



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14476-TDI/1157

ESTUDO DE RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO ATRAVÉS DE CÂMERA RÁPIDA

Maurício Grade Ballarotti

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior, aprovada em 21 de fevereiro de 2005.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

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

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14476-TDI/1157

ESTUDO DE RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO ATRAVÉS DE CÂMERA RÁPIDA

Maurício Grade Ballarotti

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior, aprovada em 21 de fevereiro de 2005.

INPE
São José dos Campos
2007

551.594.221


Ballarotti, M. G.

Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida / Maurício Grade Ballarotti. -- São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. 101p.; (INPE-14476-TDI/1157)

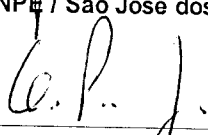
1. Relâmpago. 2. Câmera rápida. 3. Rede de detecção de relâmpagos. 4. Características do relâmpago. 5. Relâmpago nuvem-solo. I. Título.

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

Dr. José Humberto Andrade Sobral


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Ivan Jelinek Kantor


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez


Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Maurício Grade Ballarotti

São José dos Campos, 21 de fevereiro de 2005

*A meus pais, Cesar e Wanda,
e a minha namorada, Luciana.*

AGRADECIMENTOS

A meus pais, por toda a formação e pela oportunidade de estudo que me proporcionaram. Sem eles, definitivamente não teria feito esta dissertação.

À minha namorada Luciana que sempre me estimulou a fazer esta pesquisa e pelo valioso auxílio nas análises estatísticas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em especial ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pela oportunidade de utilização da Torre de Antenas IAE/AEL.

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Aos orientadores Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba e Dr. Osmar Pinto Júnior, pela especial dedicação durante todo o trabalho de orientação.

Aos outros membros do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), Dra. Iara, Fernando, Widinei e Marco, pelo companheirismo e pelo especial apoio.

Ao nosso engenheiro Evandro Ferraz pelos incontáveis auxílios nos experimentos.

Ao técnico Vítor Portezani, pelas várias ajudas nas campanhas.

Ao Kleber Naccarato, pelas frutuosas discussões sobre os dados da RINDAT.

Aos estagiários Ricardo Faria e Gustavo Cabral, pelos serviços prestados na redução dos dados.

A Carlos Kuranaga e Nelson Veissid, do Laboratório Associado de Sensores, pela ajuda nas análises óticas.

A todos os funcionários da DGE que nos proporcionaram toda a estrutura para a realização deste trabalho de mestrado.

E a muitos outros colegas inpeanos que, de uma forma ou de outra, ajudaram no desenvolvimento de todo o trabalho de mestrado.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de mestrado concedida pelo processo de número 02/10630-7.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo observacional das principais características dos relâmpagos nuvem-solo (NS) para região do Vale do Paraíba, com o intuito de comparar os resultados encontrados com aqueles obtidos em outros países. Este trabalho foi o primeiro na América Latina a estudar parâmetros do raio através de uma técnica acurada e altamente confiável, que utiliza uma câmera de alta resolução temporal. Somente quatro estudos no mundo foram realizados utilizando técnicas acuradas e envolvendo um grande número de amostras. Não existem na literatura internacional resultados observacionais baseados em câmeras rápidas para um grande espaço amostral, como o realizado por este trabalho. Os parâmetros do relâmpago NS investigados neste trabalho foram: (a) a duração total, (b) a multiplicidade das descargas de retorno (DRs), (c) o intervalo entre as DRs, (d) bifurcações ou o número de contatos no solo e (e) a corrente contínua. Quanto à metodologia empregada, a principal instrumentação observacional utilizada foi uma câmera rápida digital de 1.000 quadros/segundo e, em caráter auxiliar, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) foi também utilizada na observação, com a função principal da obtenção da polaridade e da discriminação do tipo das descargas. Foram dois os locais de observação: a Torre de Antenas do CTA, em São José dos Campos, e o Centro Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais, no INPE de Cachoeira Paulista. Um total de 314 eventos foi registrado pela câmera rápida, sendo que 257 puderam ser identificados como relâmpagos NS, incluindo positivos e negativos. Este estudo se dedicou principalmente ao conjunto de dados referente aos 233 NS que puderam ser identificados como sendo negativos. Os principais resultados encontrados estão de acordo com a literatura (os quatro trabalhos comentados anteriormente): multiplicidade média de 3,8; média geométrica do intervalo entre DRs de 61 ms; e número médio de pontos de contato no solo de 1,69. Entre as contribuições inéditas desta pesquisa destacam-se: a distribuição não-lognormal da duração total; a medição da duração da corrente contínua abaixo de 10 ms; alguns aspectos sobre a consolidação do canal no que diz respeito à bifurcação; além de comportamentos não-usuais dos raios, pouco descritos na literatura, como a bifurcação da descarga de retorno, a reutilização de canais após a bifurcação do raio, uma bifurcação após 2 ms da descarga anterior, uma bifurcação após 4 DRs ocorridas num mesmo canal. Os registros da câmera rápida aliados às informações geradas pela RINDAT também possibilitaram uma breve avaliação do desempenho da Rede para o Vale do Paraíba, tanto em termos de eficiência de detecção quanto de precisão de localização, com um número razoável de amostras. Seu desempenho, em termos de eficiência de detecção, se mostrou coerente com o estimado pelo fabricante: 54,7% para DRs e 87,4% para raios. Em termos de precisão de localização, foi calculado somente um erro máximo, resultando numa média de 5,3 km.

CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING STUDY BASED ON HIGH-SPEED CAMERA

ABSTRACT

The main objective of this work was the observational analysis of some cloud-to-ground flashes characteristics for the Paraíba Valley region (East of Sao Paulo State) and the comparison with others found in different countries. This work was the first accurate-stroke-count study in Latin America. Only four accurate-stroke-count studies involving a significant data base were done in the world. In the international literature, there are no observational results based on high-speed cameras and involving a significant data base as done in this master thesis. The ground flash parameters analyzed here were: (a) total duration, (b) stroke multiplicity, (c) interstroke interval, (d) number of ground terminations and (e) continuing current duration. The main instrument was a 1,000 frames/sec digital high-speed camera, and, the secondary instrument was the Integrated National Lightning Detection Network – RINDAT which provided flash polarity and better discrimination information between intra-cloud and ground flashes. Two sites were used to record the images: a tower (in Sao Jose dos Campos City, near INPE) and a INPE's facility at Cachoeira Paulista City. A total of 314 events were recorded, being 257 classified as ground flashes (positives and negatives). This study was dedicated mainly to the data group of 233 negative ground flashes. The main results were in agreement with the literature (specially the four accurate studies mentioned above): average stroke multiplicity of 3.8; interstroke interval of 61 ms (geometric mean); and 1.69 ground terminations per flash in average. Some special contributions of this work are: the non-lognormal distribution for total duration; continuing current duration measurements below 10 ms for many cases; some considerations about channel consolidation related to the creation of a new termination to ground. Also, some unusual ground flash behavior – poorly described until now – like: forked return stroke; channel reuse after a new termination was created; a new ground termination established after only 2 ms from the previous stroke, and, in other event, after 4 consecutive strokes in the same channel. The camera recordings conjugated with RINDAT data allowed a brief performance evaluation for the Paraíba Valley Region in terms of detection efficiency (DE) and location accuracy estimation, for a reasonable number of cases. Its performance was in agreement with the manufacturer in terms of DE: 54.7% for stroke and 87.4% for flashes. It was calculated a maximum error for location accuracy, resulting in a arithmetic mean of 5.3 km.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Definição e Tipos de Relâmpagos	23
1.2 O Relâmpago Nuvem-Solo	24
1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características	25
1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo	31
1.2.3 Pontos de Contato no Solo	31
CAPÍTULO 2 METODOLOGIA UTILIZADA	33
2.1 Instrumentação Observacional	33
2.1.1 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade	33
2.1.2 Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas	39
2.2 Coleta e Redução dos Dados	47
CAPÍTULO 3 ANÁLISE E DISCUSSÃO	51
3.1 Relâmpagos Nuvem-Solo Observados no Vale do Paraíba	51
3.1.1 Duração Total	51
3.1.2 Multiplicidade de Descargas de Retorno	53
3.1.3 Pontos de Contato no Solo	58
3.1.4 Intervalo entre Descargas de Retorno	68
3.1.5 Corrente Contínua	76
3.2 Breve Avaliação de Desempenho da RINDAT para o Vale do Paraíba	82
3.2.1 Eficiência de Detecção	83
3.2.2 Estimativa da Precisão de Localização	85
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A PLANILHA UTILIZADA NA REDUÇÃO DOS DADOS OBSERVACIONAIS	99
APÊNDICE B DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE APROXIMADAS PARA PARÂMETROS DA DESCARGA DE RETORNO E DO RAIO	101

