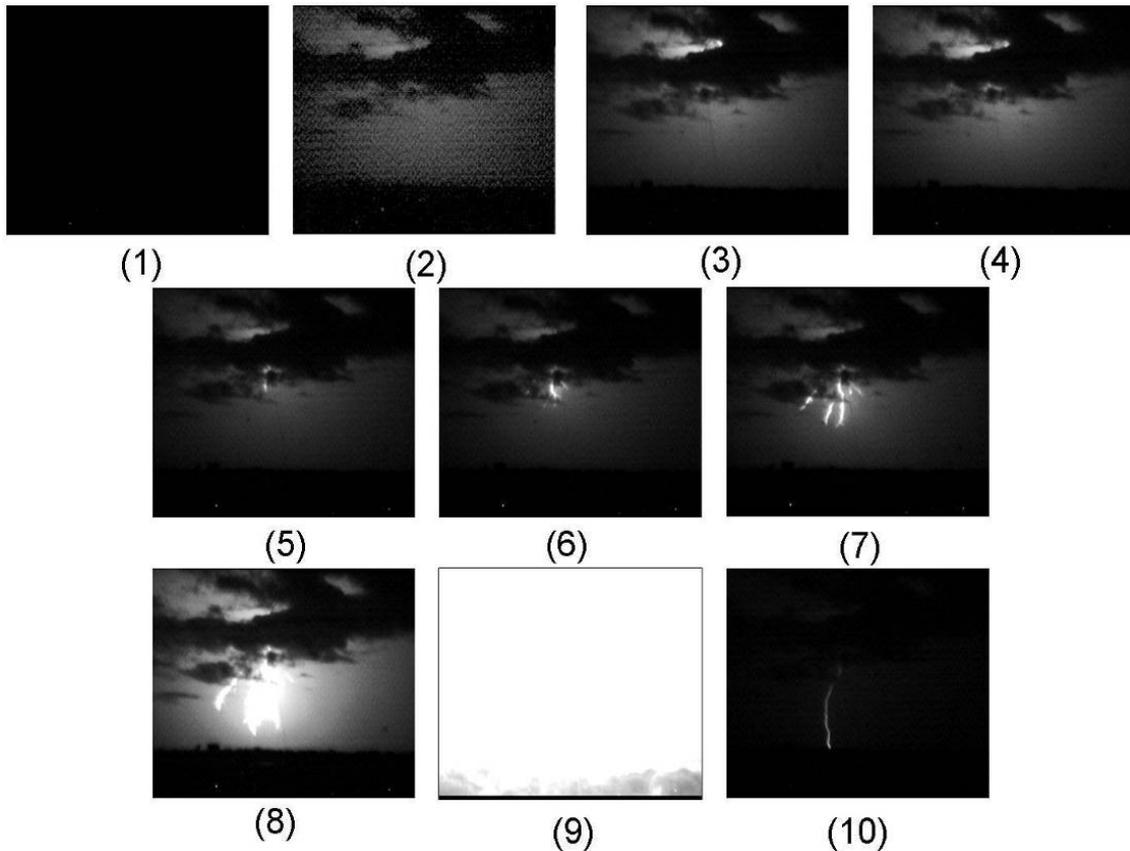


Figura 2.14 – (continuação).

2.4.4 – LÍDER SUBSEQUENTE

Antecedendo as descargas de retorno subsequentes, ocorrem os pulsos de campo elétrico devido ao líder subsequente, que pode ser contínuo ou contínuo-escalonado, se um novo caminho para escoamento das cargas for utilizado. São pulsos regulares de duração média entre 1 μ s a 2 μ s.

A Figura 2.15 mostra a forma de onda do campo elétrico da terceira descarga subsequente de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido em Uruguaiiana, às 22:42.14 UT de 30 de março de 2007, a 20 km do sistema de medição. Nela aparecem também os pulsos devido à quebra de rigidez, ao líder subsequente, que antecederam a terceira descarga de retorno. A existência de pulsos de

quebra de rigidez é um indício de que esta descarga iniciou um novo caminho em direção ao solo.

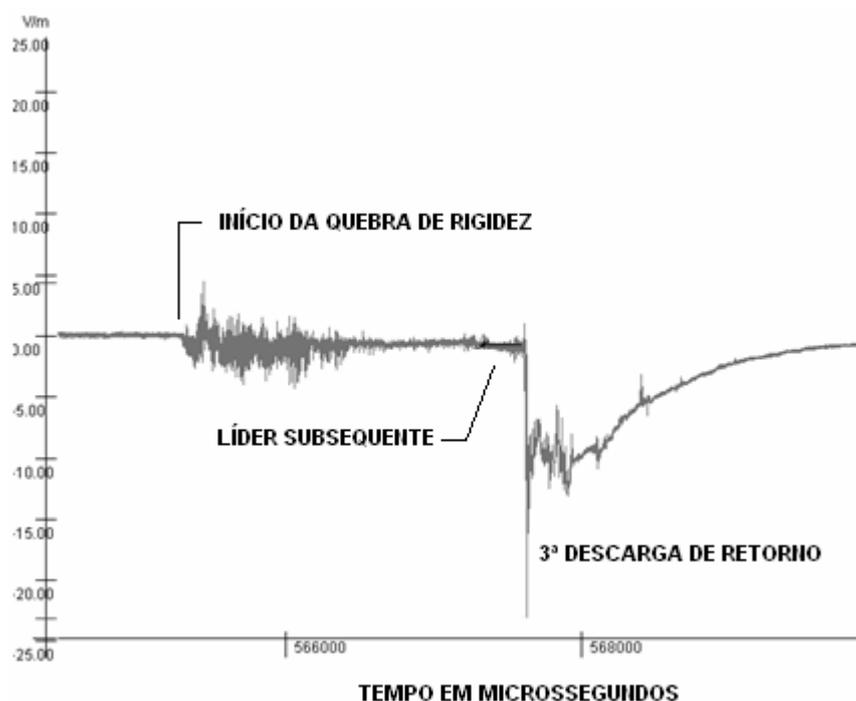


Figura 2.15 – Variação do campo elétrico devido à quebra de rigidez preliminar e do líder subsequente, que antecederam a terceira descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo múltiplo típico. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

2.4.5 – CORRENTE CONTÍNUA

A incidência da corrente contínua imediatamente após uma descarga de retorno subsequente em relâmpago nuvem-solo múltiplo gera uma variação de campo elétrico prolongada e vagarosa, de mesma polaridade da descarga que a precedeu.

A Figura 2.16 mostra a variação do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido às 18:48 (UT), do dia 20 de março de 2008, em São José dos Campos. Foi obtida através de um sensor de campo eletromagnético

lento desenvolvido pelo grupo ELAT do INPE. Pode-se notar que se trata de um relâmpago múltiplo, com cinco descargas, sendo que a última delas é precedida de corrente contínua.

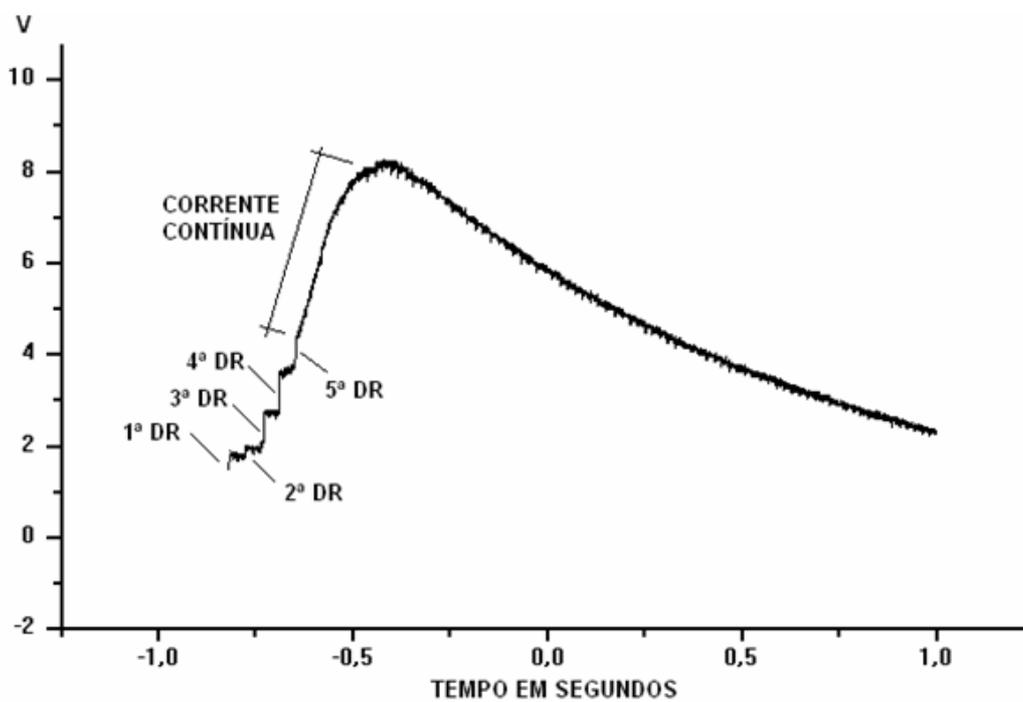


Fig. 2.16 – Variação do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo com cinco descargas de retorno (DR), obtido através de um sensor de campo lento. Nota-se a presença de corrente contínua após a quinta descarga. O campo elétrico negativo segue a mesma convenção do campo atmosférico e está orientado para cima.

Em Rakov e Uman (2003) consta que pesquisadores observaram que: (i) descargas de relâmpagos nuvem-solo negativos, seguidas de corrente contínua longa, tendem a apresentar um pico de campo elétrico menor que o normal; (ii) descargas que precedem uma corrente contínua longa, tendem a ter um pico de campo elétrico maior que o normal; (iii) descargas que iniciam uma corrente contínua longa são normalmente precedidas de um intervalo de tempo entre descargas relativamente menor que o regular.

2.4.6 – COMPONENTE M

Componentes M são intensificações rápidas da corrente contínua com o consequente aumento da luminosidade do canal do relâmpago e perturbações do campo elétrico.

A Figura 2.17 mostra a variação da luminosidade do canal de um relâmpago, obtida através do algoritmo desenvolvido pelo grupo ELAT do INPE, que analisa a imagem digital capturada por uma câmara de vídeo de alta resolução. Nota-se a presença da corrente contínua e suas componentes M precedendo a forte luminosidade causada pela descarga de retorno. Como a luminosidade do canal é diretamente proporcional à corrente que flui através dele, é possível inferir a curva de variação do campo elétrico.

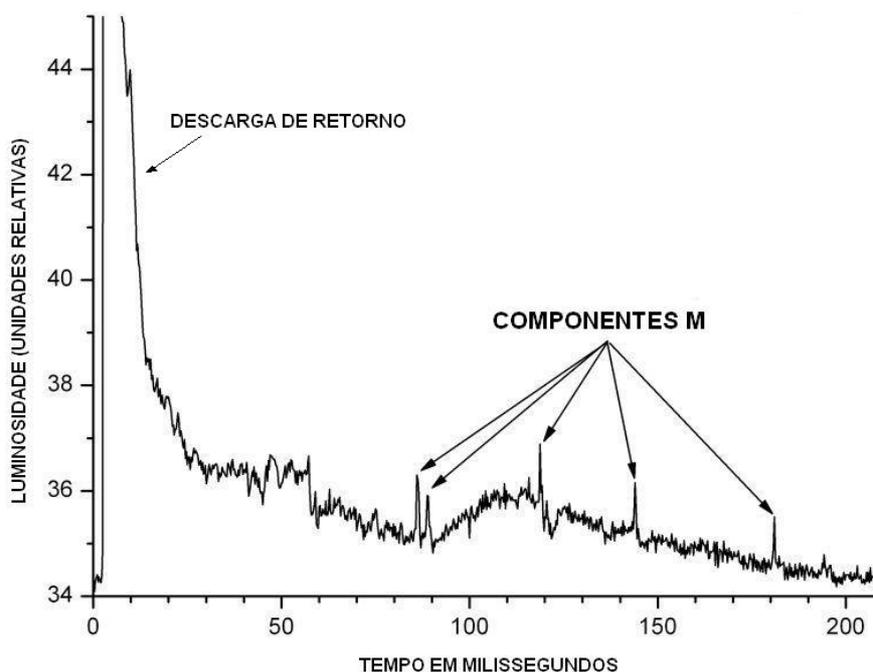


Fig. 2.17 – Variação da luminosidade do canal de um relâmpago, devido à corrente contínua e suas componentes M, que precederam a descarga de retorno.

2.4.7 – DESCARGA K

As descargas K ocorrem entre as descargas de retorno, ou mesmo após a última delas, e ocasiona uma variação rápida de campo elétrico durante alguns milissegundos a dezenas de milissegundos.

A Figura 2.18 é um exemplo destas descargas, ocorridas em um relâmpago nuvem-solo negativo detectado em São José dos Campos, às 20:27.20 (UT) de 11 de março de 2007, distante 20 km do sistema de medição. Esse registro da variação do campo elétrico mostra três descargas de retorno, a quebra de rigidez preliminar que antecede a primeira descarga, e as descargas K ocorridas entre as descargas de retorno e também após a última delas.

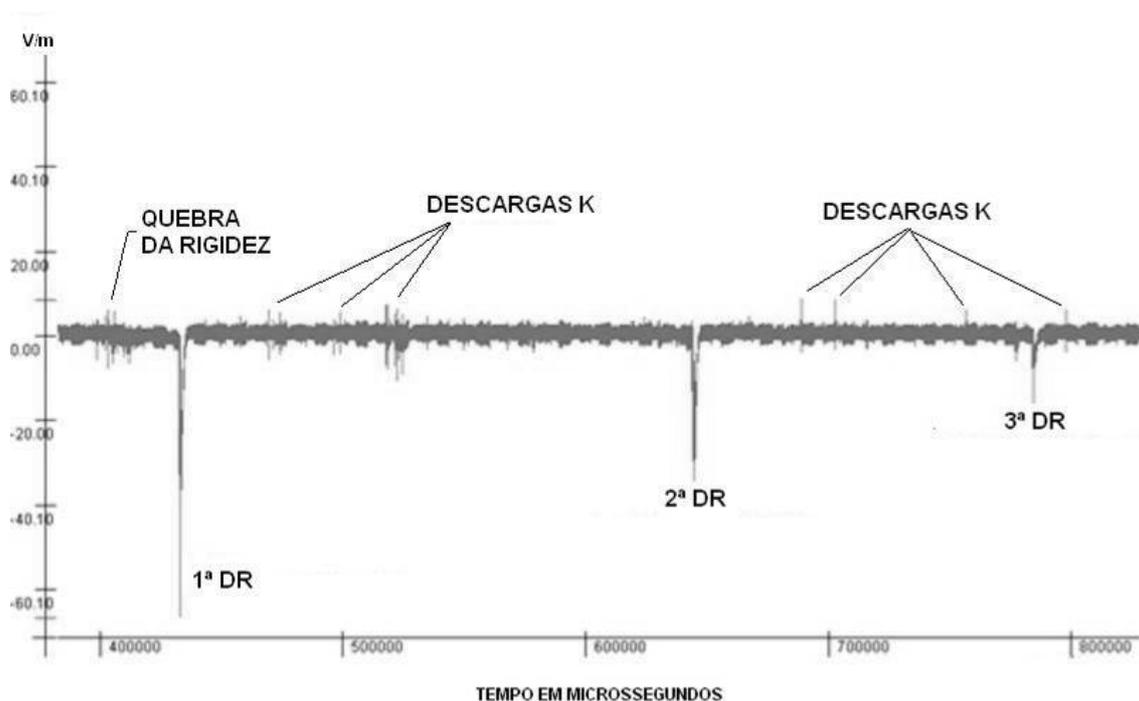


Fig. 2.18 – Exemplo da variação do campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, devida às três descargas de retorno (DR), à quebra de rigidez preliminar, e às descargas K. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

2.5 – FREQUÊNCIA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE UM RELÂMPAGO NUVEM-SOLO

Durante as diversas etapas de um relâmpago são geradas formas de onda de campo eletromagnético distintas que apresentam emissões de radiação numa ampla faixa de frequência que varia de alguns hertz até centenas de megahertz.

Neste trabalho, denominaremos: a faixa de frequência de 1 Hz a 1000 Hz como VLF (*very low frequency*), entre 1 kHz e 100 kHz como LF (*low frequency*) e entre 1 MHz e 100 MHz como VHF (*very higt frequency*).

A Tabela 2.2, fixa a faixa de valores típicos de frequência da radiação do campo elétrico para as diversas etapas de um relâmpago nuvem-solo.

Tabela 2.2 – Faixa de valores típicos da frequência da radiação do campo elétrico para as diversas etapas de um relâmpago nuvem-solo.

ETAPA	FAIXA DE VALORES TÍPICOS
Quebra de Rigidez	Centenas de kHz a centenas de MHz
Líder Escalonado	Alguns MHz a centenas de MHz
Líder Conectante	Alguns MHz a centenas de MHz
Descarga de Retorno	Alguns Hz a dezenas de kHz
Descarga K	Centenas de kHz a centenas de MHz
Líder Contínuo	Centenas de MHz
Descarga de Retorno Subsequente	Alguns Hz a dezenas de kHz
Corrente Contínua	1 a centenas de Hz
Componente M	Centenas de Hz

2.6 – MULTIPLICIDADE

A Tabela 2.3, elaborada por Miranda (2004) reuniu resultados de trabalhos a respeito de valores de multiplicidade dos relâmpagos, em função da técnica de observação utilizada. Pode-se observar que a multiplicidade varia de acordo com a técnica de observação. Valores médios de multiplicidade de relâmpagos negativos obtidos através registros fotográficos ou de vídeo variam entre 3,0 e 6,4, enquanto que valores obtidos através de registros de campo elétrico variam entre 2,1 e 2,9. Os valores médios obtidos apenas por registros de derivada de campo elétrico variam entre 5,1 e 5,7.

Tabela 2.3 – Multiplicidades obtidas por diferentes técnicas de observação.

Fonte: Miranda (2004).

Autor	Técnica utilizada	Multiplicidade (M)
Kitagawa et al. (1962) Socorro, Novo México	Registros de campo elétrico e fotográfico (193 relâmpagos)	$\langle M \rangle = 6,4$
Thomson et al. (1984) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (105 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 4,6$
Rakov et al. (1994) Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (76 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 4,6$
Diendorfer et al. (1998a) Áustria	Registros feitos pelo ALDIS (SDR austriaco) (46.420 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 2,7$
Pinto et al. (1999) Região sudeste do Brasil	Registros feitos pelo SDR brasileiro. Cerca de 1,1 milhões de relâmpagos (positivos e negativos)	$\langle M \rangle = 2,9$ (relâmpagos negativos) $\langle M \rangle = 2,2$ (relâmpagos positivos)
Pinto et al. (1999) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (24 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 5,1$
Miranda (2000) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (28 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 5,7$
Ferraz (2001) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (525 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 2,7$
Saba et al. (2004) São José dos Campos, Brasil	Câmera rápida (98 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 3,8$
Orville e Huffines (2001) EUA	Registros feitos pelo NLDN (SDR norte-americano). Acima de 216 milhões de relâmpagos ocorridos entre 1989 e 1998.	$\langle M \rangle_{\text{mensal}} = 2,1$ a $2,5$ (para relâmpagos negativos) $\langle M \rangle_{\text{mensal}} = \text{cerca de } 1,2$ (para relâmpagos positivos)

As referências dos trabalhos citados na Tabela 2.3 encontram-se em Miranda (2004).

Segundo Rakov et al. (1994) a multiplicidade independe da localidade geográfica.

Naccarato (2001) analisou relâmpagos ocorridos na região sudeste do Brasil durante os anos de 1999 e 2000 e encontrou valores de multiplicidade iguais a 1,7 para relâmpagos negativos e 1,05 para relâmpagos positivos, não observando variações sazonais significativas da multiplicidade.

Resultados de alguns outros trabalhos, utilizando-se de medições de campo elétrico, assim como este, a respeito de valores de multiplicidade estão resumidos na Tabela 2.4. A multiplicidade média para estes estudos é de 3,6.

Tabela 2.4 – Multiplicidades obtidas neste trabalho e em outros estudos.

Estudo	Local	Quantidade de relâmpagos	Multiplicidade Média	Relâmpagos simples (%)
Presente trabalho	S. J. Campos - Brasil	410	3,2	37
	Uruguaiana - Brasil	267	3,5	25
Saba et al. (2006)	S. J. Campos e Cachoeira Paulista - Brasil	233	3,8	20
Rakov et al. (1994)	Tampa - EUA	76	4,6	17
Saraiva et al. (2008)	Tucson - EUA	242	3,9	19
Schulz e Diendorfer (2006)	Bad Vöslau - Áustria	220	2,3	58
Cooray e Perez (1994)	Uppsala - Suécia	137	3,4	18

2.7 – INTERVALO DE TEMPO ENTRE DESCARGAS DE RETORNO

Outro parâmetro bastante observado nos relâmpagos é a distribuição dos intervalos de tempo entre descargas de retorno, pois trata-se de um dos critérios utilizados pelos sistemas de medição para definir o agrupamento das descargas detectadas.

A Tabela 2.5, elaborada por Miranda (2004), resume resultados de observações obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. O símbolo “< >” indica média aritmética e o sub índice “g” indica média geométrica. Observa-se que, o intervalo médio entre descargas dura cerca de várias dezenas de milissegundos, muito embora intervalos da ordem de algumas centenas de milissegundos tem sido observados.

As referências dos trabalhos citados na Tabela 2.5 encontram-se em Miranda (2004).

Ainda, segundo Miranda (2004), há uma controvérsia com relação à dependência ou não dos intervalos de tempo entre descargas; assume-se, entretanto, que os tempos entre descargas de retorno não dependem da sua ordem.

Tabela 2.5 – Intervalos de tempo entre descargas de retorno.
 Fonte: Miranda (2004)

Autor	Técnica utilizada	Tempo entre DR's (t)	Dependência com a ordem da DR
Schonland (1956) África do Sul	Registro de campo elétrico (1482 relâmpagos)	$\langle t \rangle = 63,0 \text{ ms}$ $t_g = 51,0 \text{ ms}$	Não
Kitagawa e Kobayashi (1958) Kanto - Japão	Registro de campo elétrico (102 relâmpagos)	--	Sim
Thomson et al. (1984) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (105 relâmpagos)	$\langle t \rangle = 90,0 \text{ ms}$ $t_g = 69,0 \text{ ms}$	Não (Log normal)
Rakov e Uman (1990a) e Rakov et al. (1990) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (76 relâmpagos)	$t_g = 60,0 \text{ ms}$	--
Ferraz (2001) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (525 relâmpagos negativos)	$\langle t \rangle = 74,0 \text{ ms}$	Não (Log normal)
Miranda et al. (2003) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (26 relâmpagos negativos)	$t_g = 49,6 \text{ ms}$	Não (Log normal)
Saba et al. (2004) São José dos Campos, Brasil	Registros feitos por câmera rápida (98 relâmpagos negativos)	$\langle t \rangle = 90,0 \text{ ms}$ $t_g = 67,0 \text{ ms}$	--

Miranda (2003), através de medições de campo elétrico em São José dos Campos de 26 relâmpagos nuvem-solo negativos, com 131 descargas de retorno, encontrou os seguintes valores para o intervalo entre descargas de retorno: 69 ms para a média aritmética e 49,6 ms para a média geométrica. Observou também que: (a): não houve dependência do tempo do intervalo com a ordem da descarga; (b): a distribuição do tempo do intervalo entre descargas seguiu uma curva lognormal; (c): seus resultados foram semelhantes aos realizados em outras regiões.

Por outro lado, Saraiva (2008), utilizando imagens de vídeo encontrou em Tucson (EUA), os seguintes valores para o intervalo de tempo entre descargas de retorno de raios negativos: média aritmética igual a 89 ms e média geométrica igual a 61 ms. Esses valores foram próximos ao encontrados por Saba et al. (2006), utilizando a mesma técnica na região sudeste do Brasil. Os valores verificados foram: média aritmética igual a 83 ms e média geométrica igual a 61 ms.

2.8 – TEMPO DE SUBIDA DAS DESCARGAS DE RETORNO

Segundo Miranda (2004), o tempo de subida de uma descarga de retorno pode ser definido como:

- **tempo de subida 10%-90%** (lê-se 10 a 90%), que é corresponde ao tempo em que o pulso leva para variar desde 10% até 90% do valor do pico de campo elétrico;
- **tempo de subida 0-Ep** (lê-se zero até o pico de campo elétrico ou simplesmente zero a pico), que corresponde ao tempo em que o pulso de campo elétrico leva para variar desde o limiar de ativação dos sensores dos sistemas de medição, até o valor de pico.

A Tabela 2.6, elaborada por Miranda (2004) resume resultados de observações de tempos de subida obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. Nota-se que o valor médio para o tempo de subida é cerca de alguns microssegundos e que estes valores para primeiras descargas de retorno são superiores aos valores devidos às descargas subseqüentes. Observa-se ainda, que os valores obtidos pela definição 0-Ep são geralmente maiores do que o valor obtido pela definição 10-90%. Independente da estação do ano (verão ou inverno), os raios positivos apresentam tempos de subida médios superiores aos apresentados pelos raios negativos. As descargas de retorno dos raios negativos possuem, no verão, tempos de subida médios

superiores aos verificados no inverno. Por outro lado, os raios positivos apresentam, no verão, valores inferiores aos apresentados no inverno.

Miranda (2004) encontrou o valor médio de 6,4 μs para o tempo de subida dos pulsos das descargas de retorno, sem distinção entre primeiras descargas e descargas subsequentes.

Tabela 2.6 – Tempos de subida das descargas de retorno.
Fonte: Miranda (2004)

Autor	Técnica utilizada	Tempo de Subida - TS (μs)
Tiller et al. (1976) Flórida	Registros de campo elétrico (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 3,0 \mu\text{s}$ (62 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 2,6 \mu\text{s}$ (151 DR's subsequentes)
Fisher e Uman (1972) Pensilvânia	Registros de campo elétrico e vídeo (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 3,6 \mu\text{s}$ (26 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 3,1 \mu\text{s}$ (26 DR's subsequentes)
Lin e Uman (1973) Flórida	Registros de campo elétrico (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 4,0 \mu\text{s}$ (12 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 1,2 \mu\text{s}$ (83 DR's subsequentes)
Master et al. (1984) Flórida	Registros de campo elétrico (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 4,4 \mu\text{s}$ (105 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 2,8 \mu\text{s}$ (220 DR's subsequentes)
Master et al. (1984) Flórida	Registros de campo elétrico (10%-90%)	$\langle TS \rangle = 2,6 \mu\text{s}$ (105 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 1,5 \mu\text{s}$ (220 DR's subsequentes)
Diendorfer et al. (1998a) Áustria	Registros feitos pelo ALDIS (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 8,0 \mu\text{s}$ (13640 DR's de relâmpagos simples) $\langle TS \rangle = 8,9 \mu\text{s}$ (13115 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 8,3 \mu\text{s}$ (9899 DR's subsequentes)
Naccarato (2001) Brasil	Registros feitos pelo SDR (0- E_p)	$\langle TS \rangle = 4,9 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no verão) $\langle TS \rangle = 4,25 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no inverno) $\langle TS \rangle = 6,52 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no verão) $\langle TS \rangle = 7,11 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no inverno)

As referências dos trabalhos citados na Tabela 2.6 encontram-se em Miranda (2004).

2.9 – LARGURA DE PULSO DAS DESCARGAS DE RETORNO

Segundo Miranda (2004), a largura de pulso de uma descarga de retorno pode ser definido como:

- o tempo entre o início da descarga, a partir do ruído de fundo presente no registro de campo elétrico e o primeiro instante após o pico da descarga, em que o campo retorna ao valor inicial;
- a diferença entre o instante do pico de campo elétrico da descarga e o primeiro instante após o pico da descarga, em que o campo retorna ao valor inicial.

Essa segunda definição de largura de pulso é geralmente usada quando se trata de sistemas de detecção, onde esse parâmetro é utilizado no algoritmo de discriminação da forma de onda de um pulso da descarga do relâmpago, com o objetivo de distinguir as formas de onda como sendo devidas à descargas de retorno em raios ou devidas a descargas intranuvens.

A Tabela 2.7, elaborada por Miranda (2004) resume resultados de observações de largura de pulso (LP) obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. O símbolo “< >” indica média aritmética.

Pela Tabela 2.7 pode-se observar que a largura dos pulsos dura cerca de várias dezenas de microssegundos. Além disso, os valores médios das larguras de pulso das primeiras descargas de retorno são superiores aos valores médios das subseqüentes. Os valores apresentados na Tabela 2.7 variam entre 50 μ s e 90 μ s para primeiras descargas e entre 30 μ s e 50 μ s para descargas subseqüentes.

Miranda (2004) encontrou o valor médio de 43 μs para a largura dos pulsos das descargas de retorno, sem distinção entre primeiras descargas e descargas subsequentes

Tabela 2.7 – Largura de pulso das descargas de retorno.
Fonte: Miranda (2004)

Autor	Técnica utilizada	Largura de Pulso – LP (μs)
Taylor (1963) Oklahoma	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 53 \mu\text{s}$ (47 primeiras e subsequentes DR's)
Lin et al. (1979) Flórida	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 60 \mu\text{s}$ (7 primeiras DR's ocorridas a 50 km do observador) $\langle LP \rangle = 44 \mu\text{s}$ (20 DR's subsequentes ocorridas a 50 km do observador) $\langle LP \rangle = 54 \mu\text{s}$ (46 primeiras DR's ocorridas a 200 km do observador) $\langle LP \rangle = 36 \mu\text{s}$ (77 DR's subsequentes ocorridas a 200 km do observador)
Cooray e Lundquist (1985) Suécia	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 49 \mu\text{s}$ (102 primeiras DR's) $\langle LP \rangle = 39 \mu\text{s}$ (94 DR's subsequentes)
Cooray e Lundquist (1985) Sri Lanka	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 89 \mu\text{s}$ (91 primeiras DR's) $\langle LP \rangle = 42 \mu\text{s}$ (143 DR's subsequentes)
Cooray e Lundquist (1985) Sri Lanka	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 13 \mu\text{s}$ (26 pulsos de descargas IN)
Naccarato (2001) Brasil	Registros feitos pelo SDR (Segunda definição)	$\langle LP \rangle = 20,18 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no verão) $\langle LP \rangle = 20,00 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no inverno) $\langle LP \rangle = 18,15 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no verão) $\langle LP \rangle = 18,51 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no inverno)

As referências dos trabalhos citados na Tabela 2.7 encontram-se em Miranda (2004).

2.10 – RELAÇÃO ENTRE PICO DE CORRENTE E PICO DE CAMPO ELÉTRICO DAS DESCARGAS DE RETORNO

Vários estudos teóricos sobre a relação entre o pico de corrente e o pico de campo elétrico das descargas de retorno foram desenvolvidos. Esses estudos são modelos matemáticos que representam a corrente no canal da descarga de retorno.

O modelo desenvolvido por Uman et al. (1975), denominado Modelo de Linha de Transmissão, considera o canal do relâmpago como sendo uma linha de transmissão por onde propaga-se a corrente da descarga de retorno e ocorre emissão de radiação. Neste modelo as aproximações feitas são: canal reto e vertical, velocidade constante para a descarga e condutividade infinita para o solo. As equações apresentadas foram obtidas a partir das equações de Maxwell e relacionam os campos elétrico e magnético com a corrente em função do tempo e da altura no canal.

Segundo Uman et al. (1975), para grandes distâncias, geralmente muito maiores do que a altura do canal do relâmpago, predomina a componente de radiação. Neste caso, as formas de onda de campo elétrico e magnético possuem o mesmo formato da forma de onda da corrente que viaja no canal, e a relação entre os campos e a corrente é linear. Porém, para pequenas distâncias a componente eletrostática do campo elétrico gerado pela descarga predomina e a relação entre as formas de onda da corrente e do campo elétrico

3 - INSTRUMENTAÇÃO

É possível estimar os campos eletromagnéticos gerados por um raio incidente a uma distância conhecida, a partir das equações de Maxwell, desde que se assuma um modelo matemático para a corrente que flui pelo canal e outro modelo para a propagação da radiação, levando-se em conta que para diferentes faixas de frequência a radiação se propaga de diferentes formas. Na faixa VLF a radiação se propaga através de múltiplas reflexões entre o solo e a base da ionosfera; na faixa LF a propagação é pelo solo, e em VHF a radiação segue pela atmosfera de forma direta. Segundo Pinto Jr. (2005), a partir de 50 km de distância, os efeitos de propagação da radiação passam a ser mais significativos.

Uma maneira de se determinar o campo elétrico variável gerado por um relâmpago é através da medição da diferença de potencial entre uma antena e o solo.

3.1. – EQUIPAMENTOS PARA COLETA DOS DADOS

Os equipamentos utilizados para a coleta dos dados de campo elétrico gerados pelas descargas nuvem-solo estão representados nas Figuras 3.1 e 3.2

Essa instrumentação consiste em:

- um microcomputador com a interface modelo GPS 168 PCI da empresa Meinberg, para sincronismo temporal dos equipamentos, e a interface modelo NI PCI-6110 da empresa National Instruments para aquisição dos dados;
- um módulo de aquisição de dados modelo DAQ BOX NI BNC-2110 da empresa National Instruments, com 12 bits e 8 entradas analógicas;

- um módulo integrador / amplificador com ganho de 43,4 mV / (V/m);
- uma antena de GPS (*Global Positioning System*) da empresa Meinberg;
- uma antena plana de campo rápido com uma largura de banda que vai de 306 Hz a 1,5 MHz. Seus dados foram adquiridos com uma taxa de 5 MS/s (cinco megasamples por segundo), ou seja, cinco milhões de aquisições por segundo. A antena é conectada ao integrador / amplificador - e este ao módulo de aquisição – através de cabo coaxial tipo RG-58 com impedância de 50 Ohms.