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.....	23
1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	27
1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).....	29
1.4 – Fotografia de um raio com dois canais. É possível observar as ramificações do Líder Escalonado de cada um dos canais.	32
2.1 – Fotografias (a) da câmera <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.	34
2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).....	36
2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o da câmera em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade da imagem.....	37
2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.	37
2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).....	38
2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).....	38
2.7 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL (raios naturais) e (b) Estande de observação do CIPRIN (raios artificiais e naturais também).	39
2.8 – Ilustração do método MDF. S_n representa o sensor n e L_{ij} a intersecção das retas geradas pelos azimutes.....	41
2.9 – S_n representa os sensores. Ilustrações dos métodos (a) TOA e (b) IMPACT.	41
2.10 – (a) Fotografia de um sensor IMPACT. (b) Distribuição dos Sensores constituintes da RINDAT. LPATS (III e IV) são sensores que utilizam a técnica TOA.....	42
2.11 – Distribuição Gaussiana 2D dos Erros de Localização mostrando a localização estimada do evento no ponto de menor probabilidade (pico). O plano XY é o plano geográfico e o eixo Z a probabilidade/erro.	46
2.12 – Distribuição de todas as DRs detectadas pela RINDAT e registradas pela Câmera Rápida durante as campanhas de 2003 e 2004. Os dois locais de observação estão indicados no mapa por triângulos: São José dos Campos (SJC) e Cachoeira Paulista (CP). A distância entre os dois locais de observação é de 116 km.....	48
3.1 – (a) Histograma e (b) distribuição de probabilidade de todas as durações medidas.....	52

3.2 – (a) Histograma e (b) distribuição de probabilidades do número de descargas por raio. A multiplicidade máxima observada foi 16, em somente uma ocorrência, (relacionada com a máxima duração registrada e apresentada na Seção 3.1.1).	57
3.3 – (a) Histograma da ocorrência de DR de ordem N e (b) probabilidade de ocorrência da DR de ordem N.	58
3.4 – Quadros não-sequenciais ilustrando um raio 236 com 3 diferentes pontos de contato no solo. Evento ocorrido em 29/mar/2004, às 17h10min42s (UT).....	59
3.5 – Histogramas da multiplicidade do canal observadas (a) no Vale do Paraíba e (b) no estado da Flórida (EUA).	61
3.6 – Três quadros sequenciais da 1ª DR do raio 123, ocorrido em 15/jan/2004 às 19h10min26s (UT). Da esquerda para a direita: três ramos principais do líder escalonado aproximando-se da conexão com o solo; clarão devido à descarga de retorno; e os dois ramos da DR bifurcada pouco iluminadas devido ao decaimento da corrente.	64
3.7 – Quadros consecutivos envolvendo a DR bifurcada do raio 237, ocorrido em 29/mar/2004, às 17h12min43s (UT). Os dados temporais indicados são provenientes do GPS da camera rápida. Da esquerda para a direita: líder escalonado com os dois ramos principais prestes a conectar o solo; conexão da DR; CC no ramo esquerdo – o ramo direito ou se extinguiu ou possui baixos níveis de luminosidade.	65
3.8 – Ilustração de um raio bifurcado, indicando os comprimentos dos dois ramos, entre o nó e o ponto de contato no solo.	66
3.9 – Quadro da DR do raio 221, onde não é possível classificar entre DR bifurcada ou duas DR distintas separadas por centenas de μ s. O CCD finalizava a exposição do frame quando a frente de onda do lado esquerdo ainda subia pelo canal (seta). Evento ocorrido em 01/mar/2004, às 20h17min15s423ms (UT).	68
3.10 – (a) e (b) Histogramas e (c) distribuição de probabilidades de todos os 608 intervalos entre DRs referentes aos 178 raios, medidos entre 2 e 782 ms.....	70
3.11 – Sequência de quadros consecutivos referentes às 2 primeiras DRs do raio 229, ocorrido em 27/mar/2004, às 19h40min02s (UT). Informações temporais do GPS/câmera estão estampadas em cada quadro. Os instantes 988 ms, que registra a iluminação da base do canal, e 989 ms, do restante do canal visível, envolvem a primeira DR. O instante 990 ms não possui DR, mas, em 991 ms, o raio se bifurca, originando a 2ª DR em um outro ponto de contato.	71
3.12 – (a) e (b) Histogramas em diferentes escalas e (c) distribuição de probabilidades dos intervalos entre DRs que seguiram o mesmo canal da anterior.....	72
3.13 – (a) e (b) Histogramas em diferentes escalas e (c) distribuição de probabilidades dos intervalos entre DRs que precederam um novo canal.	74
3.14 – Média Geométrica dos intervalos entre DRs em relação à multiplicidade encontrados (a) em nosso trabalho e (b) pela ALDIS. O número de intervalos utilizado em nosso trabalho, para cada valor de multiplicidade, está indicado no interior do gráfico.	76

3.15 – Seqüência de quadros consecutivos retratando o início de uma mini CC de 6 ms. Da esquerda para a direita: DR, corrente intermediária, e início da CC. Ocorrido em 07/nov/2003, 18h26min49s UT e observado na Torre de SJC.....	77
3.16 – Histograma para todas as ocorrências de CC curta e longa.....	78
3.17 – Histograma das ocorrências de CC longa no Vale do Paraíba. São mostradas aqui 45 ocorrências, já que alguns raios contiveram mais de uma CC longa.....	79
3.18 – Histograma das ocorrências de CC curta. São mostradas aqui 70 ocorrências, já que alguns raios contiveram mais de uma CC curta.	80
3.19 – Histograma das ocorrências de CC mini.	81
3.20 – Ajuste exponencial dos valores encontrados no histograma da Figura 3.19.	82
3.21 – Sensores da RINDAT envoltantes do Vale do Paraíba, com seus respectivos proprietários.....	83
3.22 – Distribuição de todas as DRs de canal visível detectadas ao redor dos dois locais de observação: a Torre de Antenas CTA/IAE/AEL e o INPE/CIPRIN, indicadas por seus respectivos municípios (SJC e CP).	84
3.23 – Identificação do ponto de contato no solo para o raio 219, observado a 15 km de distância; o tamanho do pixel é de 30 m, para este caso.	86
3.24 – Método de cálculo da maior distância entre soluções para raios não-bifurcados (que tocaram o solo num único ponto). As soluções de localização encontradas pela RINDAT estão mostradas de 1 a 5. A máxima distância encontrada, neste caso, foi de 1,9 km para um raio que teve todas as suas DRs ocorridas num mesmo ponto.....	86
3.25 – Histograma das maiores distâncias entre pontos de contato encontrados pela RINDAT referentes a raios de canal simples.	87

LISTA DE TABELAS

1.1 – Principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura internacional (Uman, 1984; Rakov et Uman, 2003)...	30
2.1 – Exemplo de dados, em Tempo Real, referentes a um raio. O sistema acusou três descargas.	43
3.1 – Número de descargas por raio negativo e percentual de raios simples obtidos por estudos de contagem acurada de descargas [adaptada de Rakov et Huffines (2003)].	55
3.2 – Porcentagem das diferentes multiplicidades de canal encontradas no Vale do Paraíba e no estado americano da Flórida.	60
3.3 – Ocorrência de bifurcação em relação à ordem da descarga de retorno.	62
3.4 – Probabilidade de bifurcação após n DRs ocorridas num mesmo canal.....	63
3.5 – Dados da RINDAT para a DR do raio 237 em questão. As informações temporais da ordem de μs estão em negrito.....	67
3.6 – Resultados estatísticos dos intervalos que precedem a ocorrência de um novo canal.	73
4.1 – Características do relâmpago nuvem-solo negativo encontradas neste trabalho...	92