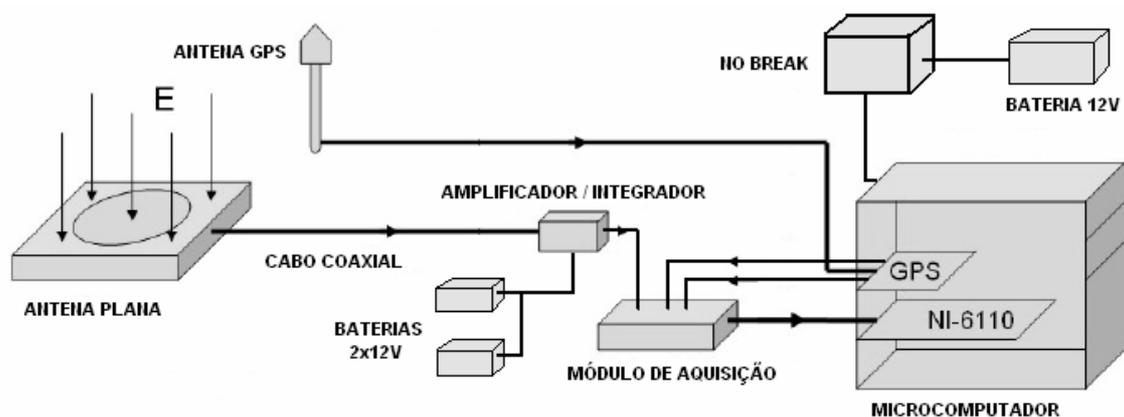


Figura 3.1 – Representação dos equipamentos utilizados para coleta dos dados de campo elétrico gerado por descargas nuvem-solo.

Fonte: Adaptada de Schulz et al. (2005).



a



b



c

Figura 3.2 – Imagens do sistema de medição. (a): antena plana, integrador / amplificador, antena GPS e baterias; (b): CPU com as interfaces de sincronismo e aquisição; (c) módulo de aquisição.

3.2 – PROGRAMAS PARA COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

- Meinberg Radio Clock Monitor versão 2.15, para sincronismo temporal dos equipamentos;
- Datalogger versão 2.0.2 para coleta dos dados;

- DataView versão 1.3 para visualização dos dados coletados;
- Microsoft Office Excel e Origin 8 para manipulação dos dados, cálculos e geração dos gráficos.

3.3 – FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA

- duas baterias seladas de 12V para alimentação do módulo integrador / amplificador;
- um *No Break* interligado a uma bateria automotiva de 12 V para alimentação do microcomputador e do monitor, com autonomia de aproximadamente 5 horas.

3.4 – REDE INTEGRADA NACIONAL DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os dados coletados foram comparados com aqueles disponibilizados pela RINDAT - Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas, atualmente ampliada e denominada BrasilDat. Trata-se de uma rede de sensores e centrais de análise que permitem detectar, em tempo real, raios em parte do território brasileiro. A Figura 3.3, extraída do portal ELAT, mostra a localização dos sensores da rede BrasilDat distribuídos pelo Brasil, e a área de abrangência da rede.

Os sensores captam a radiação eletromagnética em LF gerada pelas descargas, analisam os sinais recebidos e através de algoritmos específicos eliminam os sinais que não são descargas atmosféricas. Os sinais válidos (que consistem basicamente do horário do evento, a intensidade do sinal, o tempo

de subida e a largura de pulso do sinal) são então enviados à Central de Processamento, que compara os horários informados a fim de assegurar que os dados sejam de um mesmo evento e, em seguida, calcula a localização ótima do ponto de impacto daquele raio. Além da posição geográfica, o sistema pode inferir vários outros parâmetros do evento, tais como: polaridade e pico da corrente, multiplicidade, tempo de subida e largura do pulso da radiação, e desempenho do sistema. (Naccarato, 2005).



Figura 3.3 – Localização dos sensores e abrangência da rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDat.

Fonte: INPE / ELAT (2008).

A rede BrasilDat está baseada em duas técnicas de detecção, descritas a seguir:

a) Método da Direção Magnética (MDF - *Magnetic Direction Finding*): Esse método de detecção emprega duas bobinas ortogonais entre si, que medem a direção de uma descarga. Essas bobinas atuam como antenas que identificam a componente magnética em LF gerada pelo raio. Em função da intensidade da radiação recebida em cada bobina, determina-se a direção aproximada da ocorrência do raio, mais precisamente o azimute (ângulo em relação ao norte geográfico). Empregando-se três sensores compostos pelo par de bobinas, o erro na localização do ponto de contato da descarga de retorno com o solo é minimizado pelo processo de triangulação, conforme esquematizado na Figura 3.4 (Pinto Jr. 2005).

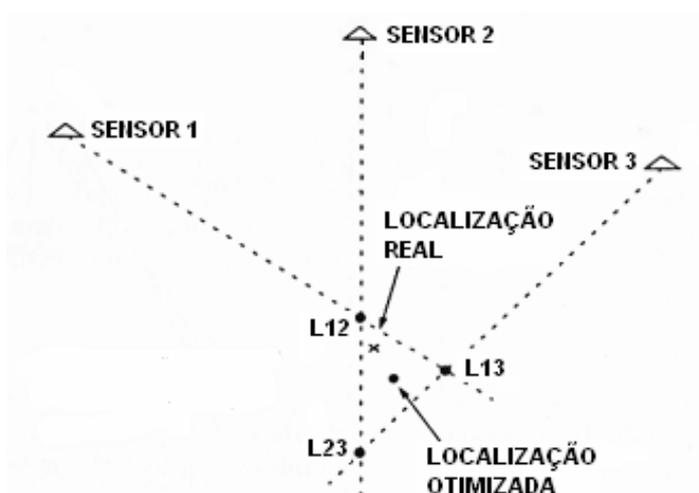


Figura 3.4 – Localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo através do método da direção magnética, utilizando-se 3 sensores. L12, L13 e L23 são as intersecções das direções indicadas pelos sensores.

Fonte: Adaptada de Pinto Jr. (2005).

b) Método do Tempo de Chegada (TOA - *Time of Arrival*): Esse método de localização dos pulsos de radiação da descarga de retorno compara o instante em que o pulso é registrado por diferentes sensores dispostos em diferentes distâncias do local de contato da descarga com o solo. A precisão temporal é obtida incorporando um sistema GPS. Nas faixas de VLF e LF, as distâncias representam os raios de círculos a partir do sensor correspondente até a possível localização do raio naquele instante. Com o uso de quatro sensores é possível, a partir da intersecção destes círculos, determinar a localização mais provável ponto de contato da descarga com o solo. A Figura 3.5 ilustra este método. Na faixa de VHF, essas distâncias são definidas como os raios de esferas a partir do sensor correspondente até a provável localização de descargas K no interior da nuvem, ou de líderes ao longo de seu trajeto pela atmosfera em direção ao solo. A intersecção das esferas dos quatro sensores determina o ponto no espaço de onde a radiação é proveniente.

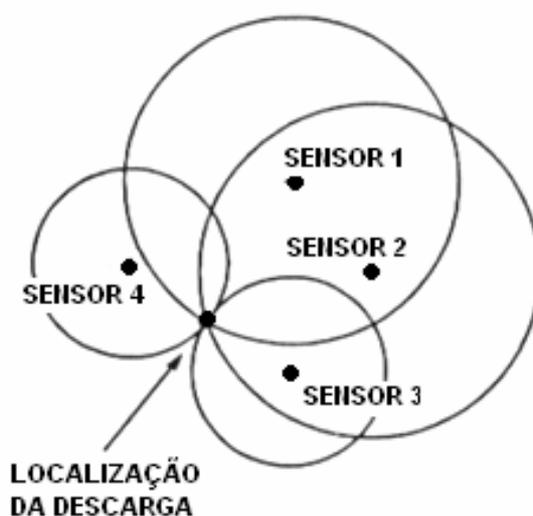


Figura 3.5 – Localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo através do método do tempo de chegada, utilizando-se 4 sensores.

Fonte: Adaptada de Pinto Jr.(2005).

3.4.1 – SENSORES INTEGRANTES DA REDE BrasilDat

A rede de detecção BrasilDat é composta por duas famílias de sensores, que utilizam apenas um ou os dois métodos de medição descritos acima. Essas famílias são:

a) LPATS (*Ligthing Position and Tracking System*): Esta família de sensores baseia-se na técnica do tempo de chegada (TOA) e operam na faixa de frequência LF para medição da componente elétrica da radiação de descargas atmosféricas (Pinto Jr., 2005).

b) IMPACT (*Improved Accuracy Using Combined Technology*): Esta família de sensores baseia-se tanto na técnica do tempo de chegada (TOA), quanto da direção magnética (MDF), operando na faixa de frequência LF para medição do campo elétrico da radiação de descargas atmosféricas, propiciando uma maior eficiência de detecção (Pinto Jr. 2005). Sua grande vantagem é a precisão, maior do que TOA e MDF separados (Cummins et al.. 1993), e a possibilidade de usar apenas dois sensores para localizar um raio sem ambigüidade.

A Tabela 3.1 mostra uma comparação simplificada entre os sensores LPATS e IMPACT. É possível verificar que existe uma clara vantagem dos sensores IMPACT por causa de sua precisão e quantidade de parâmetros fornecidos.

3.4.2 PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO DOS RAIOS

Segundo Pinto Jr. (2005), as incertezas na localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo se devem a erros randômicos associados a aspectos físicos, tais como condutividade do solo e o relevo, que afetam a propagação da radiação pelo solo, e a erros sistemáticos, associados aos sensores. Essas incertezas seguem uma distribuição gaussiana de

probabilidade, onde se define uma elipse de incerteza em torno da localização mais provável, para uma dada probabilidade p , normalmente adotada em 50%. A Figura 3.6 mostra esta elipse de incerteza. Quanto maior a probabilidade p de incerteza na localização, maior será a elipse. Por outro lado, quanto maior o número de sensores participantes da detecção da descarga, menor tende a ser a elipse de incerteza.

Tabela 3.1 – Principais características das famílias de sensores LPATS e IMPACT.

Fonte: Naccarato (2005).

	LPATS	IMPACT
Método de Detecção	TOA	TOA e MDF
Faixa de Operação	1,5 – 430 kHz	1 – 400 kHz
Eficiência de Detecção	85%	75% a 90% (dependendo do modelo)
Tipo de Sinal Detectado	Componente vertical do campo elétrico	Componente vertical do campo elétrico e as duas componentes ortogonais do campo magnético
Informação Temporal	Sim	Sim
Informação de Direção (Azimute)	Não	Sim
Parâmetros da Descarga (determinados no sensor)	Horário (ns), Intensidade do Sinal, Tempo de Subida, Largura de Pulso	Horário (ns), Intensidade do Sinal, Tempo de Subida, Largura de Pulso, Relação E/B (razão entre os picos do campo elétrico e campo magnético)
Discriminação de Descargas IN	Classifica as descargas como IN e NS	Classifica as descargas e rejeita ou não as IN conforme configuração
Discriminação de Ruído	Não	Sim (através da relação E/B)
Taxa de Contaminação Individual (erro intrínseco do sensor)	34%	de <1% a 5% (dependendo do modelo)

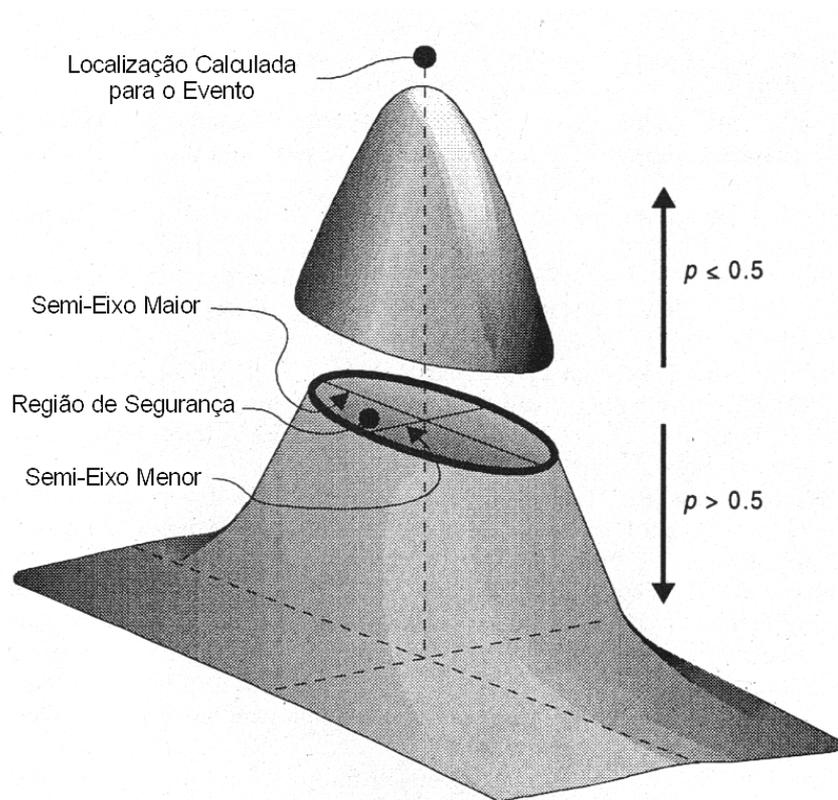


Figura 3.6 – Distribuição gaussiana dos erros de localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo, mostrando a posição estimada do evento no ponto de maior probabilidade (pico). A elipse de segurança de 50% de probabilidade é determinada pelo corte na distribuição no nível $p = 0,5$.

Fonte: Naccarato (2005).

3.4.3 – PARÂMETROS FÍSICOS DOS RAIOS

De acordo com Ballarotti (2005), os parâmetros físicos que os sensores enviam à central de processamento são:

- Data (mês/dia/ano),
- Horário (UT) com precisão de unidades de ns,
- Latitude e Longitude no solo (em graus decimais),
- Pico de corrente (kA) com polaridade,

- Intensidade do sinal eletromagnético normalizado pela distância,
- Tempo de subida do sinal (μs),
- Largura de pulso (μs),
- Máxima taxa de subida da corrente ($\text{kA}/\mu\text{s}$),
- Multiplicidade,
- Comprimento do maior semi-eixo da elipse de erro (km),
- Comprimento do menor semi-eixo da elipse de erro (km),
- Excentricidade da elipse de erro. É a razão entre semi-eixo maior e o menor,
- Ângulo de orientação da elipse de erro (graus),
- Tipo de informação usada no cálculo de localização da descarga, podendo ser uma combinação ângulo (A), sinal (X) ou tempo (T),
- Número de sensores participantes,
- Número de graus de liberdade usado para o cálculo da localização. Será zero se não houver informação redundante disponível e a posição não foi otimizada,
- “C” para relâmpagos na nuvem (*cloud*) e “G” para aqueles que envolvem o solo (*ground*),
- Valor quiquadrado referente à precisão na otimização da solução de localização da descarga.

Uma amostra destes parâmetros físicos que os sensores enviaram à central de processamento da Brasildat, em 02 de fevereiro de 2007, é apresentada na Figura 3.7.

02/15/07 00:02:02.650205000	-3.4741	-50.8540	+76.1	+411.2	2.4	6.8	46.1	1	0.7	0.3	2.3	86	xxT	6	3	C	0.4
02/15/07 00:02:03.008189354	-29.5354	-56.7861	+23.4	+126.7	6.6	11.8	0.0	1	2.4	0.5	4.8	34	AXT	6	5	G	3.1
02/15/07 00:02:04.623484172	-25.8702	-63.6593	+31.3	+169.1	1.4	23.2	0.0	1	4.7	0.7	6.7	87	AXT	5	4	G	1.0
02/15/07 00:02:05.039849250	-3.1994	-49.8088	+61.2	+330.9	1.7	11.2	50.5	1	0.4	0.3	1.3	72	xxT	6	3	C	0.6
02/15/07 00:02:08.134527400	-29.2763	-59.9398	+61.5	+332.2	3.8	51.2	0.0	1	41.3	1.6	25.8	59	xxT	6	3	G	4.5
02/15/07 00:02:08.748239600	-6.2565	-65.0507	+129.1	+697.6	5.9	19.2	21.4	1	11.4	1.1	10.4	93	xxT	5	2	G	1.8
02/15/07 00:02:09.266996233	-23.1798	-63.8903	+181.9	+983.4	5.0	51.2	0.0	1	6.8	0.9	7.6	90	AXT	8	8	G	8.5
02/15/07 00:02:09.357364900	-23.3677	-63.1341	+184.2	+995.8	7.0	51.2	0.0	2	2.1	0.4	5.2	72	AXT	17	17	G	6.2
02/15/07 00:02:09.465601316	-23.3643	-63.1451	+132.1	+714.2	11.0	16.4	0.0	0	2.2	0.4	5.5	73	AXT	14	14	G	5.2
02/15/07 00:02:09.615761250	-6.3779	-64.6357	+141.3	+763.6	6.8	9.2	23.4	1	9.9	1.0	9.9	92	xxT	6	3	C	5.8
02/15/07 00:02:11.275424144	-23.7922	-65.9563	+44.1	+238.6	2.2	2.8	0.0	1	13.4	0.8	16.8	100	AXT	3	3	G	5.3
02/15/07 00:02:13.853518429	-29.4129	-56.6436	-10.4	-56.2	3.2	30.2	-0.0	2	1.1	0.4	2.8	165	AXT	2	1	G	2.6
02/15/07 00:02:14.215915116	-29.4009	-56.5570	-30.3	-164.0	4.8	27.0	-0.0	0	3.0	0.6	5.0	91	AXT	3	2	G	1.3

OUI-QUADRADO

G (ground) OU C (cloud)

GRAUS DE LIBERDADE

QUANTIDADE DE SENSORES

INFORMAÇÃO PARA CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO

ÂNGULO DA ELIPSE

EXCENTRICIDADE DA ELIPSE

COMPRIMENTO DO SEMI-EIXO MENOR DA ELIPSE

COMPRIMENTO DO SEMI-EIXO MAIOR DA ELIPSE

MULTIPLICIDADE

MÁXIMA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE (KA/us)

LARGURA DO PULSO (us)

TEMPO DE SUBIDA (us)

INTENSIDADE DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

PICO DE CORRENTE (KA) E POLARIDADE

LONGITUDE

LATITUDE

HORARIO (H,M,S,nS)

DATA (M,D,A)

Figura 3.7 – Amostra dos parâmetros das descargas detectadas pelos sensores e enviados à central de processamento da BrasilDat, em 15 de fevereiro de 2007.

A multiplicidade, segundo Pinto Jr. (2005) é determinada adotando-se um critério de agrupamento das descargas de retorno de um raio, que considera a primeira descarga como aquela que não tenha nenhuma outra precedente em um intervalo de 500 ms. Então, considera-se que todas as descargas posteriores, dentro de um intervalo de um segundo, e que tenham sua localização mais provável a uma distância inferior a 10 km da localização mais provável da primeira descarga, pertencem ao mesmo raio. Se uma descarga estiver entre 10 km e 50 km de distância da primeira descarga, porém, com sua elipse de incerteza de 50% penetrando na região de abrangência de 10 km da primeira descarga, também será associada ao respectivo relâmpago. Seja o exemplo da Figura 3.8 (Pinto Jr. 2005), onde as descargas 2 e 3 são consideradas pertencentes ao mesmo raio da descarga 1, desde que os intervalos de tempo entre as descargas 1 e 2 e entre as descargas 2 e 3 sejam inferiores a 500 ms. Já as descargas que distam mais de 10 km da localização mais provável da primeira descarga de retorno e cuja elipse de incerteza de 50% não penetre na região de abrangência de 10 km da primeira descarga (descarga 4) ou aquelas que distam mais de 50 km da primeira descarga independentemente das suas elipses de incerteza (descargas 5 e 6) são consideradas pertencentes a outro raio. Neste algoritmo, apenas as descargas de mesma polaridade são consideradas, e a multiplicidade é limitada a 15, visto que raramente este valor é superado. Uma descarga de décima sexta ordem será considerada como um outro relâmpago.

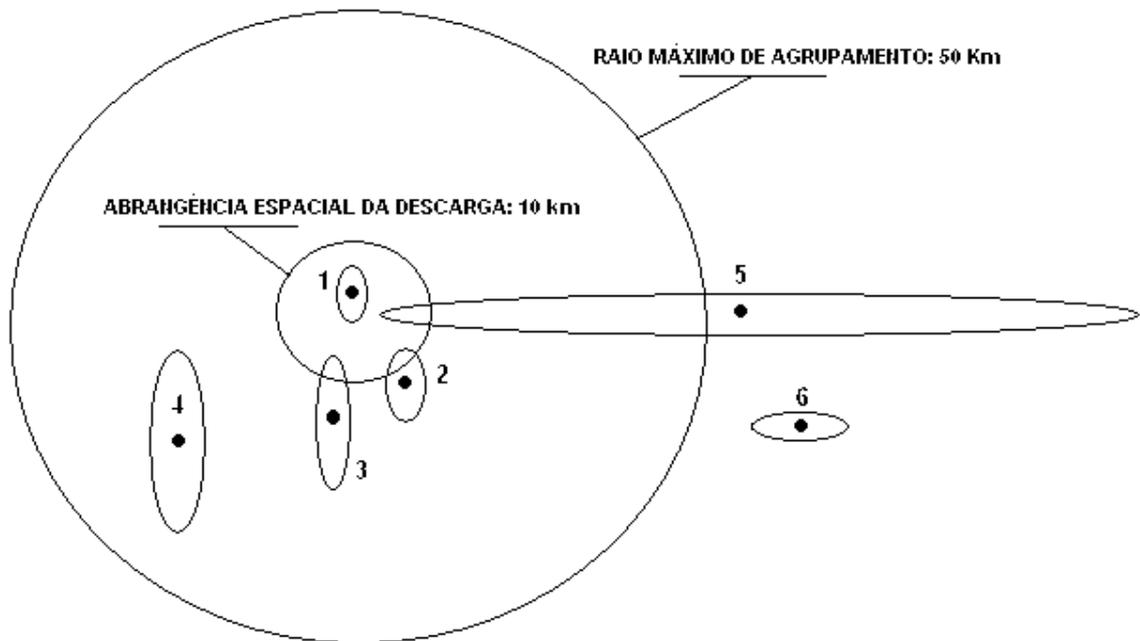


Figura 3.8 – Exemplo do algoritmo de agrupamento das descargas de retorno de um raio com as elipses de incerteza de cada descarga.

Fonte: Adaptada de Pinto Jr.(2005).

3.4.4 – EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO

A eficiência de um sistema de detecção corresponde justamente na sua capacidade em detectar e localizar descargas nuvem-solo. É expressa como um percentual do número real de descargas ocorridas e detectadas no espaço amostral. Segundo Naccarato (2005), os principais fatores que afetam a eficiência de um sistema de detecção são:

- a) a eficiência de detecção individual de cada sensor, ou seja, a probabilidade de um sensor detectar ou não uma determinada descarga;
- b) o número médio de sensores participantes da solução, que podem variar devido a problemas técnicos, atrasos ou interrupção na comunicação;

c) as linhas de base da rede, que definem a distância entre dois sensores e estão relacionadas com o alcance nominal de cada sensor que compõe a rede;

d) a distribuição das correntes de pico das descargas, que está relacionada com as características morfológicas da tempestade e sua posição geográfica em relação à rede, afetando a eficiência individual de cada sensor.

Ballarotti et al. (2006) encontrou na região do Vale do Paraíba uma eficiência de detecção de 87,4% para os raios, e 54,7% para as descargas de retorno. Para o cálculo de detecção de raios, considerou-se um raio detectado quando teve uma de suas descargas de retorno detectadas.

Neste trabalho, comparando-se os dados fornecidos pela BrasilDat com os dados obtidos pelo sistema de coleta quando instalado em São José dos Campos e em Uruguaiana, foram verificadas eficiências para descargas de retorno de 77% (300 casos não detectados de um total de 1319) e de 45% (425 casos não detectados de um total de 934), respectivamente.

A eficiência de detecção de uma rede apresenta valores que variam de região para região e também de um período para outro, que depende do tipo de sensor utilizado, da geografia do lugar e da disposição dos sensores entre si.

4 – METODOLOGIA

4.1 - SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição adotado neste trabalho, como foi dito, consiste basicamente de:

- um microcomputador dotado de uma placa GPS168PCI para sincronismo temporal dos equipamentos e de uma placa NI PCI-6110 para aquisição dos dados;
- uma antena de GPS (*Global Positioning System*);
- um módulo de aquisição de dados DAQ BOX NI BNC-2110 com 12 bits e 8 entradas analógicas;
- um módulo integrador / amplificador com ganho de 43,4 mV / [V/m];
- uma antena plana de campo rápido com uma largura de banda que vai de 306 Hz a 1,5 MHz.

A fim de se evitar a presença de qualquer tipo de ruído proveniente da rede elétrica o microcomputador foi conectado a um *No Break*, dotado de bateria automotiva de 12 V, e o conjunto integrador / amplificador foi conectado a duas baterias de 12 V.

A configuração do sistema de medição adotado foi idêntica aquela utilizada na Áustria por Schulz e Diendorfer (2006), com exceção do cabo ótico usado para interligação do integrador / amplificador ao módulo de aquisição. Para este trabalho utilizou-se de cabo coaxial tipo RG-58 com impedância de 50 Ohms.

Esse sistema de medição possibilita a gravação de forma contínua do campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo durante as tempestades. A duração total de gravação está limitada apenas pela capacidade de armazenamento de memória do disco rígido. Os dados de campo elétrico gravados são sincronizados com o sistema GPS de forma que cada arquivo inicia-se e

termina exatamente em um segundo, e o tempo de início será o próprio nome do arquivo. Essa configuração é inerente ao *software* Datalogger versão 2.0.2 utilizado para a coleta dos dados.

O sistema de medição tem dois canais e está configurado para operar com taxa de aquisição de 5 MS/s para cada canal. Embora seja possível a gravação sincronizada nos dois canais, apenas um canal foi usado para a medição de campo neste trabalho.

A faixa de frequência do sistema de medição foi limitada pelo integrador / amplificador entre 306 Hz e 1,5 MHz.

4.2 - DATAS, HORÁRIOS E LOCAIS DAS COLETAS DE DADOS

Os dados de campo elétrico foram gravados durante tempestades ocorridas nas proximidades de São José dos Campos - S.P, e em Uruguaiana - RS, conforme mostra a Tabela 4.1. As latitudes e longitudes são referentes às posições do sistema de medição. O tempo de medição corresponde ao tempo total em que os dados foram efetivamente coletados, excluídos os momentos de interrupção.

Tabela 4.1 – Data e horário (UT) das gravações de campo elétrico e localização do sistema de medição.

DATA (d/m/a)	LOCAL	LATITUDE (dec.)	LONGITUDE (dec.)	INÍCIO (h:m:s)	TÉRMINO (h:m:s)	TEMPO DE MEDIÇÃO (minutos)
15 /fev/07	S. J. dos Campos	-23,2636	-45,8308	19:29:37	20:25:16	48
11/mar/07				19:46:48	20:31:45	45
25/mar/07	Uruguaiana	-29,8012	-57,0144	06:52:21	09:37:41	8
26/mar/07				20:34:09	20:47:38	16
30/mar/07				22:42:14	23:05:00	9
31/mar/07				00:12:19	01:42:10	64
02/abr/07				23:04:36	23:27:23	2
03/abr/07				00:29:32	03:15:36	66

Esses locais foram escolhidos principalmente porque são abrangidos pela rede de detecção BrasilDat, por serem convenientes para abrigar os equipamentos do sistema de medição, por apresentarem sinais elétrico com baixo nível de ruído, e também pelo fato de que as características das nuvens nas duas regiões serem diferenciadas.

Em São José dos Campos, as tempestades foram isoladas, basicamente devidas aos sistemas convectivos locais. Em Uruguaiana, entretanto, houve a predominância de sistemas convectivos de mesoescala originários do norte da Argentina, como apresentado na Figura 4.1. Essa Figura trata-se das imagens do satélite GOES-12, capturadas no mesmo horário da coleta dos dados. A Figura 4.1 (a) foi obtida às 20:00 (UT) de 11 de março de 2007 e mostra a região sudeste do país – onde se localiza São José dos Campos. A Figura 4.1 (b), de 26 de março de 2007, às 20:45 (UT), é referente à região sul, onde está localizada a cidade de Uruguaiana.

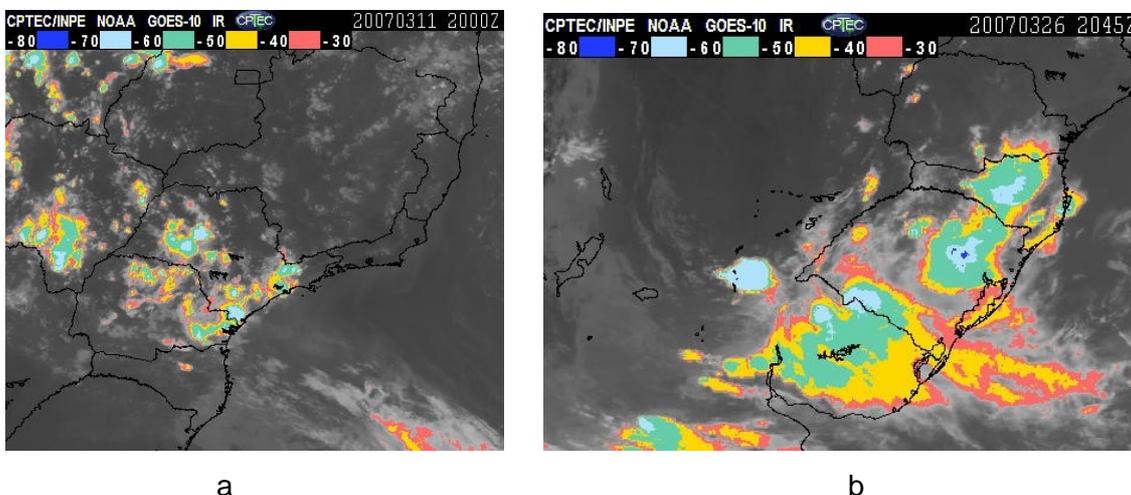


Figura 4.1 – Imagens do satélite GOES-10 de: (a) – região sudeste, e (b) – região sul do Brasil. Em (a) os sistemas convectivos são locais, com tempestades são isoladas. Em (b) os sistemas são convectivos de mesoescala.

Fonte: INPE / CPTE (2009).

4.3 - DISTÂNCIA ENTRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO E O LOCAL DE IMPACTO DA DESCARGA

A distância entre o sistema de medição e o provável local de ocorrência do raio foi calculada através da equação 4.1, a partir dos valores de latitude e longitude fornecidos pela rede BrasilDat. A Figura 4.2 mostra os parâmetros da equação 4.1.

$$S = 111,3 \cdot \arccos (\text{sen } \theta_2 \cdot \text{sen } \theta_1) + (\text{cos } \theta_2 \cdot \text{cos } \theta_1 \cdot \text{cos } \Delta\theta) \quad (4.1)$$

onde:

S é distância entre os pontos P1 e P2, dada em quilômetros;

θ_1 é a latitude do ponto 1, dada em decimais;

θ_2 é a latitude do ponto 2 dada em decimais;

$\Delta\theta$ é a diferença entre a longitude do ponto 1 e do ponto 2, dada em decimais.

O termo multiplicador 111,3 corresponde aos quilômetros percorridos sobre a superfície terrestre, quando se perfaz um grau no arco da circunferência da Terra.

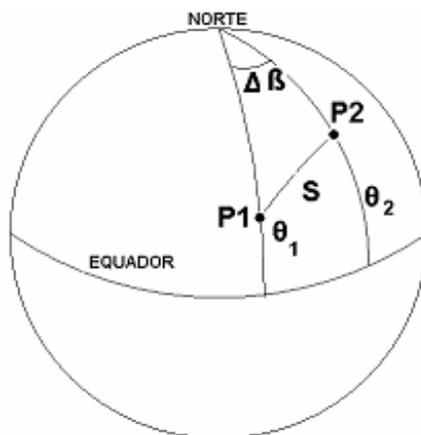


Figura 4.2 – Parâmetros para cálculo da distância entre dois pontos situados na superfície do globo terrestre.

Fonte: Kohl (2007).

4.4 - DADOS CONSIDERADOS

A quantidade de registros de variação de campo elétrico com possibilidade de corresponder a uma descarga de retorno foi bem maior que aquelas consideradas para análise, porém grande parte delas foi descartada. Algumas premissas, descritas a seguir, foram conclusivas para a classificação dos dados de campo elétrico coletados.

1) Os raios considerados foram aqueles que ocorreram a uma distância inferior a 200 km do local onde estava situado o sistema de medição, pois distâncias maiores poderiam impedir que todas as características requeridas para classificar o raio corretamente fossem apresentadas, devido às possíveis distorções do sinal da radiação.

A Figura 4.3 mostra a localização geográfica das descargas de retorno consideradas neste trabalho - representada por pontos pretos, além da data da ocorrência. O círculo tracejado possui raio de 200 km e seu centro coincide com o local onde se situou o sistema de coleta de dados, representado por uma estrela.