LISTA DE SÍMBOLOS

- c - Velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- σ_{\log} - Desvio padrão logarítmico na base 10

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCD	-	<i>Charge Couple Device</i>
CC	-	Corrente contínua
DR	-	Descarga de retorno
DRs	-	Descargas de retorno
ED	-	Eficiência de Detecção
GPS	-	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IN	-	Relâmpago do tipo intra-nuvem
MD	-	Máxima Distância entre Descargas de Retorno de um Raio de Canal Simples
NS	-	Relâmpago do tipo nuvem-solo
NS	-	Relâmpago do tipo nuvem-solo
PL	-	Precisão de Localização
RINDAT	-	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
SN	-	Relâmpago do tipo solo-nuvem

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Definição e Tipos de Relâmpagos

Um relâmpago é definido como sendo uma descarga transitória de alta corrente cujo comprimento percorrido tem dimensão de quilômetros (Uman e Krider, 1989). A rigor, uma nuvem não necessita estar envolvida com o fenômeno, mas geralmente ocorre a participação de um tipo específico de nuvem: a nuvem de tempestade, conhecida por *cumulonimbus*. A Figura 1.1 mostra uma fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.



FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.

Denominamos os tipos de relâmpagos em função de sua origem e do ponto onde terminam. Eles podem ocorrer (1) de uma nuvem para o solo (chamado Nuvem-solo ou NS), (2) do solo para a nuvem (chamado Solo-Nuvem ou SN), (3) dentro da nuvem (chamado Intranuvem ou IN), (4) entre nuvens, (5) de uma nuvem para a atmosfera

acima dela e, finalmente, (6) de uma nuvem para um ponto qualquer no ar (descargas no ar).

Os relâmpagos IN são os mais frequentes (cerca de 80% do número total global de relâmpagos), mas de difícil estudo por ocorrerem em meio à opacidade da nuvem. Sua investigação requer o uso de radares e antenas de rádio frequência. Podem ser considerados como curto-circuito durante o processo de separação de cargas que ocorre durante a tempestade no interior da nuvem (Pinto e Pinto, 2000).

Os relâmpagos que envolvem o solo, nuvem-solo e solo-nuvem, embora não sejam os mais frequentes, são os mais estudados por estarem mais acessíveis à observação visual – por conseguinte, à observação instrumentada também –, e por causa do perigo que apresentam. Os relâmpagos que envolvem o solo são denominados usualmente por **raios**. Estes, por sua vez, podem ser divididos em dois tipos: os negativos e os positivos, dependendo da polaridade predominante das cargas na região da nuvem onde se originam. Assim, existem quatro sub-tipos: NS negativo, NS positivo, SN negativo e SN positivo.

Os relâmpagos nuvem-solo negativos nascem no centro negativo de cargas próximo à base da nuvem e, em geral, são mais frequentes que os positivos. Os relâmpagos positivos são menos conhecidos, e só foram estudados mais detalhadamente nas últimas décadas. Acredita-se que, na maior parte das vezes, eles se originam no centro positivo de cargas transportando do solo para nuvem uma carga negativa, ou seja, equivalente à transferência de cargas positivas para o solo (Saba, 1997). A polaridade da descarga é determinada, portanto, pela polaridade da carga (resultante) depositada no solo.

Os relâmpagos Solo-Nuvem são raros em comparação com os nuvem-solo, originando-se geralmente de pontos elevados tais como torres, edifícios, montanhas e árvores.

1.2 O Relâmpago Nuvem-Solo

Como o presente trabalho visa observar relâmpagos que envolvam o solo, NS e SN, (pela facilidade de visualização) e os relâmpagos Solo-Nuvem são eventos raros,

dedicaremos atenção ao nuvem-solo. Segue, assim, nas próximas seções, uma introdução teórica para os NS.

1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características

Um relâmpago nuvem-solo negativo segue necessariamente seis etapas, nesta ordem, a saber: (a) descarga p-N, (b) líder escalonado, (c) descarga conectante, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno subsequente (Saba, 1997):

- a) os relâmpagos negativos para o solo começam com uma **descarga entre o centro positivo menor na base da nuvem e o centro negativo** para a liberação dos elétrons ligados às partículas de água ou gelo (Figura 1.2);
- b) uma fraca descarga luminosa (geralmente não visível) se propaga em direção ao solo, criando um canal ionizado (caminho condutor). Essa descarga, denominada **líder escalonado** (*stepped leader*), propaga-se para baixo até aproximadamente 5 a 50 m do solo, com velocidade média da ordem de 10^5 m/s. O líder escalonado geralmente ramifica-se, mas nem todos os seus ramos estendem-se até o solo (Figura 1.2b);
- c) uma **descarga conectante** surge com a intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e o solo. Tal descarga geralmente parte de objetos pontiagudos existentes na superfície, como árvores e edifícios, e desloca-se em direção à parte frontal do líder escalonado;
- d) quando o encontro ocorre, a descarga conectante transforma-se numa descarga forte e de intensa luminosidade, denominada **descarga de retorno** (*return stroke*). É justamente essa descarga que é vista como um clarão. Ainda que preferencialmente o relâmpago atinja os objetos mais altos, isso nem sempre acontece. Na descarga de retorno, as cargas negativas (elétrons) presentes no canal já ionizado pelo líder escalonado são aceleradas, o que cria uma corrente ascendente (os elétrons fluem da nuvem para o solo) com picos de 30 kA. A velocidade de propagação da frente de onda (ou da luminosidade ao longo do canal) é da ordem de 10^8 m/s (um terço da velocidade da luz). A duração de tal

descarga é de aproximadamente 70 microssegundos. Em média, ocorrem três descargas por relâmpago, mas há registros de casos com até 26 descargas (Figura 1.2d,e);

- e) o **líder contínuo** (*dart leader*) se dá quando o canal do raio está fracamente ionizado e, assim, este líder deve ionizá-lo novamente. Caracteriza-se como um líder por possuir baixa intensidade de corrente. Possui velocidade característica de $(1-2) \cdot 10^7$ m/s. Esta etapa ocorre somente quando, de alguma forma, existem cargas disponíveis próximas do canal feito anteriormente (Figura 1.2f,h);
- f) após o líder contínuo ter ionizado o canal, outra descarga ocorre, sendo esta chamada **descarga subsequente** (*subsequent stroke*). A diferença essencial entre descargas de retorno e subsequente é que a primeira é precedida de líder escalonado, pois não existe canal algum, enquanto que a segunda é precedida por um líder mais veloz, que apenas refaz um canal previamente existente (Figura 1.2g,i).