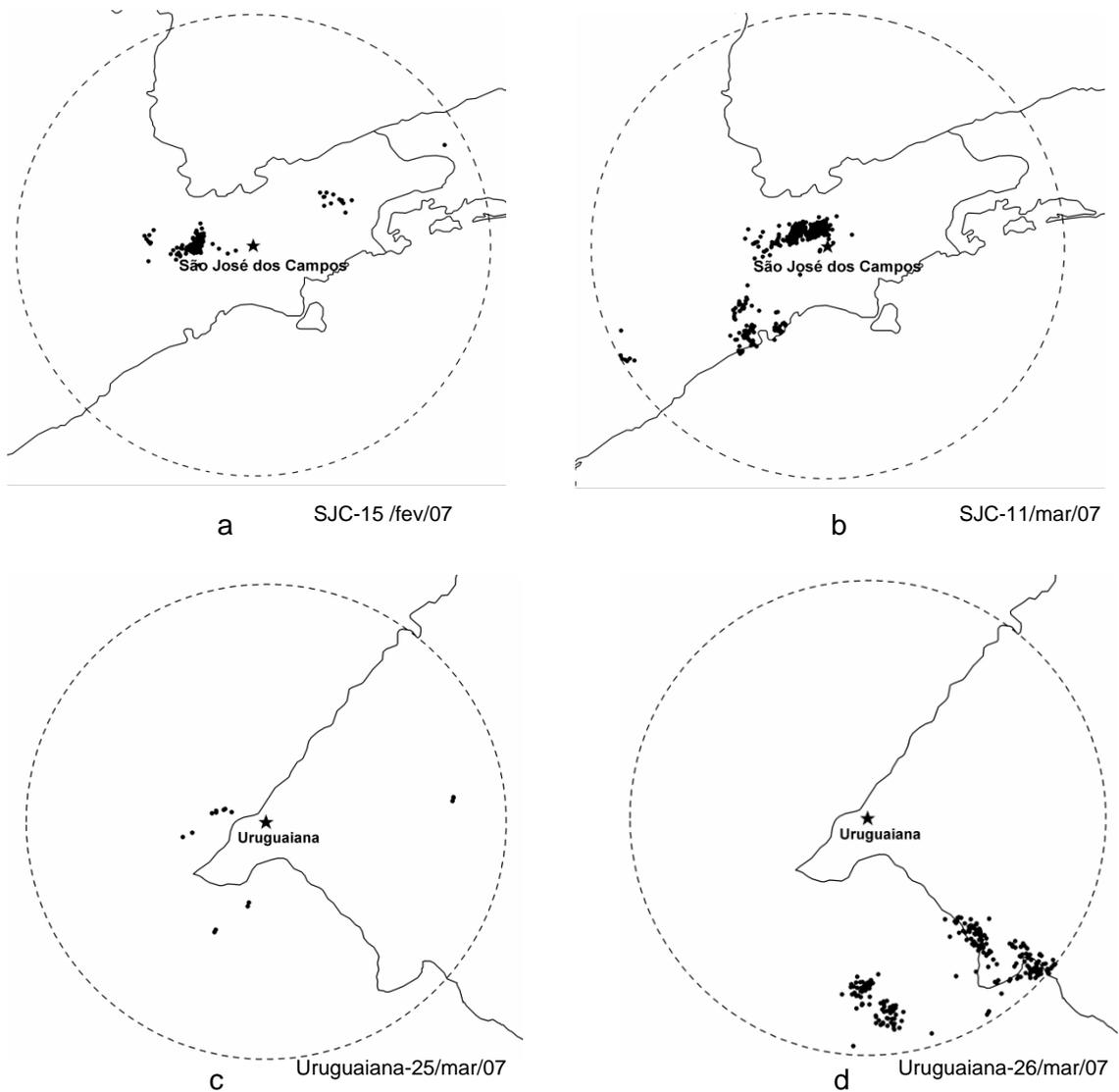


Figura 4.3 – Localização das descargas nuvem-solo negativas de primeira ordem a décima primeira ordem detectadas pelo sistema de medição e consideradas neste trabalho (continua).

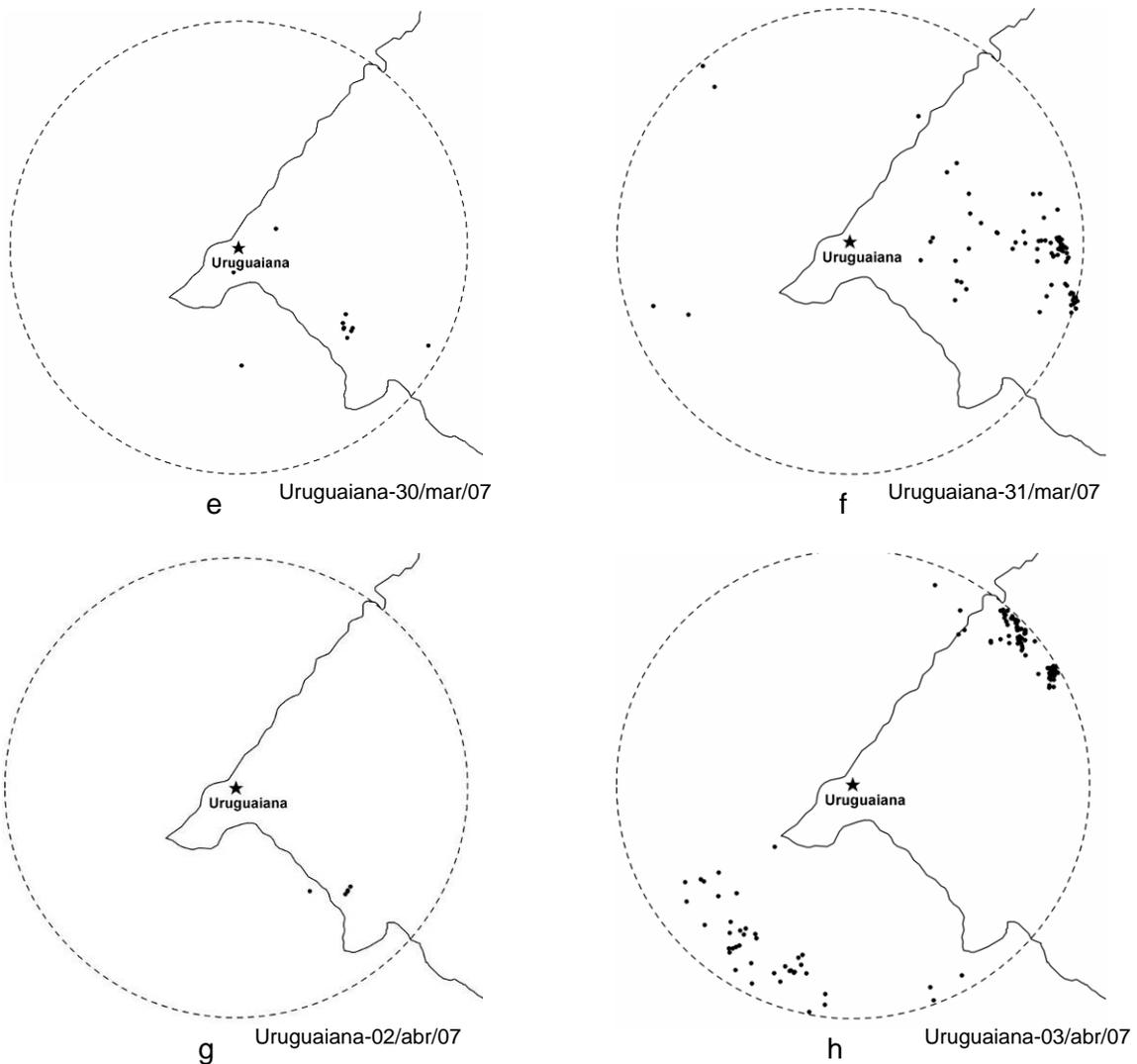


Figura 4.3 – (conclusão)

2) Foi considerado que a primeira descarga de retorno é aquela que não foi precedida de nenhuma outra no intervalo de 500 ms. As demais descargas desse mesmo relâmpago serão as subsequentes, desde que estejam a uma distância inferior a 10 km, em relação a primeira, e que ocorram num período de tempo inferior a 500 ms da anterior, segundo Pinto Júnior (2005). Essa premissa está em acordo com o algoritmo da Central de Processamento da BrasilDat, comentado no capítulo 3.

A Figura 4.4 mostra um exemplo destes casos, ocorrido às 20:28.06 (UT) de 11 de março de 2007, em São José dos Campos. Nota-se que as descargas que estão separadas pelo intervalo de tempo maior que 500 ms foram agrupadas em dois relâmpagos distintos.

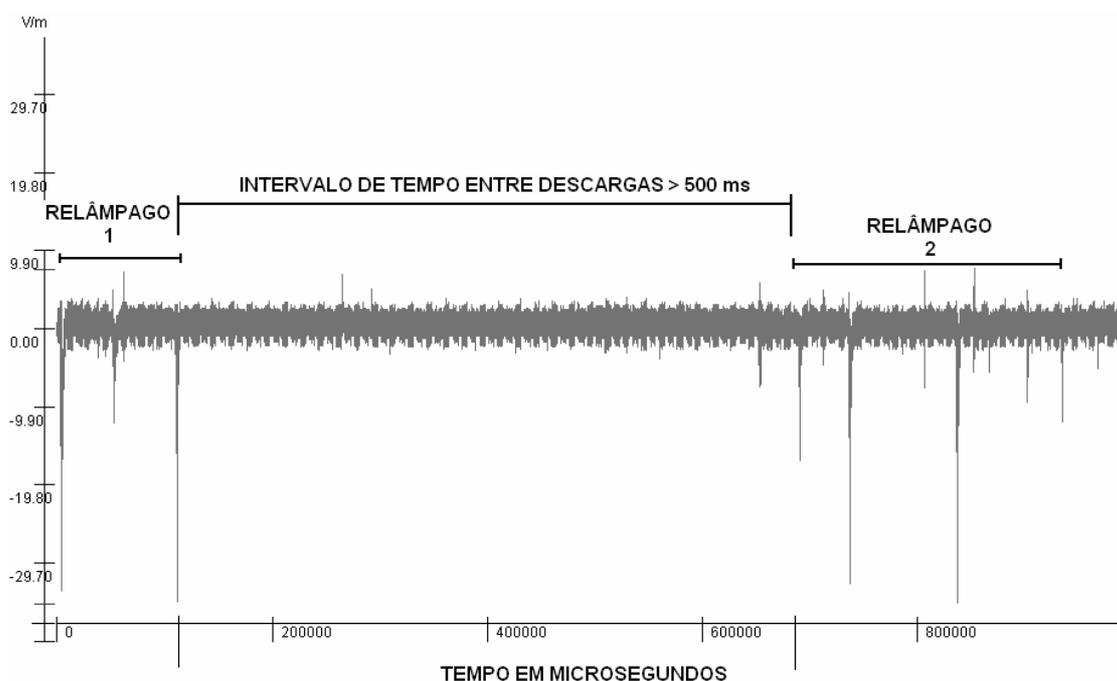


Figura 4.4 – Exemplo de descargas que ocorreram em um intervalo de tempo superior a 500 ms e que foram, portanto, consideradas como pertencentes a relâmpagos distintos. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

3) Assumiu-se ainda que o pico de campo elétrico de uma descarga de retorno teria que ser três vezes maior que o nível de ruído local para ser devidamente analisado.

A Figura 4.5 mostra dois casos desconsiderados devido ao ruído intenso, ocorrido em São José dos Campos, às: (a) 19:24.44 (UT) de 15 de fevereiro de 2007, e (b) 19:47.03 (UT) de 11 de março de 2007.

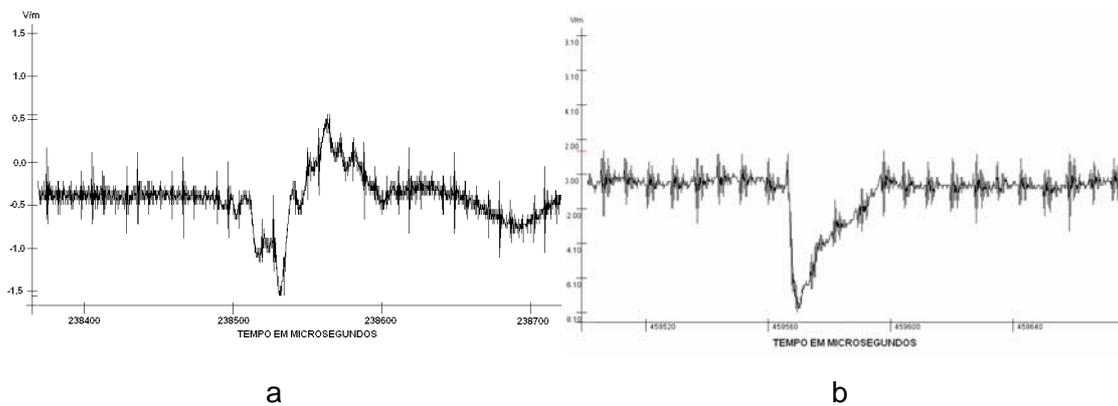


Figura 4.5 – Exemplo da variação do campo elétrico, onde o ruído existente e a baixa intensidade da radiação não permitiram afirmar que se trata da forma de onda de uma descarga de retorno. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

4) A variação do campo elétrico teria que apresentar a forma de onda característica de uma descarga de retorno, tal como mostradas nas Figuras 2.13 e 4.6. A Figura 4.6 é referente ao raio ocorrido em São José dos Campos no dia 11 de março de 2007 às: 20:25.02 (UT)

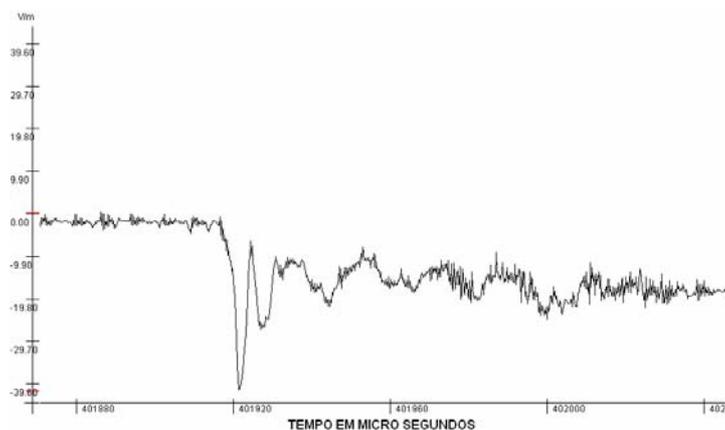


Figura 4.6 – Exemplo da variação do campo elétrico característica de uma descarga de retorno. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

A Figura 4.7 mostra alguns casos rejeitados, onde a forma de onda não atendeu a esta premissa. Aparentemente são descargas ocorridas no interior da nuvem durante algum processo de transferência de cargas. Ocorreram no dia 15 de fevereiro de 2007, em São José dos Campos, às: 19:23.33 (UT) – Figura 4.7 (a), 19:30.09 (UT) – Figura 4.7 (b), 19:30.04 (UT) – Figura 4.7 (c), e 19:31.43 – Figura 4.7 (d).

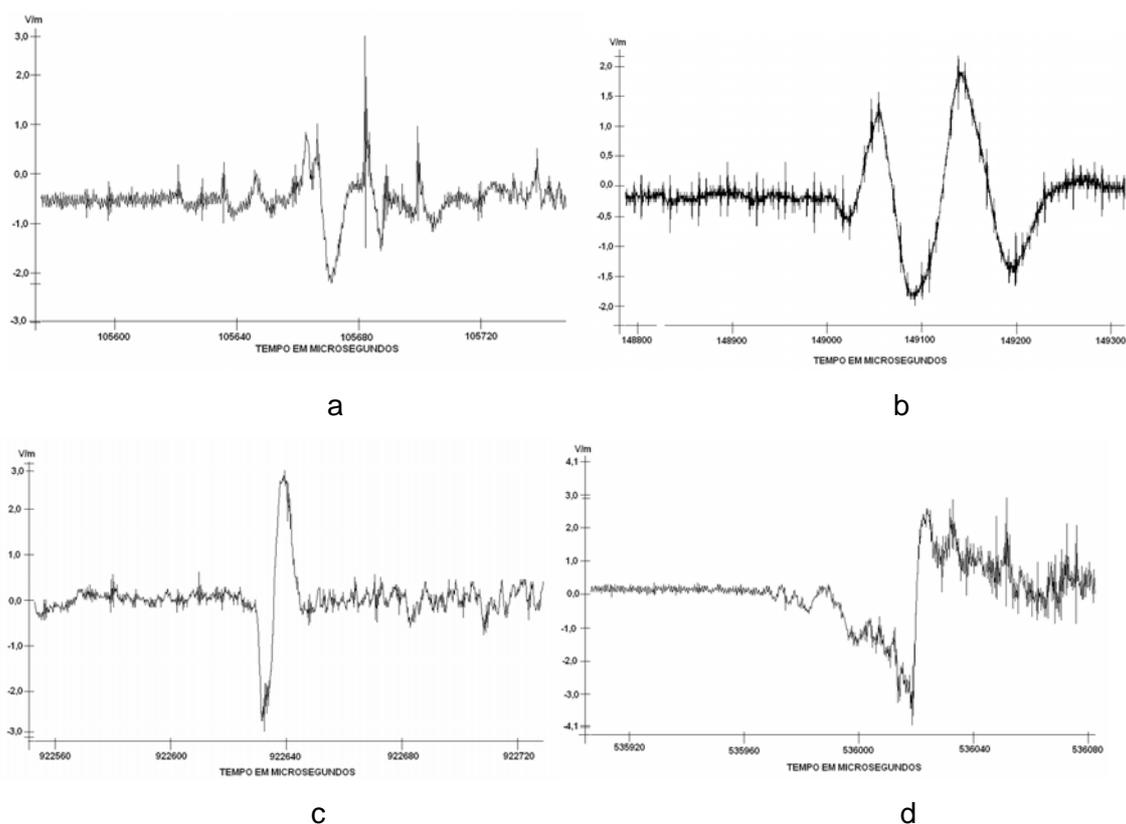


Figura 4.7 – Exemplos da variação do campo elétrico desconsiderados neste trabalho por não apresentarem a forma de onda característica de uma descarga de retorno. A convenção adotada é de que o campo elétrico negativo é para baixo.

5) Ainda que alguns raios observados possuíssem até dezoito descargas de retorno subsequentes, neste trabalho as descargas consideradas foram apenas aquelas até a décima primeira ordem, pois as demais não representam uma amostragem estatística significativa. Do total de 460 relâmpagos nuvem-solo

múltiplos analisados neste trabalho, apenas 8 deles possuíam mais que 11 descargas – isso equivale 1,7% do total.

A partir destas premissas, obtivemos a Tabela 4.2, que apresenta a quantidade de raios e descargas considerados. Os dados dos dias 30 e 31 de março, assim como os dias 2 e 3 de abril foram agrupados, pois em ambos os casos, tratam-se de uma mesma tempestade.

4.5 - NORMALIZAÇÃO DOS VALORES DO CAMPO ELÉTRICO

Como o campo elétrico da radiação produzida por uma descarga de retorno diminui com o inverso da distância percorrida (Rakov, 2004), foi necessária a normalização desse valor. Considerou-se como sendo 100 km a distância padrão e, através da equação 4.2, pode-se normalizar o valor do campo elétrico para uma distância qualquer.

$$E_{100} = E \cdot D / 100 \quad (4.2)$$

onde:

E_{100} - é o valor do pico de campo elétrico normalizado para a distância de 100 km a partir do sistema de medição, em V/m;

E - é o valor de campo elétrico obtido pelo sistema de medição, em V/m;

D - é a distância entre o sistema de medição e o ponto de impacto do raio, em km.

Tabela 4.2 – Dados considerados para análise

LOCAL	DATA	NÚMERO DE RELÂMPAGOS			NÚMERO DE DESCARGAS SUBSEQUENTES	TOTAL DE DESCARGAS	MULTIPLICIDADE
		SIMPLES	(%)	MÚLTIPLOS			
São José dos Campos	15/fev/07	53	50%	53	121	227	2,1
	11/mar/07	98	32%	206	788	1092	3,6
TOTAL I		151	37%	259	909	1319	3,2
Uruguaiana	25/mar/07	2	20%	8	13	23	2,3
	26/mar/07	24	24%	75	250	349	3,5
	30 e 31/mar/2007	16	22%	56	182	254	3,5
	2 e 3/abr/2007	24	28%	62	222	308	3,6
TOTAL II		66	25%	201	667	934	3,5
TOTAL I + TOTAL II		217	32%	460	1576	2253	3,3

4.6 – MÉTODOS PARA A ANÁLISE DOS VALORES DO CAMPO ELÉTRICO

Várias maneiras diferentes para relacionar os campos elétricos das primeiras descargas com as subsequentes dos relâmpagos têm sido utilizadas.

Assim como em Schulz et al. (2005) e Oliveira Filho et al. (2007), foram adotados aqui três métodos para se estabelecer uma relação entre os valores de pico de campo elétrico da primeira descarga de retorno e das subsequentes nos relâmpagos nuvem-solo negativos. Esses métodos são descritos a seguir.

Para uma melhor compreensão, seja uma amostra de valores arbitrários de pico de campo elétrico normalizados para 100 km, conforme a Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Valores arbitrários de pico de campo elétrico normalizados para 100 km para a explanação dos métodos de análise.

	Simples	Múltiplo					
		1ªDR	2ªDR	3ªDR	4ªDR	...	11ªDR
Raio 1	4	-	-	-	-	-	-
Raio 2		9	3	6	5	-	3
Raio 3	-	4	9	5	2	-	8
Raio 4	7	-	-	-	-	-	-
:	-	-	-	-	-	-	-
Raio n	-	8	7	7	3	-	3

Método A1: Por este método são calculadas as médias (aritmética e geométrica) dos picos de campo elétrico normalizado para 100 km (E_{100}) de todas as primeiras descargas de retorno (relâmpagos simples e múltiplos). Em seguida são calculadas as médias dos picos de campo elétrico das descargas subsequentes de segunda à décima primeira ordem (E_{100} descarga 2 a E_{100} descarga 11). Por fim, é encontrada a razão entre estas duas médias. Através da Tabela 4.3 foi criada a Tabela 4.4, que esquematiza o método A1.

Tabela 4.4 – Esquematização do método A1 para análise dos dados.

A1	Simples	Múltiplo					
		1ªDR	2ªDR	3ªDR	4ªDR	...	11ªDR
Raio 1	4	-	-	-	-	-	-
Raio 2	-	9	3	6	5	-	3
Raio 3	-	4	9	5	2	-	8
Raio 4	7	-	-	-	-	-	-
:	-	-	-	-	-	-	-
Raio n	-	8	7	7	3	-	3

\bar{X}_1 \bar{X}_2
A1 → \bar{X}_1 / \bar{X}_2

Onde:

\bar{X}_1 é a média (geométrica ou aritmética) das primeiras descargas de todos os relâmpagos (simples e múltiplos);

\bar{X}_2 é a média (geométrica ou aritmética) das descargas subsequentes.

Método A2: Este método é idêntico ao método A1, porém são excluídos os relâmpagos simples. Utilizando novamente a Tabela 4.3, obteve-se a Tabela 4.5, que esquematiza o método A2.

Tabela 4.5 – Esquematização do método A2 para análise dos dados.

A2	Simples	Múltiplo					
		1ª DR	2ªDR	3ªDR	4ªDR	...	11ªDR
Raio 1	4	-	-	-	-	-	-
Raio 2	-	9	3	6	5	-	3
Raio 3	-	4	9	5	2	-	8
Raio 4	7	-	-	-	-	-	-
:	-	-	-	-	-	-	-
Raio n	-	8	7	7	3	-	3

\bar{X}_1 \bar{X}_2
A2 → \bar{X}_1 / \bar{X}_2

Onde:

\bar{X}_1 é a média (geométrica ou aritmética) das primeiras descargas dos relâmpagos múltiplos;

\bar{X}_2 é a média (geométrica ou aritmética) das descargas subsequentes.

Método B: Outro método é calcular a razão entre o pico de campo elétrico normalizado para 100 km da primeira descarga de retorno de um raio múltiplo e a média (aritmética ou geométrica) dos picos de campo elétrico normalizados para 100 km de todas as descargas subsequentes (de segunda a décima primeira ordem), para cada raio individualmente. Utilizando outra vez a Tabela 4.3, tem-se a Tabela 4.6, que esquematiza o método B.

Tabela 4.6 – Esquematização do método B para análise dos dados.

B	Simples	Múltiplo						1ª DR / média aritmética subsequentes	
		1ªDR	2ªDR	3ªDR	4ªDR	...	11ªDR		
Raio 1	4	-	-	-	-	-	-	-	r1
Raio 2	-	9	3	6	5	-	3	2,1	r2
Raio 3	-	4	9	5	2	-	8	0,6	r3
Raio 4	7	-	-	-	-	-	-	-	r4
:	-	-	-	-	-	-	-	-	:
Raio n	-	8	7	7	3	-	3	1,6	rn

$B \rightarrow$ média (r_1, r_2, \dots, r_n)

Onde:

r_1, r_2, \dots, r_n são as razões entre a primeira descarga e a média aritmética das descargas subsequentes de um mesmo raio;

B é média (geométrica ou aritmética) entre r_1, r_2, \dots, r_n .

Pelos três métodos descritos acima (A1, A2 e B), foram comparados os resultados deste trabalho com os de Schulz et al. (2008), Schulz e Diendorfer (2006), Schulz et al. (2005), e Rakov et al. (1994).

Um quarto método - Método C - para relacionar as primeiras descargas com as subsequentes, utilizada por Nag et al. (2008), também foi adotado neste trabalho e comparado com os resultados de Schulz et al. (2006) e Schulz et al. (2008). Esse método consiste em:

Método C: Neste método foram encontradas as razões entre os valores de pico de campo elétrico normalizado para 100 km da primeira descarga e das subsequentes correspondentes ao mesmo raio. Em seguida foi calculada a média geométrica das razões. Ainda pela Tabela 4.3, obteve-se a Tabela 4.7, que esquematiza o método C.

Tabela 4.7 – Esquematização do método C para análise dos dados.

C	Simples	Múltiplo					1ªDR / 2ªDR	1ªDR / 3ªDR	1ªDR / 4ªDR	..	1ªDR / 11ªDR
		1ªDR	2ªDR	3ªDR	4ªDR	..					
Raio 1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Raio 2	-	9	3	6	5	-	3	1,5	1,8	-	3
Raio 3	-	4	9	5	2	-	8	0,4	0,8	2	0,5
Raio 4	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Raio n	-	8	7	7	3	-	3	1,1	1,1	2,7	2,7

C → média das razões

Onde:

C é a média (geométrica ou aritmética) das razões entre a primeira descarga e as subsequentes de um mesmo raio.

Vale dizer que devido ao fato dos picos de campo elétrico possuírem uma distribuição lognormal em relação aos eventos, a média geométrica também foi empregada por ser mais representativa.

A Figura 4.8 apresenta uma parte da tabela, em Excel, dos dados obtidos através da rede BrasilDat, dos dados coletados e dos cálculos realizados. Os valores das distâncias anotadas em vermelho foram estimados, visto que a rede BrasilDat não identificou as referidas descargas.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	DATE (dmy)	TIME (h:m:s.ms)	LATITUDE	LONGITUDE	CURRENT (kA)	DISTANCE (Km)	E _d measured (V/m)	ratio E100 sub/1st
1								
687	11/3/2007	20:15:16.639569359	-23,1680	-45,9989	-18,4	20	21,4	
688	11/3/2007	20:15:22.067076744	-23,1512	-45,8574	-11,0	13	19,9	
689	11/3/2007	20:15:22.122361138	-23,1080	-45,8577	-18,9	18	39,9	2,75
690	11/3/2007	20:15:22.2078124				18	33,1	2,34
691	11/3/2007	20:15:40.268436517	-23,0447	-45,8343	-18,3	24	23,6	
692	11/3/2007	20:15:45.783872545	-23,1188	-45,9633	-28,6	21	43,0	
693	11/3/2007	20:15:45.958734754	-23,1669	-45,9924	-20,8	20	29,6	0,64
694	11/3/2007	20:15:51.542039024	-23,1213	-45,8865	-19,0	17	38,3	
695	11/3/2007	20:15:51.6919664				17	34,6	0,92
696	11/3/2007	20:15:51.7295798				17	13,9	0,37
697	11/3/2007	20:15:51.8085296				17	30,6	0,81
698	11/3/2007	20:15:51.8481386				17	25,5	0,67
699	11/3/2007	20:15:51.8945580				17	10,5	0,28
700	11/3/2007	20:15:51.9283688				17	22,5	0,59
701	11/3/2007	20:16:06.869760523	-23,1004	-45,8464	-18,9	18	39,1	
702	11/3/2007	20:16:06.967571567	-23,1594	-45,9075	-18,3	14	37,5	0,74
703	11/3/2007	20:16:09.060422725	-23,0902	-45,8430	-18,6	19	31,0	
704	11/3/2007	20:16:17.242627212	-23,1666	-46,0084	-38,0	21	41,7	
705	11/3/2007	20:16:17.514232730	-23,1554	-46,0020	-20,9	21	23,1	0,56
706	11/3/2007	20:16:26.1737518				18	9,2	
707	11/3/2007	20:16:26.241655175	-23,1137	-45,8797	-18,0	17	34,6	3,64
708	11/3/2007	20:16:26.339726706	-23,1063	-45,9047	-14,7	19	19,6	2,26
709	11/3/2007	20:16:26.5503776				19	22,8	2,62
710	11/3/2007	20:16:31.1619012				22	8,7	
711	11/3/2007	20:16:31.2560312				22	17,2	1,98
712	11/3/2007	20:16:31.355158835	-23,0946	-45,9378	-9,2	22	13,9	1,58
713	11/3/2007	20:16:31.4051894				22	10,5	1,21
714	11/3/2007	20:16:37.440004802	-23,1487	-45,8554	-17,4	13	37,9	

Figura 4.8 – Amostra de parte da Tabela desenvolvida em Excel para análise dos dados coletados (continua).

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	ratio E100 1st/sub	E ₁₀₀ (V/m)	E _{100stroke1 all} (V/m)	E _{100stroke1 single} (V/m)	E _{100 Stroke1 multiple (1)} (V/m)	E _{100 Stroke2} (V/m)	E _{100 Stroke3} (V/m)	E _{100 Stroke4} (V/m)	E _{100 Stroke5} (V/m)	E _{100 Stroke6} (V/m)	E _{100 Stroke7} (V/m)
1											
687		4,3	4,3	4,3							
688		2,5	2,5		2,5						
689	0,36	7,0				7,0					
690	0,43	6,0					6,0				
691		5,8	5,8	5,8							
692		9,1	9,1		9,1						
693	1,55	5,8				5,8					
694		6,4	6,4		6,4						
695	1,09	5,9				5,9					
696	2,69	2,4					2,4				
697	1,24	5,2						5,2			
698	1,50	4,3							4,3		
699	3,58	1,8								1,8	
700	1,70	3,8									3,8
701		7,1	7,1		7,1						
702	1,35	5,3				5,3					
703		6,0	6,0	6,0							
704		8,8	8,8		8,8						
705	1,79	4,9				4,9					
706		1,7	1,7		1,7						
707	0,27	6,0				6,0					
708	0,44	3,7					3,7				
709	0,38	4,3						4,3			
710		1,9	1,9		1,9						
711	0,51	3,8				3,8					
712	0,63	3,0					3,0				
713	0,83	2,3						2,3			
714		4,9	4,9		4,9						

Figura 4.8 – (continuação).

	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
	E_{100} Stroke8 (V/m)	E_{100} Stroke9 (V/m)	E_{100} Stroke10 (V/m)	E_{100} Stroke11 (V/m)	2 to 11 Subsequent mean (2) (V/m)	rate / (2)	multiplicity	E_{100} Stroke12 (V/m)	E_{100} Stroke13 (V/m)	E_{100} Stroke14 (V/m)
1							1			
687							1			
688					6,50	0,39	3			
689										
690										
691							1			
692					5,80	1,56	2			
693										
694					3,90	1,65	7			
695										
696										
697										
698										
699										
700										
701					5,30	1,35	2			
702										
703							1			
704					4,90	1,80	2			
705										
706					4,67	0,36	4			
707										
708										
709										
710					3,03	0,63	4			
711										
712										
713										
714					1,60	3,09	2			

Figura 4.8 – (conclusão).

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da análise dos dados coletados no Brasil, e de outros estudos realizados na Áustria e nos Estados Unidos, procurou-se estabelecer alguma relação entre valores de pico de campo elétrico da primeira descarga de retorno e das subseqüentes em relâmpagos nuvem-solo negativo.