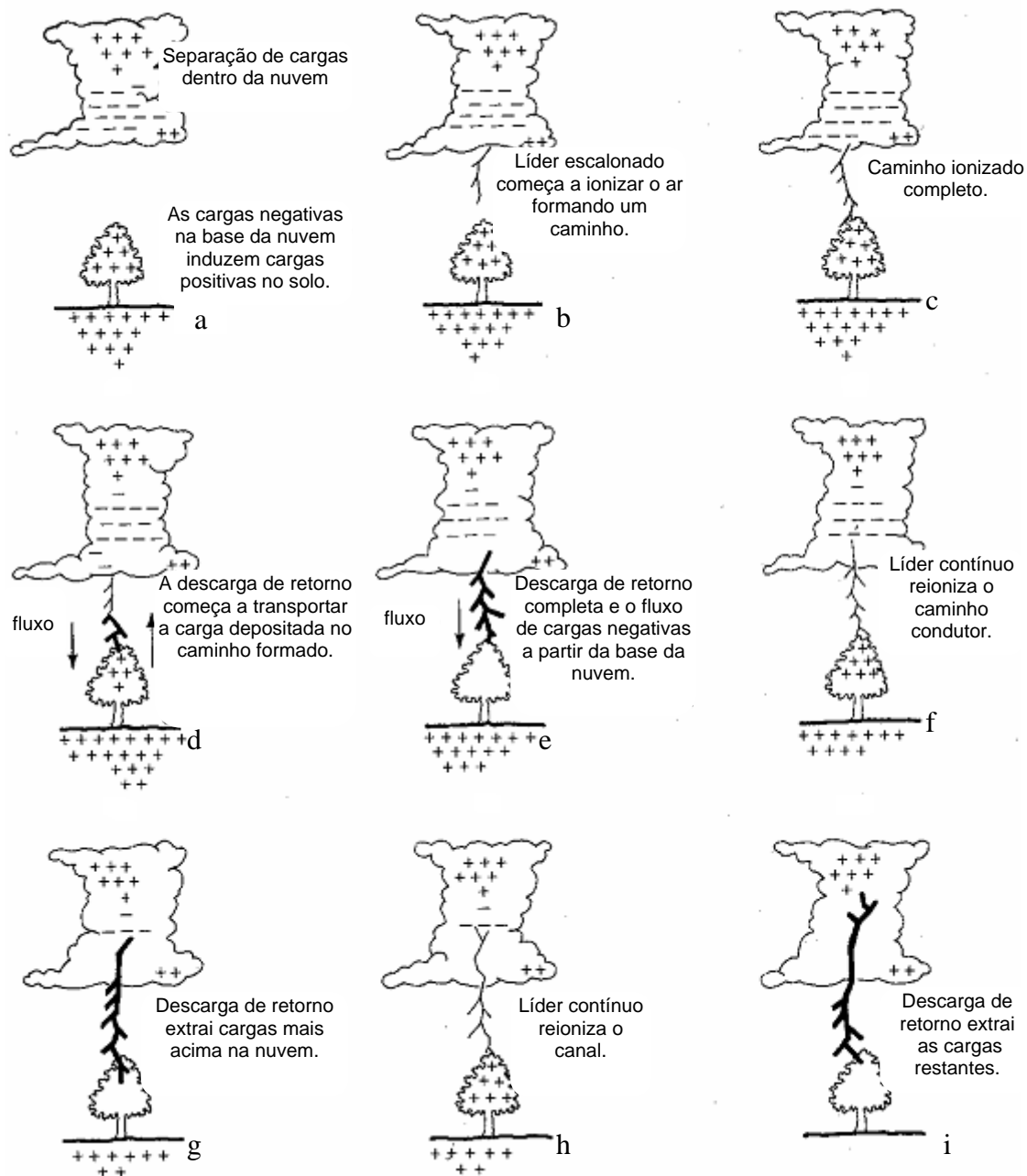


FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

FONTE: Modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).

Estas sucessivas **descargas subseqüentes**, em um único relâmpago, podem ser chamadas também de descargas múltiplas. Algumas vezes o olho humano é capaz de perceber essas descargas e ver o canal do relâmpago piscar. À noite, pode-se observar o

efeito estroboscópico gerado pela luminosidade de tais descargas em objetos em movimento, como o limpador de pára-brisa de um automóvel. Em geral as descargas subsequentes são menos ramificadas do que a primeira descarga de retorno.

Ainda, em cerca de 50% dos relâmpagos, a descarga de retorno é seguida por uma corrente contínua (CC), que pode ser entendida como sendo “um arco quase-estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo. Valores típicos de corrente é dezenas ou centenas de ampères, e de duração de até centenas de milissegundos” (Rakov et Uman, 2003). Entre o pico de corrente (dezenas de kA) da descarga de retorno e o nível quase-estacionário (centenas de ampères) da CC, pode existir uma etapa de transição, chamada de corrente intermediária, da ordem de 1 ms de duração com corrente da ordem de 1 kA (Uman, 1987).

Relâmpagos que contém corrente contínua podem ser chamados “relâmpagos quentes” e os que não a possuem, “relâmpagos frios”, apesar desta denominação não ser usual. Kitagawa et al. (1962) também os distinguiu como sendo “híbridos”, com CC, e “discretos”, sem CC. Os quentes são capazes de iniciar incêndios enquanto que os frios não. Apesar de terem a mesma temperatura, a diferença está em que ela é mantida por mais tempo nos relâmpagos quentes (décimos de segundos nos quentes e milésimos de segundos nos frios). No entanto, também os relâmpagos frios podem ser muito destrutivos já que o aumento essencialmente instantâneo da corrente dentro de um material com alta resistência à corrente elétrica causa um aquecimento súbito e uma conseqüente vaporização da parte interna do material. Como resultado, uma pressão muito alta é rapidamente gerada dentro do material, podendo levá-lo a explosão (Saba, 1997).

A Figura 1.4 ilustra as características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido (*streak camera* ou *Boy's camera*). Nota-se nesta ilustração os valores típicos de 30 e 40 ms entre descargas.

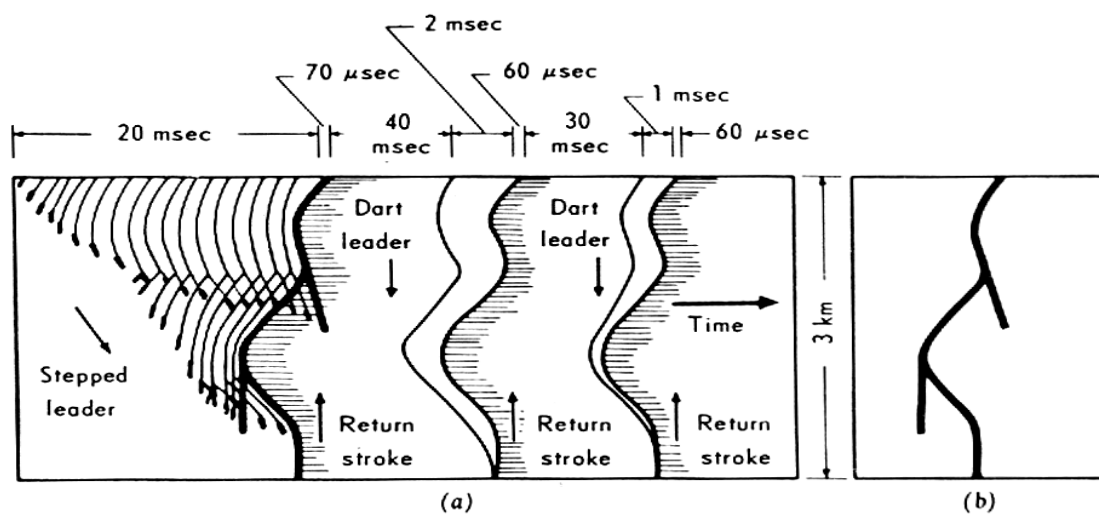


FIGURA 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).

FONTE: Uman (1987, p. 14).

A Tabela 1.1 exibe as principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos NS negativos.

TABELA 1.1 - Principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura internacional (Uman, 1984; Rakov et Uman, 2003).

CARACTERÍSTICA	ETAPA	VALOR TÍPICO
<i>Líder Escalonado</i>		
Comprimento dos passos		50 m
Intervalo de tempo entre passos		20 - 50 μ s
Velocidade média de propagação		2.10^5 m/s
Corrente		100 A
Duração total		35 ms
<i>Descarga de Retorno</i>		
Velocidade de propagação		(1-2). 10^8 m/s
Pico de corrente		30 kA
Comprimento do canal		5 km
Duração		70 μ s
<i>Líder Contínuo</i>		
Velocidade de propagação		(1-2). 10^7 m/s
Corrente		1 kA
Duração total		1 – 2 ms
<i>Descarga Subseqüente</i>		
Corrente		10 – 15 kA
Velocidade de propagação		(1-2). 10^8 m/s
<i>Corrente Contínua</i>		
Duração		100 ms
<i>Características Gerais de um Relâmpago</i>		
Diâmetro do canal		1-2 cm
Número de descargas de retorno		3
Intervalo de tempo entre as descargas		60 ms
Duração total		300 ms
Carga total envolvida		25 C

1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo

“Os relâmpagos nuvem-solo positivos seguem de um modo geral as mesmas etapas descritas para os negativos, porém com algumas diferenças” (Pinto e Pinto, 2000). Em geral, iniciam-se a partir de um líder com uma luminosidade mais fraca comparada ao líder escalonado de um NS negativo; tal líder propaga-se a partir de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, não apresentando etapas e sim uma luminosidade contínua, porém com variações periódicas de intensidade. Outra característica importante é o número de descargas de retorno: somente uma na maioria das vezes. Costumam também apresentar corrente contínua mais longa (transferem maior quantidade de carga elétrica para o solo) do que os NS negativos, tornando-se mais destrutivos e sendo responsáveis pela maioria dos incêndios.