Os histogramas da Figura 5.1 mostram os valores de pico de campo elétrico em função do número de eventos para São José dos Campos (Figura 5.1 a) e Uruguaiana (Figura 5.1 b)

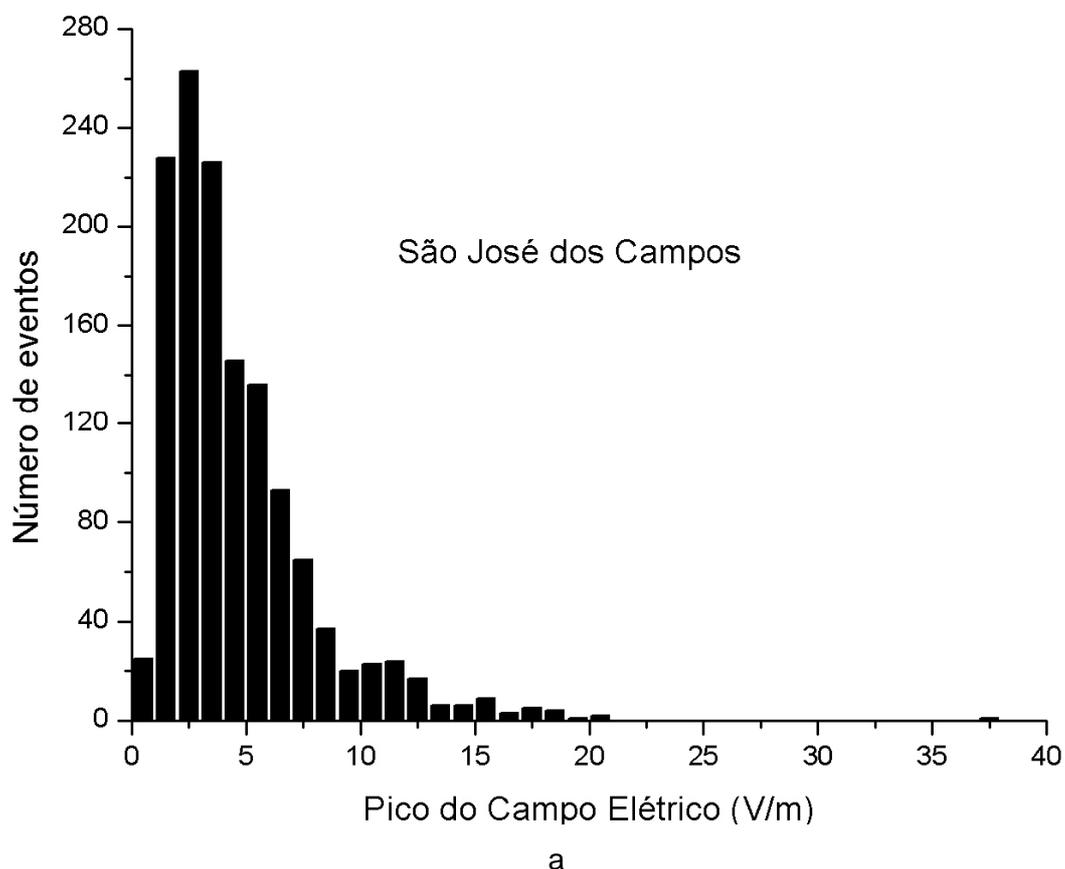
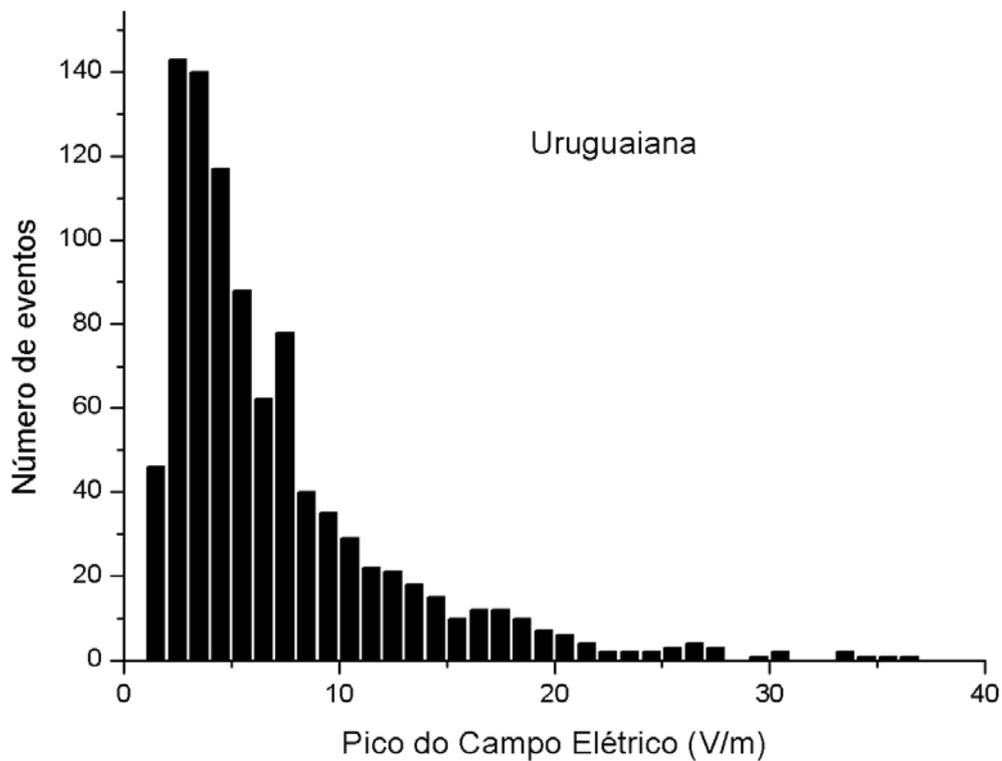


Figura 5.1 – Distribuição do pico de campo elétrico em função do número de eventos (continua).



b

Figura 5.1 – (conclusão).

O teste de *Kolmogov – Smirnov*, presente no *software* Origin 8, comprovou que as distribuições dos picos de campo elétrico de São José dos Campos e Uruguiana, mostradas na figura acima, são distribuições lognormais.

Da mesma forma, o teste de *Kolmogov – Smirnov* mostrou que os grupos de dados que geraram as razões dos métodos de análise utilizados (A1, A2, B e C) também são distribuições lognormais.

Os histogramas da Figura 5.2 mostram a quantidade de descargas consideradas (conforme item 4.4) de primeira à décima primeira ordem, em São José dos Campos e em Uruguiana. A nomenclatura utilizada será:

- *1 todos*: referente a todas as primeiras descargas, tanto para os relâmpagos simples, como para os múltiplos;
- *1 simples*: referente à primeira descarga de retorno dos relâmpagos simples;
- *1 mult*: referente à primeira descarga de retorno dos relâmpagos múltiplos;
- *2 mult, 3 mult, ..., 11 mult*: referentes às descargas subsequentes de ordem 2 a 11 dos relâmpagos múltiplos.

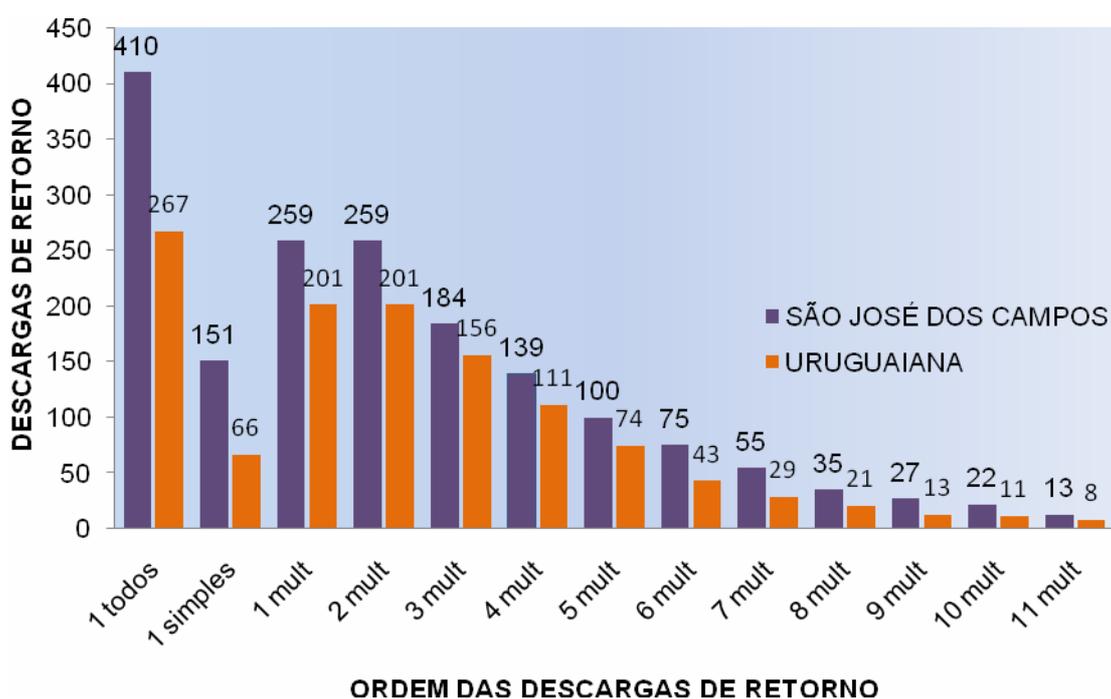


Figura 5.2 – Quantidade de descargas de retorno de primeira ordem a décima primeira ordem consideradas.

A Figura 5.3 mostra a distribuição da multiplicidade dos relâmpagos. Para São José dos Campos, a multiplicidade média encontrada foi de 3,2, enquanto que em Uruguaiana esse valor foi de 3,5.

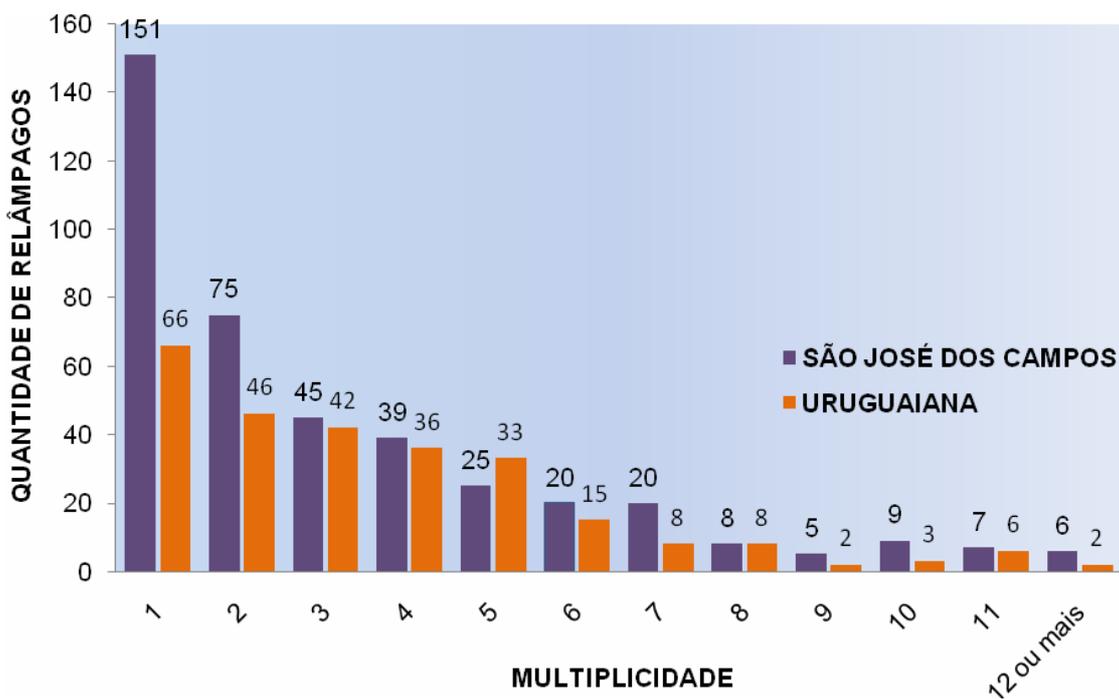


Figura 5.3 – Número de descargas de retorno por relâmpago (multiplicidade) ocorridos nas proximidades de São José dos Campos e Uruguaiana.

As porcentagens relâmpagos nuvem-solo negativos simples foram de 37% (151 casos de um total de 410 relâmpagos) em São José dos Campos e de 25% (66 casos do total de 267 relâmpagos) em Uruguaiana.

Na Figura 5.4 são apresentadas as médias geométricas dos valores de pico de campo elétrico em V/m normalizados para 100 km, para as descargas detectadas da primeira à décima primeira ordem em São José dos Campos e em Uruguaiana.

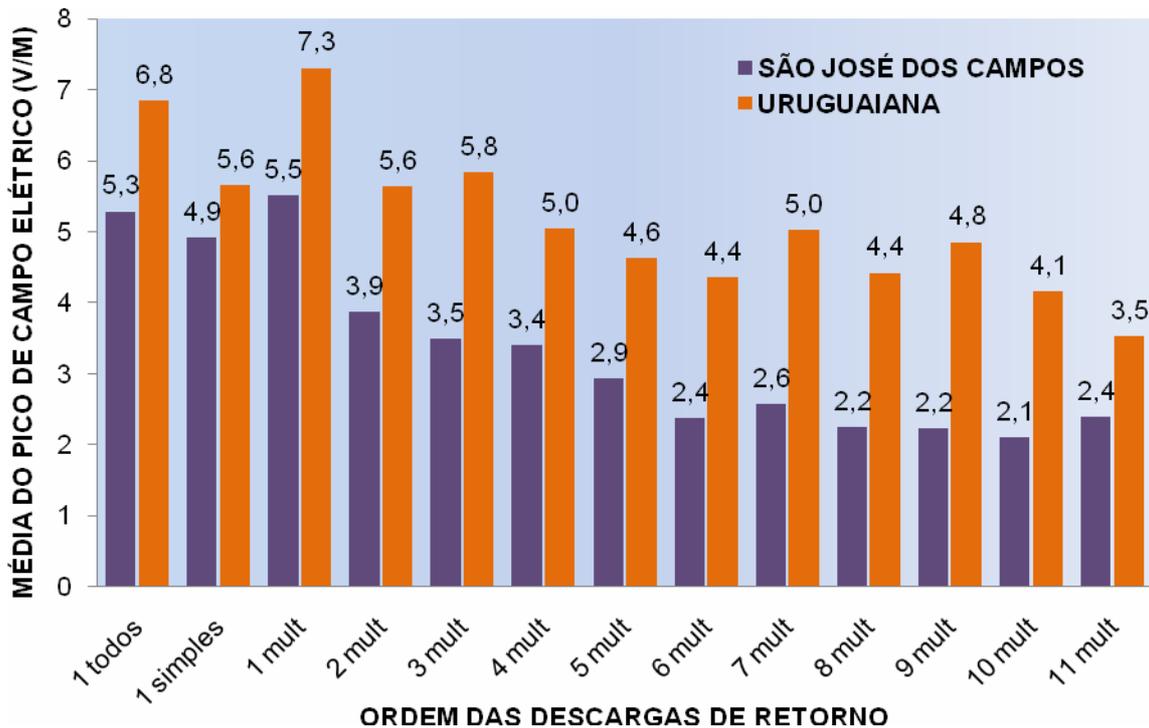


Figura 5.4 – Médias geométricas dos valores de pico de campo elétrico normalizados para 100 km para as descargas detectadas da primeira à décima primeira ordem.

Assim como já foi mencionado em Thottappillil et al. (1992) e Rakov e Uman (1990), é possível notar pelo histograma da Figura 5.3, que as médias geométricas dos picos de campo elétrico dos relâmpagos simples são menores que as primeiras descargas dos relâmpagos múltiplos.

Um aspecto interessante mostrada na Figura 5.4 é que existe uma distinção entre as médias de pico de campo elétrico encontradas em São José dos Campos, para as descargas de ordem 2 a 4 em relação às descargas de ordem 5 a 11. Em São José dos Campos os valores de campo elétrico das primeiras descargas (ordem 2 a 4) são ligeiramente maiores, provavelmente devido ao fato de que, segundo Rakov e Uman (2003), descargas que encontram novos canais, produzem picos de campo elétrico maiores. Conforme

já comentado, a formação de novos canais raramente ocorre por descargas subsequentes de ordem superior a quarta.

Outra característica observada através dos dados analisados, diz respeito à quantidade de relâmpagos que possuíram pelo menos uma descarga subsequente com pico de campo elétrico maior que a primeira descarga de retorno. Em São José dos Campos percentual foi de 38%, e em Uruguaiana foi de 49%. As descargas subsequentes com valores de pico de campo elétrico maior que o da primeira descarga foram de 20% em São José dos Campos, e de 31% em Uruguaiana.

A Tabela 5.1 apresenta os percentuais obtidos em outros estudos, além deste trabalho.

Tabela 5.1 – Relâmpagos nuvem-solo negativos com pelo menos uma descarga subsequente com pico campo elétrico superior ao da primeira descarga, e descargas subsequentes com picos maiores que a primeira descarga.

Estudo	Local	Relâmpagos		Descargas subsequentes	Relâmpagos com pelo menos uma descarga subsequente maior que a primeira (%)	Descargas subsequentes maiores que a primeira (%)
		Múltiplos	simples			
Presente trabalho	S.J.Campos Brasil	259	151	909	38	20
	Uruguaiiana Brasil	201	66	667	49	31
Nag et al. (2008)	Gainesville EUA	176	-	239	24	31
Rakov et al. (1994)	Tampa EUA	63	13	270	33	-
Thottappillil et al. (1992)	Tampa EUA	46	-	199	33	13
Schulz et al. (2008)	Uppsala Suécia	94	40	174	32	18
Schulz e Diendorfer (2006)	Bad Vöslau Áustria	92	128	247	49	31
Cooray e Perez (1994)	Bad Vöslau Áustria	112	25	-	24	15

A Figura 5.5 mostra a porcentagem dos relâmpagos nuvem-solo negativos ocorridos em São José dos Campos e Uruguaiana, onde o pico de campo elétrico da descarga subsequente foi maior que o da primeira descarga de retorno. Foram encontradas descargas subsequentes de até sétima ordem maior que a primeira em São José dos Campos, e de até nona ordem em Uruguaiana.