1.2.3 Pontos de Contato no Solo

No caso de raios NS com multiplicidade maior do que um, ou seja, que possuem descargas subseqüentes, o ponto de contato no solo de tais descargas não é necessariamente o mesmo da descarga anterior. O canal do raio muda de posição e de forma: isto se dá porque, de alguma forma, foi mais fácil estabelecer um novo caminho para a descarga do que utilizar o anterior. A Figura 1.4 mostra uma foto de um raio com dois canais diferentes, também chamado bifurcado. Dentro da nuvem ou mesmo fora dela, os canais múltiplos podem apresentar trechos em comum, diferenciando-se entre si apenas em parte do canal. Thottappillil et al. (1992) analisa a distância entre os pontos de contato de canais múltiplos e encontra uma média geométrica de 1,7 km, para uma distribuição de valores entre 0,3 e 7,3 km de um conjunto de 22 raios.

Todas as características dos relâmpagos expostas até aqui são provenientes da literatura internacional e não de observações realizadas no Brasil, que são limitadas.



FIGURA 1.4 – Fotografia de um raio com dois canais. É possível observar as ramificações do Líder Escalonado de cada um dos canais.

FONTE: M. Garay.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA UTILIZADA

2.1 Instrumentação Observacional

Este trabalho teve por objetivo principal a análise estatística de várias características dos relâmpagos NS para o Vale do Paraíba. Ele está baseado em uma técnica observacional inovadora: um sistema de imageamento digital de alta velocidade (câmera rápida), onde foram obtidos vídeos de 1.000 quadros/s. Como fonte de informação complementar, utilizamos os dados da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), que consiste num sistema de detecção de relâmpagos de larga escala implantado no Brasil (cobrindo mais da metade do território nacional). Ambos os instrumentos possuem sincronização temporal via *Global Positioning System* (GPS), o que possibilita a comparação entre os dados coletados.

Em outras palavras, para a maioria dos eventos observados, cada raio foi observado tanto pela câmera quanto pela Rede, proporcionando maior detalhamento dos eventos, dado que cada técnica utiliza princípios diferentes: imageamento e captação de radiação eletromagnética. Quanto à Rede, além de utilizada como instrumento complementar, teve também seu desempenho avaliado pela câmera rápida (analisado na Seção 3.2), que consistiu também em um objetivo secundário deste trabalho.

2.1.1 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade

Utilizamos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (ou câmera rápida, forma abreviada utilizada neste trabalho, ou ainda *High Speed Digital Imaging System*, nomenclatura usada pelo fabricante) “*MotionScope PCI*” do fabricante *Red Lake*, modelo 8000S. Este sistema está baseado num sensor CCD (*Charge Couple Device*) para a captura das imagens. Este adquire e grava uma seqüência de imagens digitais de um evento a uma taxa ajustável de 60 a 8.000 quadros por segundo, sendo que os arquivos de saída, com extensão *avi*, podem ser visualizados em um PC. Possui sincronização de tempo via GPS, possibilitando comparação com outros instrumentos

em análises de um mesmo evento. A Figura 2.1 mostra duas fotografias: uma do sistema, que é composto essencialmente de uma câmera e de seu *hardware* de *interface* com o PC, e outra do sistema instalado num módulo móvel, projetado e construído por nós para facilitar o posicionamento da câmera durante as aquisições de imagens.

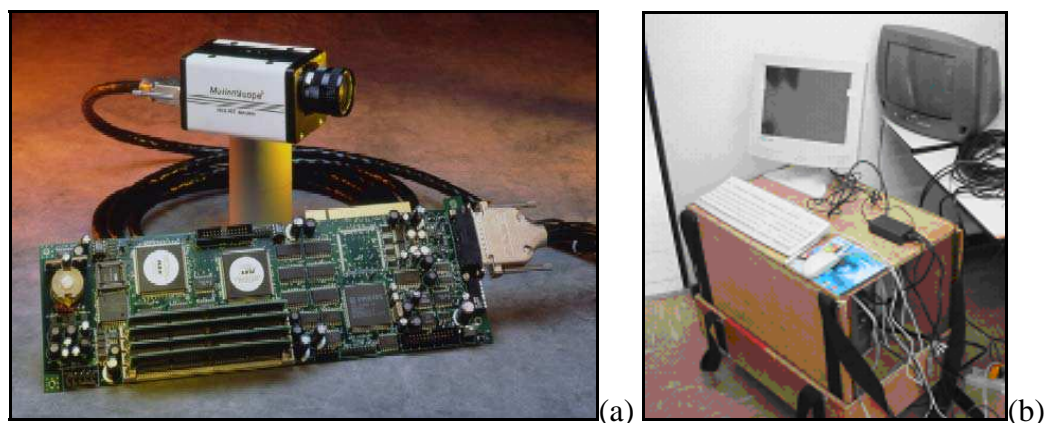


FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera 8000S MotionScope com sua placa de *interface* com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.

FONTE (a): Red Lake (2002).

A taxa de aquisição está configurada para 1.000 quadros por segundo (qps). Não foi usada a máxima (8.000 qps) porque há um compromisso entre taxa de aquisição e ângulo de abertura (ou, equivalentemente, área utilizável do CCD). Assim, a 1.000 qps, a resolução da imagem é de 240 x 210 pixels (a total do sensor CCD é de 656 x 496 pixels), onde cada pixel possui 7,4 μm x 7,4 μm . Para esta taxa, os ângulos de abertura são 23,72° na vertical e 26,99° na horizontal; o tempo total de gravação é de 2,0 segundos; cada arquivo gerado pela câmera possui 2.000 quadros; e o tempo de exposição de cada quadro é aproximadamente 1,0 ms (é aproximado porque existe um tempo de *refresh* do CCD entre dois quadros, que o fabricante diz ser desprezível e não fornece). Ou seja, em termos práticos, o sistema funciona ininterruptamente. Tal configuração se mostrou bem ajustada para a filmagem dos relâmpagos naturais.

Este sistema é operado basicamente da seguinte forma: (1) a câmera é direcionada para a tempestade em observação. (2) A luminosidade é ajustada para que se tenha um contraste luminoso adequado do cenário. (3) Ao visualizar um raio, o operante aperta

um botão de *trigger* (acionamento) do sistema; aqui, é utilizado um recurso computacional chamado **Fila Circular**, que consiste em gravar dados continuamente em uma determinada região de memória e, quando o ponteiro (que indica a posição de memória a ser utilizada) chega na sua última posição, o programa aponta para a primeira posição da memória. Assim, ao se acionar o pulso de *trigger*, as imagens serão gravadas, consistindo de imagens passadas e futuras em relação ao momento do *trigger*. Ou seja, ao configurar o *trigger* em 50%, a gravação do filme registrará 1,0 segundo de imagens anteriores e 1,0 segundo de imagens posteriores ao momento do *trigger*. Como o tempo de resposta típico dos operadores (intervalo de tempo entre os momentos do evento e o do acionamento manual) está em torno de 400 ms, geralmente registramos 0,6 s antes da ocorrência da 1ª descarga de retorno e 1,4 s após esta ocorrência. Dado que a duração máxima de um raio está em torno de 1,0 s, tal ajuste de 50% mostrou-se o mais eficaz na captura de todas as fases do raio.