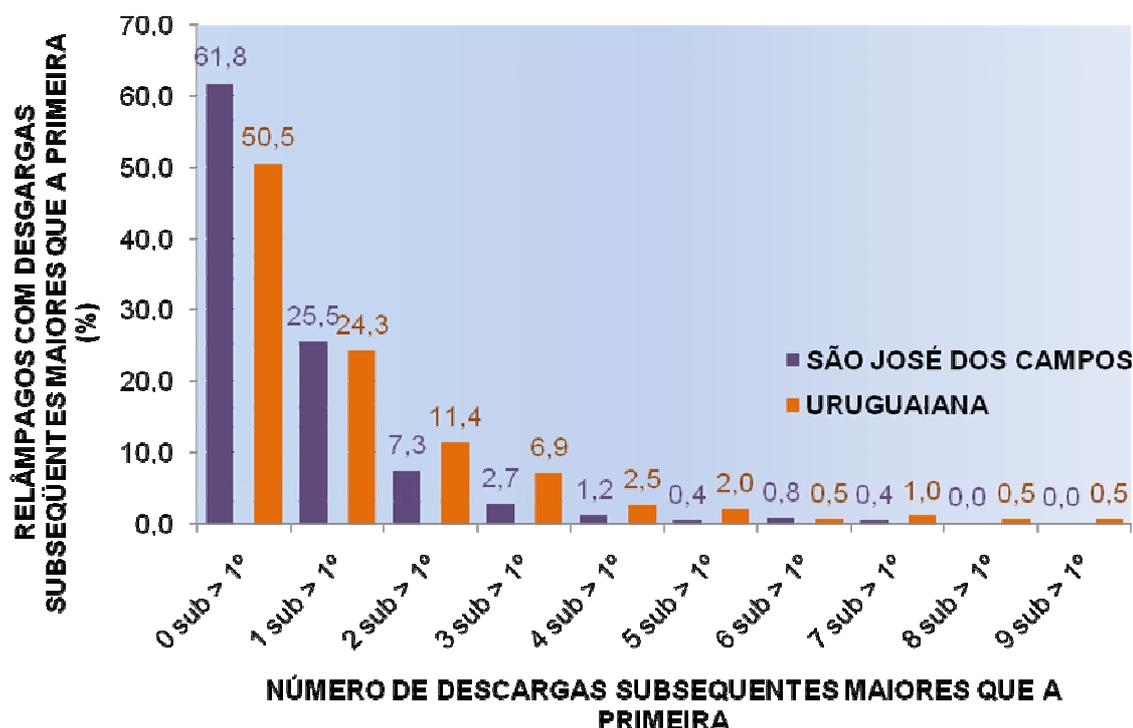


Figura 5.5 – Porcentagem de relâmpagos nuvem-solo negativos ocorridos em São José dos Campos e em Uruguaiana, onde o pico de campo elétrico da descarga subsequente (sub) foi maior que o da primeira descarga de retorno.

A Tabela 5.2 relaciona os valores de pico de campo elétrico da primeira descarga de retorno e das subsequentes de diferentes trabalhos. São calculadas as médias para os métodos de cálculo A1, A2, B e C, citados.

Tabela 5.2 – Relação entre os valores de pico de campo elétrico da primeira descarga de retorno e das descargas subsequentes.

Estudo	Local	Relâmpagos			Descargas subsequentes	Método A1		Método A2		Método B		Método C	
		Múltiplos	Simples	Porcentagem de simples em relação a todas as descargas dos múltiplos		Razão entre médias geom.	Razão entre médias aritm.	Média geom. das razões	Média aritm. das razões	Média geom. das razões	Média aritm. das razões		
Presente trabalho	S.J.Campos Brasil	259	151	13	909	1,7	1,6	1,7	1,7	1,5	1,8	1,9	2,4
	Uruguiana Brasil	201	66	8	667	1,3	1,4	1,4	1,5	1,3	1,6	1,4	1,9
Nag et al. (2008)	Gainesville EUA	176	-	-	239	-	-	-	-	-	-	1,7	2,1
Rakov et al. (1994)	Tampa EUA	63	13	4	270	2,0	-	2,1	-	-	-	-	-
Schulz et al. (2008)	Uppsala Suécia	94	40	15	174	1,6	1,7	1,8	2,0	1,8	2,1	1,9	2,4
Schulz e Diendorfer (2006)	Bad Vöslau Áustria	92	128	38	247	-	1,0	1,3	1,4	-	1,6	1,6	2,3
Schulz et al. (2005)	Bad Vöslau Áustria	92	120	33	273	-	1,0	-	1,2	-	1,3	-	-

Através do teste *Two Sample t Test (t – student)* presente no *software Origin 8* foi possível comprovar que as médias geométricas obtidas em São José dos Campos e Uruguaína, para os métodos de análise foram significativamente diferentes ao nível de 5 %.

Desta forma, pela Tabela 5.2 pode-se notar que:

1) Os valores do método A1 são inferiores aos do método A2. Isso, pois o método A1 considera os relâmpagos simples que, segundo Rakov e Uman (2003), possuem descarga de retorno com pico e campo elétrico inferior aos das primeiras descargas de relâmpagos múltiplos;

2) Os valores do método C são os maiores.

3) Os valores encontrados em Bad Vöslau foram ligeiramente diferentes em Schulz et al. (2005) e Schulz e Diendorfer (2006). Isto é, em uma mesma localidade, porém em épocas diferentes, os valores não foram tão semelhantes;

4) Da mesma forma, comparando-se os resultados dos trabalhos realizados na Flórida – EUA (em Gainesville e Tampa) em diferentes ocasiões, observamos que os valores do método C para Gainesville são menores que os valores do método A1 para Tampa. Considerando que $A1 < C$, conforme item 2, o valor de C para Tampa - se calculado - será bem maior que o encontrado em Gainesville, indicando novamente que não há uma relação com a localidade.

5) Na Áustria, onde a porcentagem de raios simples em relação às descargas dos raios múltiplos foi maior, ocorreu também a maior diferença entre os valores dos métodos A1 e A2. Ou seja, quanto maior a quantidade de relâmpagos simples, maior a diferença percentual entre os valores dos métodos A1 e A2.

6) Os valores encontrados em São José dos Campos são semelhantes aos de Uppsala;

7) Uruguaiana e Bad Vöslau possuem valores inferiores aos demais, sendo que em Bad Vöslau os valores são os menores;

8) Tampa apresentou os maiores valores

Nag et al. (2008) sugerem que as discrepâncias encontradas em seu estudo são devidas às diferentes características dos relâmpagos que ocorrem em diferentes localizações geográficas, e também às diferentes instrumentações e metodologia envolvidas. No entanto, vale reafirmar que a metodologia e instrumentação utilizadas na Áustria e no Brasil foram idênticas.

Schulz et al. (2008) também supõem que as divergências encontradas são atribuídas às diferentes zonas climáticas características de cada região estudada.

6 – CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a relação entre os campos elétricos da primeira descarga de retorno e das subsequentes em relâmpagos nuvem-solo negativos.

Através de premissas descritas no capítulo 4, foram selecionados em São José dos Campos, 410 relâmpagos ocorridos em 02 dias de tempestades, correspondendo a 1319 descargas de retorno. Em Uruguaiana, foram selecionados 267 relâmpagos ocorridos em 6 dias de tempestades, correspondendo a 934 descargas.

Essa amostra foi analisada de maneira semelhante aos seguintes estudos:

- na Áustria: por Schulz e Diendorfer (2006), Schulz et al. (2005);
- na Suécia: por Schulz et al. (2008);
- nos Estados Unidos: por Nag et al. (2008) e Rakov et al. (1994).

Além disso, foram também comparadas as multiplicidades dos relâmpagos com aquelas verificadas nos seguintes estudos:

- nos Estados Unidos: por Saraiva et al. (2008), Rakov et al. (1994);
- no Brasil: por Saba et al. (2006);
- na Áustria: por Schulz e Diendorfer (2006);
- na Suécia: por Cooray e Perez (1994);

Para São José dos Campos, a multiplicidade média encontrada foi de 3,2, enquanto que em Uruguaiana esse valor foi de 3,5.

A porcentagem de relâmpagos nuvem-solo negativos simples foram de 37% em São José dos Campos e de 25% em Uruguaiana.

Observou-se que os picos de campo elétrico das descargas subsequentes de ordem dois a quatro foram superiores aqueles das descargas de ordem cinco em diante (este trabalho considerou as descargas até a décima primeira ordem, pois as demais tiveram pouca expressão estatística). Isso se deve ao fato de que, segundo Rakov e Uman (2003), descargas que encontram novos canais para o solo, produzem picos de campo elétrico maiores e, segundo Ferro (2008), a formação de novos canais raramente ocorre por descargas subsequentes de ordem superior a quarta.

De todas as descargas subsequentes estudadas em São José dos Campos, 20% tiveram seu pico de campo elétrico maior que a primeira descarga. Em Uruguaiana esse valor chegou a 31%.

A respeito da relação entre o campo elétrico da primeira descarga de retorno com as subsequentes, podemos concluir que:

- não existe uma dependência entre esta relação dos campos elétricos com o local de ocorrência das tempestades, mas sim do tipo de tempestade;
- Rakov e Uman (2003) afirma que esta relação é em torno de 2, e este trabalho mostrou esse valor é relativo, podendo variar consideravelmente, em função da metodologia aplicada;
- os resultados de São José dos Campos e de Uppsala (Suécia) foram semelhantes;
- em Tampa (EUA) esta razão é maior;
- em Uruguaiana e em Bad Vöslau (Áustria), os valores foram inferiores aos demais;
- em Bad Vöslau, a quantidade de relâmpagos simples em relação às demais descargas foi sempre superior aos demais estudos.

As divergências encontradas nos diversos estudos apresentados não possuem ainda uma explicação concisa, necessitando de novas pesquisas com instrumentação que permita, de forma mais precisa:

- distinguir as descargas de retorno e as descargas K, através da observação detalhada dos canais de escoamento de carga;
- analisar a influência dos novos canais nos valores de pico de campo elétrico;
- definir a distribuição das descargas de retorno dos raios (multiplicidade).

Talvez a utilização de câmaras de vídeo de alta velocidade em conjunto com as antenas de campo rápido, a exemplo de Miranda (2004), permita evidenciar as diferentes características dos relâmpagos e explicar as divergências encontradas a respeito da razão entre a primeira descarga de retorno e as subseqüentes em relâmpagos nuvem-solo negativos.

Os resultados obtidos, traduzidos nas porcentagens citadas sugerem que, ao contrário do que normalmente é assumido em muitos padrões para proteção contra descargas atmosféricas, os relâmpagos contendo descargas subseqüentes com pico de campo elétrico (e por inferência o pico de corrente) maiores que a primeira descarga de retorno não são incomuns e merecem atenção especial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLAROTTI, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida**. 2005. 101 p. (INPE-14476-TDI/1157). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JR, O. A new performance of evaluation of the brazilian lightning location system (RINDAT) based on high-speed camera observations of natural negative ground flashes. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 19., 2006, Tucson. **Proceedings...** Tucson: Arizona, USA: [s.n], 2006.

BEASLEY, W.; UMAN, M. A.; RUSTAN JR, P. L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. C7, p. 4883-4902, June 20, 1982.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BALLAROTTI. M. G.; SCHULZ, W. Characteristics of preliminary breakdown for first stroke and subsequent new-channel strokes. INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING / INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 2., 2006, Maceió, Brazil. **Proceedings...** Maceió: [s.n], 2006.

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 vídeo observations. **Atmospheric Research**. v. 84, p. 302-310, 2007.

COORAY, V.; PEREZ, H. Some features of lightning flashes observed in Sweden. **Journal of Geophysical Research**. v. 99, p. 10683-10688, 1994.

COORAY, V. **The lightning flash**. The Institute of Electrical Engineers.; 34. London, United Kingdom: IEE Power Series, 2003.

CORREIA, L. P.; SABA, M. M. F. Presence of Continuing Current in Negative Flashes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING / INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 3., 2008, Florianópolis, Brazil. **Proceedings...** Florianópolis: [s.n], 2008.

DIENDORFER, G.; SCHULZ, W.; RAKOV, V. Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Location System. **IEEE Trans. Electromag. Compat.** v.40, n.4, p. 452 – 464, doi: 10.1109/15.736206, 1998.

EDWARDS, R. **Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago nuvem-ar.**[S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.stormeyes.org/tornado/SkyPix/voda.htm>. Acesso em 10/9/2008.

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. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais.** 2008. 242 p. (INPE-15400-TDI/1414). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.13.47>>. Acesso em: 06 abr. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE PREVENÇÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC / INPE). **Imagens do satélite GOES -12 para as regiões sudeste e sul.** Cachoeira Paulista, 2009. 2 imagens do satélite GOES – 12. 10/01/09. Atendimento ao usuário.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (ELAT / INPE). **Localização dos sensores e abrangência da rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDat.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage>. Acesso em 18/9/2008.

KARWATH, A. **Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago nuvem-nuvem.** [S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.commons.wikimedia.org/wiki/index.html?curid=209193>. Acesso em 18/9/2008.

KOHL, M. J. K. **Parâmetros para cálculo da distância entre dois pontos situados na superfície do globo terrestre.** [S.l.: s.n]. Disponível em <http://obsn3.on.br/~jlk/geopath/>. Acesso em 04/06/2007.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, J. E. **The atmosphere.** 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1982. 478 p.

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

MAZUR, V. Physical processes during the development of lightning flashes, **C. R. Physique,** v. 3, n. 10, p. 1393-1409, 2002.

MIRANDA, F. J. **Estudo da forma de onda de campo elétrico de relâmpagos**. 2000. 119p. (INPE-8173-TDI/757). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.

MIRANDA, F. J. A study of time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil. **Journal of Geophysical Research**. v. 65, p. 293-297, 2003.

MIRANDA, F. J. **Estudo das características de relâmpagos nuvem-solo negativos através da análise comparativa de observações por múltiplas técnicas**. 2004. 192p. – (INPE-12181-TDI/975). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2001. 165 p. (INPE-8380-TDI/770). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.09>>. Acesso em: 06 abr. 2009.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: 06 abr. 2009.

NAG, A.; RAKOV, V. A.; SHULZ, W.; SABA, M. M. F.; THOTTAPPILLIL, R.; BIAJI, C. J.; OLIVEIRA FILHO, A., KAFRI, A.; THEETHAYI, N.; GOTSCHL, T. First versus subsequent return-stroke and field peaks in negative cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**. v.113, n. D19112, doi: 10.1.29/2007JD009729,. 2008.

NOYES, S. **Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago solo-nuvem**. [S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.pbbase.com/snoyes/image/82369034>. Acesso em 18/9/2008.

OLIVEIRA F, A.; SHULZ W., SABA, M. M. F.; PINTO JR, O.; BALLAROTTI, M. G. The relationship between first and subsequent stroke electric field peak in negative cloud-to-ground lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 13., 2007. Beijing, China. **Proceedings...** Beijing: [s.n], 2007.

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

PINTO JR, O. **A arte da guerra contra os raios**. São Paulo: Oficina de Textos. 2005. 80p.

RACHIDI, F.; BERMUDEZ, J. L.; RUBINSTEIN, M.; RAKOV, V. A. On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems. **Journal of Electrostatics**, v. 60, n. 2-4, p. 121-129, 2004.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. **Journal of Geophysical Research**, v. 9, n. D5, p. 5447-5452, doi:10.1029/JD095iD05, 1990.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10745-10750. 1994.

RAKOV, V.A. Lightning electric and magnetic fields. In: INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 1999, Zurich, Germany. **Proceedings...** Zurich: [s.n], 1999.

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

ROBINSON, D. **Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago intranuvem**. [S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.wvlightning.com/types.shtml>. Acesso em 18/9/2008.

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, n. D 03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006.

SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; CAMPOS, L. Z. S.; PINTO JR., O.; CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; FLEENOR, S. A. Properties of negative cloud-to-ground lightning from high speed video observations in Arizona, USA, and São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson. **Proceedings...**Tucson. USA.: [s.n], 2008.

SCHULZ, W.; LACKENBAUER, B.; PICHLER, H.; DIENDORFER, G. LLS data and correlated continuous E-field measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 8., 2005, São Paulo, Brazil. **Proceedings...**São Paulo: [s.n], 2005.

SCHULZ, W.; DIENDORFER, G. Flash multiplicity and interstroke intervals in Austria. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 28., 2006, Kanazawa. Japan. **Proceedings...** Kanazawa: [s.n], 2006.

SCHULZ, W.; SINDELAR, S.; KAFRI, A.; GÖTSCHL, T.; THEETHAYI, N.; THOTTAPILLIL, R. The ratio between first and subsequent lightning return stroke electric field in Sweeden. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 29., 2008, Uppsala. Sweden. **Proceedings...** Uppsala: [s.n], 2008.

THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; BEASLEY, W. H.; MASTER, M. J.; SHELUKHIN, D. V. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D7, p. 7503-7509, 1992.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; KRIDER, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33-38, Jan. 1975.

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

VALINE, W. and KRIDER, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, n. D20, 4441,doi:10.1029/2001JD001360, 2002.

WARNER, T. A. **Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago nuvem-solo**. [S.l.: s.n]. Disponível em http://www.warnerimages.com/gallery/lg2007/content/lgd1144v_large.html. Acesso em 18/9/2008 (a).

WARNER, T. A. **Relâmpago nuvem-solo negativo e sua descarga conectante**. <<http://www.warnerimages.com> >. Cortesia do autor. 2008 (b).