Outro aspecto importante deste sistema está na sua sensibilidade para os diferentes comprimentos de onda. A Figura 2.2 mostra o gráfico fornecido pelo fabricante que relaciona Responsividade (em inglês, *Responsitivity*¹) e comprimento de onda do sinal de entrada. Originalmente, a câmera possuía um Filtro Infravermelho com curva característica exibida na Figura 2.3. Tal filtro foi substituído por uma lâmina de vidro, que tem sua Curva de Transmissão Ótica exposta na Figura 2.4. O levantamento das curvas de transmissão do filtro e do vidro foi realizado pelo Laboratório Associado de Sensores do Centro de Tecnologias Especiais do INPE. Nota-se, nas Figuras 2.3a e 2.3b, uma diferença significativa para a faixa de comprimento de onda entre 300 e 350 nm. [Parece que, pelo fato do CCD ser muito pouco sensível para esta faixa (Figura 2.2), o fabricante não levou em conta a baixa transmissão do filtro nestes comprimentos de onda]. Pode-se notar, portanto, que o vidro é compatível com o CCD, ou seja, não filtra nenhum comprimento de onda que sensibilize o CCD. Cabe salientar que a câmera rápida integra a luminosidade num determinado período (em nosso caso 1 ms) indistintamente para todos os comprimentos de onda (para os quais ela é sensível), não

¹ *Responsitivity*: razão entre a saída elétrica e a entrada ótica, num fotodetector (geralmente expressa em A/W ou V/W).

permitindo estudos espectrais – impossibilitando conseqüentemente inferências de temperatura, pressão e densidade do canal do relâmpago.

Nesta substituição, o registro do Líder Escalonado e da Descarga de Retorno (etapas do raio) foi intensificado na imagem por possuírem ambos componentes infravermelhos nos seus espectros de emissão, resultando num imageamento mais sensível. É possível notar tal diferença na Figura 2.5, que exibe imagens registradas do líder escalonado para dois diferentes eventos, com e sem o filtro infravermelho. A Figura 2.6 mostra duas fotografias: uma da lâmina de vidro e do filtro e outra da câmera com seu sensor CCD exposto.

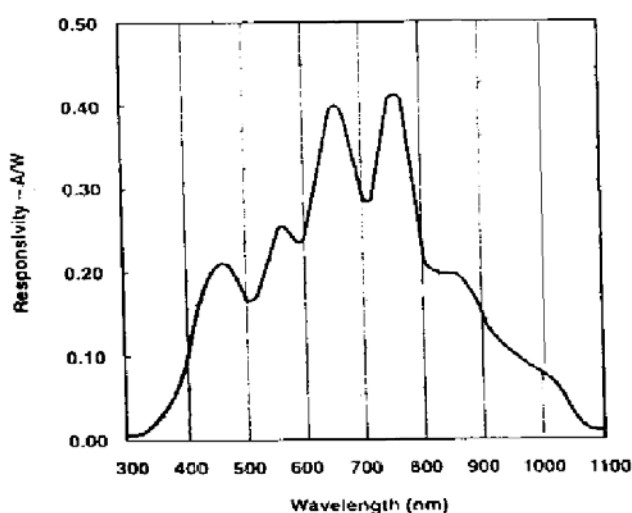


FIGURA 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

FONTE: Adaptada de Red Lake (2002, p. 1-2).

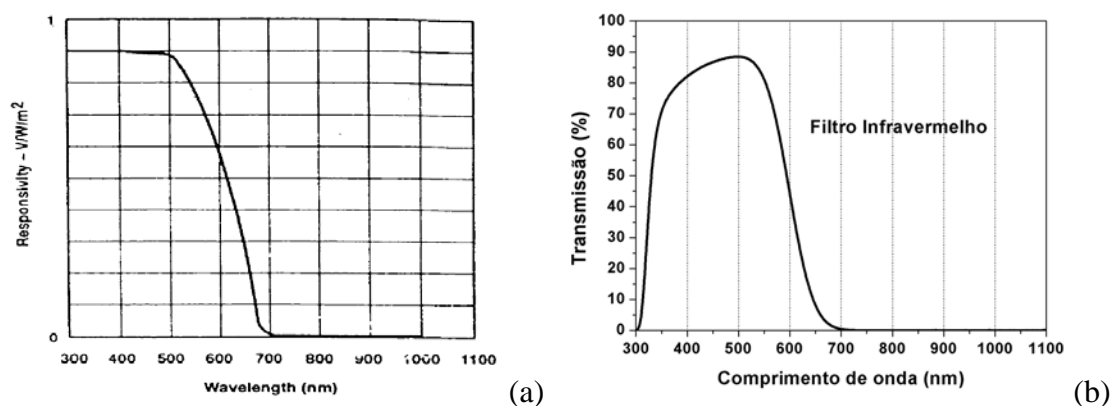


FIGURA 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o da câmera em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade da imagem.

FONTE (a): Red Lake (2002, p. 1-2).

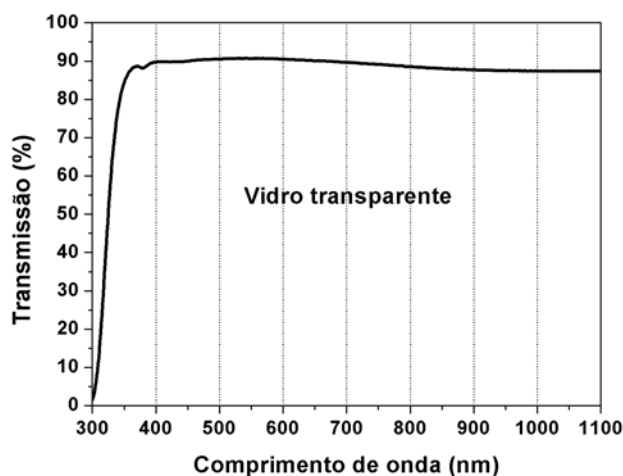


FIGURA 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

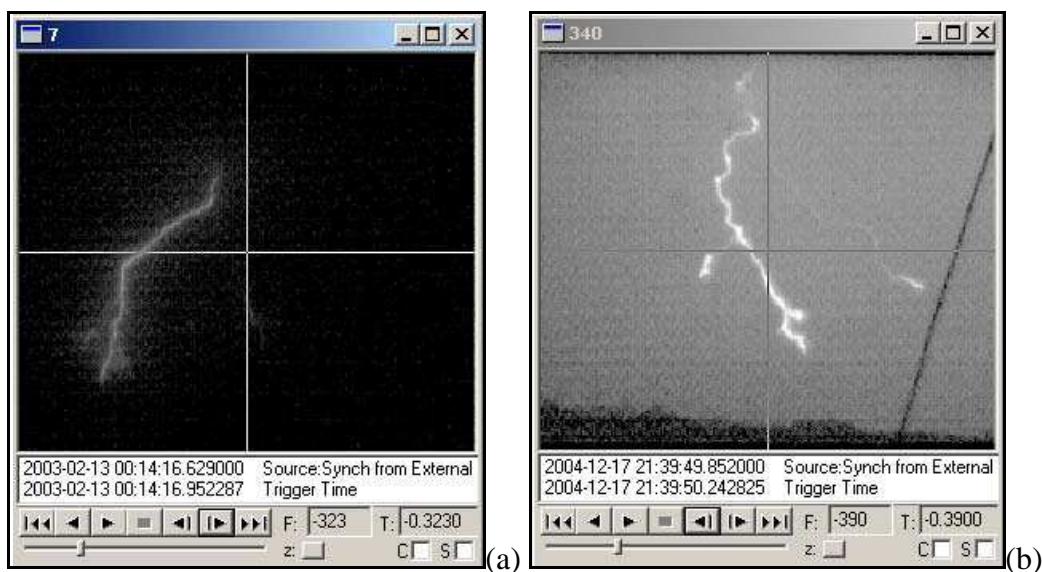


FIGURA 2.5 – Imagens do líder escalonado com (a) e sem (b) o filtro infravermelho.

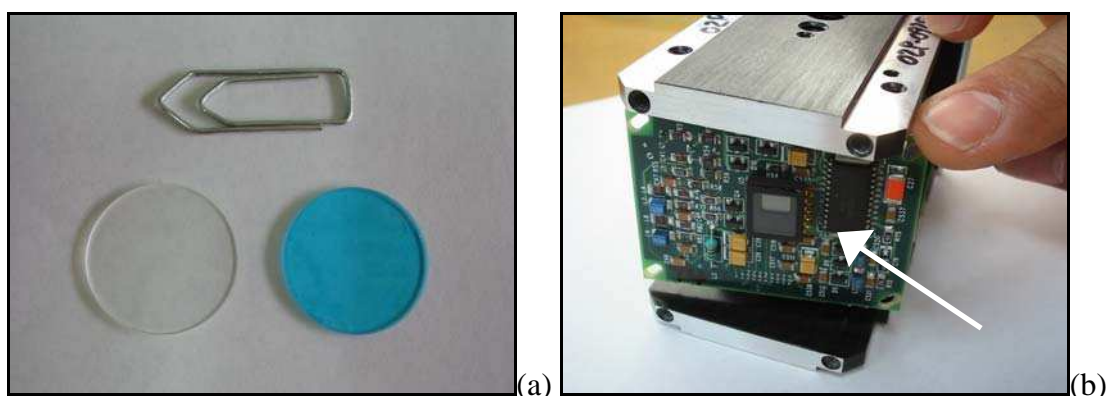


FIGURA 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

Os dois locais de observação foram os municípios de São José dos Campos e de Cachoeira Paulista (ambos situados no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo). O local, em São José dos Campos, é a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Já, em Cachoeira Paulista, a observação é feita no CIPRIN (Centro Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais) locado no INPE. Ambos são pontos elevados em comparação com o relevo local, possibilitando boa visibilidade. A Figura 2.7 exhibe fotos dos locais.

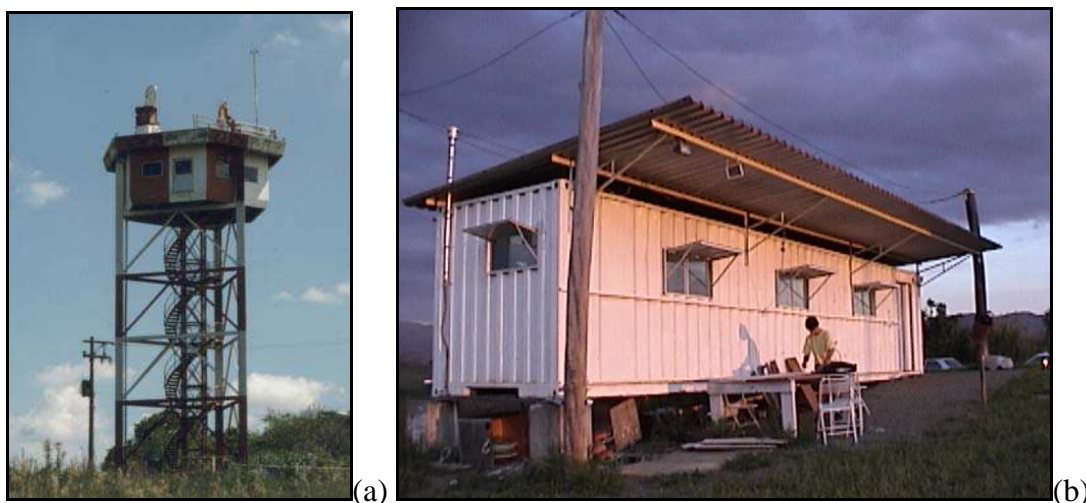


FIGURA 2.7 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL (raios naturais) e (b) Estande de observação do CIPRIN (raios artificiais e naturais também).

2.1.2 Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) é um sistema de detecção de relâmpagos de larga escala (ou sistema de localização de tempestades) implantado no Brasil (RINDAT, 2004), que consiste num complexo instrumento de medida utilizado para detectar relâmpagos que envolvem o solo (raios: NS ou SN), e identificar com precisão os locais onde os raios tocam a superfície. Isto é feito por uma rede de sensores remotos que detectam a radiação eletromagnética (EM) emitida pelos relâmpagos, analisam os sinais recebidos, por intermédio de algoritmos específicos, e eliminam aqueles cujas fontes não sejam descargas atmosféricas. Cada sensor que tenha detectado um evento válido envia os dados obtidos (os quais consistem basicamente do horário do evento, a intensidade do sinal, o tempo de subida e a largura de pulso do sinal) para uma Central de Processamento. Esta, por sua vez, 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 localização, o sistema pode inferir várias outras grandezas do evento: pico de corrente da descarga de retorno, multiplicidade, polaridade da corrente da descarga, dentre outras (GAI, 1999). Algumas destas grandezas serão correlacionadas com outras provenientes da câmera rápida.

Sistemas de Localização de Tempestades (como o RINDAT) estão atualmente baseados em duas tecnologias de detecção (GAI, 1999):

- Método da Direção Magnética (MDF, *Magnetic Direction Finding*): emprega duas **bobinas magnéticas** ortogonais entre si, capazes de medir a direção de uma descarga (mais precisamente o azimuth, que é o ângulo em relação ao norte geográfico). Neste método, quando dois ou mais sensores detectam uma descarga, a intersecção das retas definidas pelos azimuths determina o ponto de impacto (Figura 2.8). Quando três ou mais sensores detectam uma descarga, pode ser empregado um procedimento de otimização, chamado triangulação, que minimiza o erro no cálculo dos azimuths.
- Método do Tempo de Chegada (TOA, *Time of Arrival*): define um lugar geométrico circular dos possíveis pontos de impacto ao redor de cada sensor baseado no **horário absoluto de chegada da radiação EM** nos mesmos. O raio de cada círculo é calculado a partir da diferença de tempo entre o momento da descarga e o momento em que o sensor recebe o sinal EM. A localização é determinada, portanto, selecionando-se a posição e o horário correspondentes ao ponto de intersecção de todos os círculos (Figura 2.9a). Este algoritmo iterativo é normalmente chamado de Método de Localização por Intersecções Circulares. Quando no mínimo 4 sensores informam a ocorrência de uma descarga, este método é capaz de produzir uma solução sem ambigüidade e ao mesmo tempo otimizada.

A tecnologia *Improved Performance from Combined Technology* (IMPACT), desenvolvida na década de 90, combinou estes dois métodos, superando os desempenhos de cada um deles isoladamente. A Figura 2.9b ilustra tal método. Por possuir informação redundante, este método permite calcular uma localização ótima mesmo em uma condição de detecção mínima, isto é, quando uma descarga é registrada por apenas dois sensores. A Figura 2.10 exhibe uma fotografia deste sensor e a distribuição de todos os que formam a RINDAT, que utilizam tanto tecnologias

IMPACT quanto TOA (antenas dos tipos LPATS III E IV, *Lightning Positioning and Tracking Sensor*).

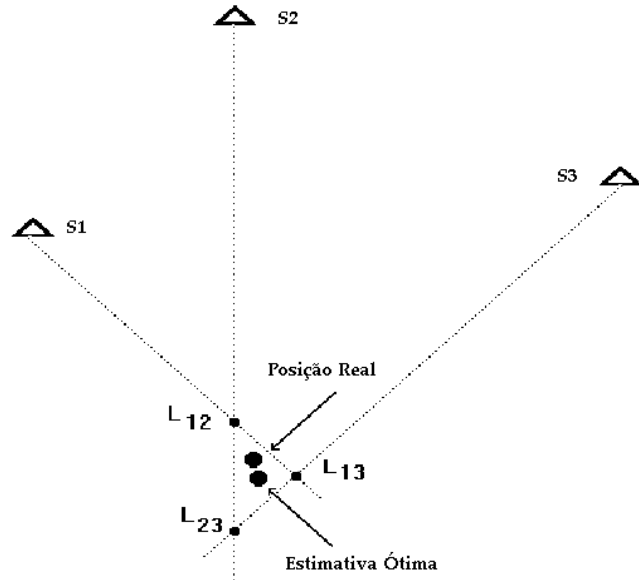


FIGURA 2.8 – Ilustração do método MDF. S_n representa o sensor n e L_{ij} a intersecção das retas geradas pelos azimutes.

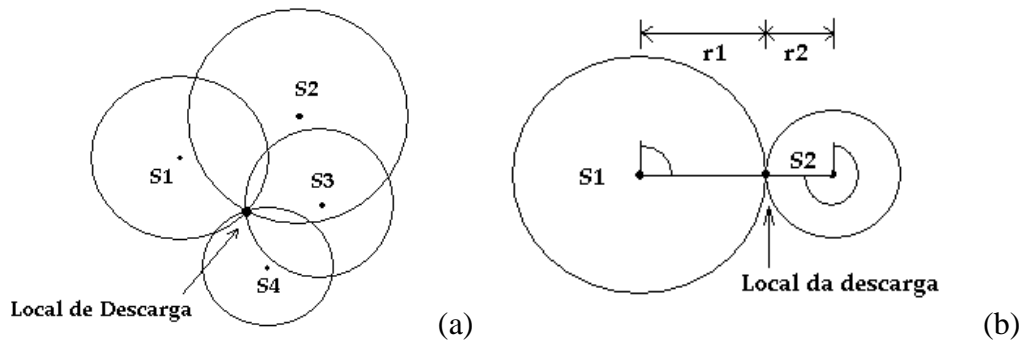


FIGURA 2.9 – S_n representa os sensores. Ilustrações dos métodos (a) TOA e (b) IMPACT.

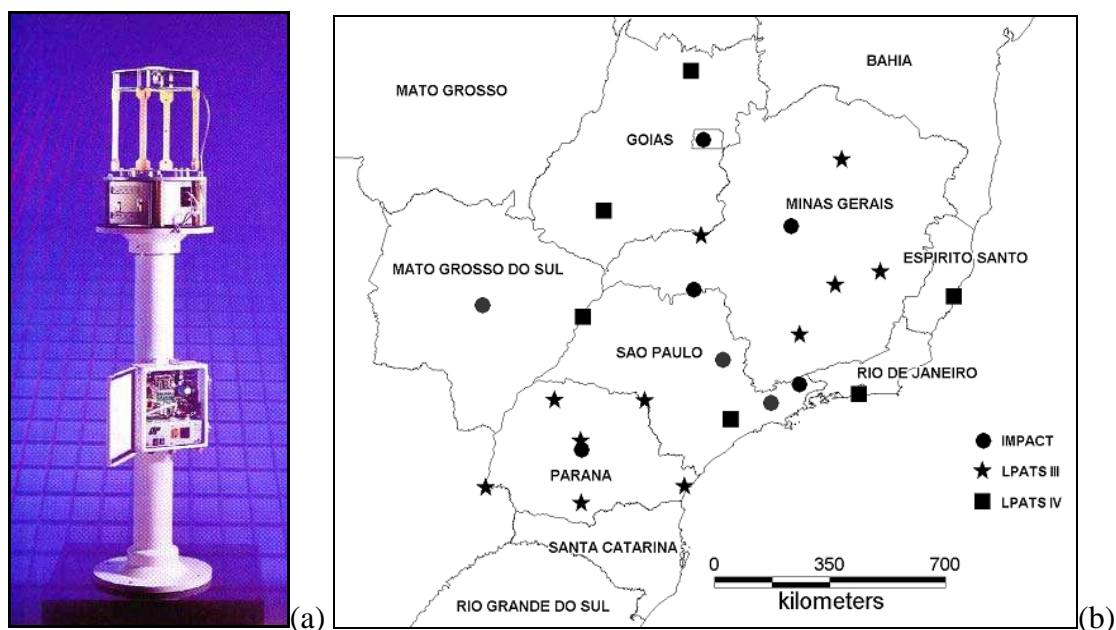


FIGURA 2.10 – (a) Fotografia de um sensor IMPACT. (b) Distribuição dos Sensores constituintes da RINDAT. LPATS (III e IV) são sensores que utilizam a técnica TOA.

A Central de Processamento, que recolhe, processa e armazena todas as informações oriundas dos sensores, apresenta os dados de saída em dois modos (GAI, 1999):

- Tempo Real: as soluções são computadas à medida que os dados dos sensores são recebidos. Há uma limitação aqui: dados dos sensores que sofram atraso de comunicação maior que o limite de espera do sistema, não entram no cálculo das soluções – conseqüentemente, algumas descargas podem não ser registradas.
- Reprocessamento: as soluções são computadas com base nas informações dos sensores gravadas em disco e ordenadas cronologicamente. Neste modo, elimina-se o problema da perda de informações por atraso de comunicação (haja vista que todos os dados informados pelos sensores estão gravados nos arquivos em disco e serão reprocessados, aumentando o desempenho do sistema).

Um exemplo de dados em Tempo Real é mostrado na Tabela 2.1. Aqui estão selecionados aqueles referentes a um raio. Cada linha se refere a uma descarga.

TABELA 2.1 – Exemplo de dados, em Tempo Real, referentes a um raio. O sistema acusou três descargas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
03/29/04	17:12:43.123100343	-23.2690	-45.7552	-12.5	-67.3	8.2	18.0	-0.0	0	0.4	0.2	2.0	127	AxT	8	6	G	0.7
03/29/04	17:12:43.195145300	-23.2873	-45.7270	-15.9	-85.8	7.9	25.4	-2.6	0	1.1	0.2	5.5	157	xxT	5	2	G	1.9
03/29/04	17:12:43.195151100	-23.3136	-45.6224	-11.1	-60.0	11.4	20.2	-0.0	0	8.3	1.8	4.6	42	AxT	3	1	G	0.8
																		Valor de qui-quadrado
																		G (<i>ground</i>) ou C (<i>cloud</i>)
																		Número de graus de liberdade
																		Número de sensores participantes
																		Tipo de informação usada no cálculo
																		Ângulo da elipse de erro
																		Excentricidade da elipse de erro
																		Comprimento do menor semi-eixo
																		Comprimento do maior semi-eixo
																		Multiplicidade
																		Máxima taxa de subida da corrente (kA/μs)
																		Largura de pulso (μs)
																		Tempo de subida do sinal (μs)
																		Intensidade do sinal EM
																		Pico de corrente (kA) com polaridade
																		Longitude no solo
																		Latitude no solo
																		Horário (com precisão de ns)

Esta coleção de dados significa, da esquerda para a direita, os seguintes valores da descarga de retorno (os quatros primeiros são os mais importantes para o presente estudo):

- 1) Data (mês/dia/ano).
- 2) Horário com precisão de unidades de ns.
- 3) Latitude e Longitude no solo.
- 4) Pico de corrente (kA) com polaridade.
- 5) Intensidade do sinal EM normalizado pela distância.
- 6) Tempo de subida do sinal (μ s).
- 7) Largura de pulso (μ s).
- 8) Máxima taxa de subida da corrente (kA/ μ s).
- 9) Multiplicidade (zero se o arquivo de dados é de descargas como o apresentado aqui).
- 10) Comprimento do maior semi-eixo da Elipse de erro (km).
- 11) Comprimento do menor semi-eixo da Elipse de erro (km).
- 12) Excentricidade da Elipse de erro. É a razão entre semi-eixo maior e o menor.
- 13) Ângulo de orientação da elipse de erro (graus).
- 14) Tipo de informação usada no cálculo de localização da descarga. Pode ser uma combinação ângulo (A), sinal (S) ou tempo (T).
- 15) Número de sensores participantes.
- 16) 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.

- 17) “C” para relâmpagos na nuvem (*cloud*) e “G” para aqueles que envolvem o solo (*ground*).
- 18) Valor qui-quadrado referente à precisão na otimização da solução de localização da descarga.

Os dados da RINDAT foram usados como informações complementares aos dos vídeos rápidos, muitas vezes confirmando o que a imagem revela. O segundo propósito da utilização destes dados é o de avaliar o desempenho da RINDAT, que, por sua vez, se dará principalmente através da análise de dois parâmetros: (1) Precisão de Localização das Descargas e (2) Eficiência de Detecção da Rede.

A Precisão de Localização de uma descarga individual é afetada basicamente por três fatores (Schulz, 1997):

- Desvios padrão das medidas angulares e temporais (que, para um sensor adequadamente instalado, possui valores típicos respectivamente da ordem de 1 grau e unidades de μs).
- Número de sensores participantes.
- Localização do sensor em relação à localização da descarga.

A maneira mais adequada de se representar a precisão da localização de um evento é definir uma região (denominada de região de segurança) que detenha uma probabilidade específica (chamada nível de segurança) de conter todas as possíveis soluções em seu interior (GAI, 1999). A Figura 2.11 ilustra uma distribuição gaussiana de erros de localização a partir da qual a região de segurança é determinada. A localização ótima da descarga está no ponto de menor probabilidade de erro, que corresponde ao pico da distribuição de erros, onde a elipse tem sua área mínima.

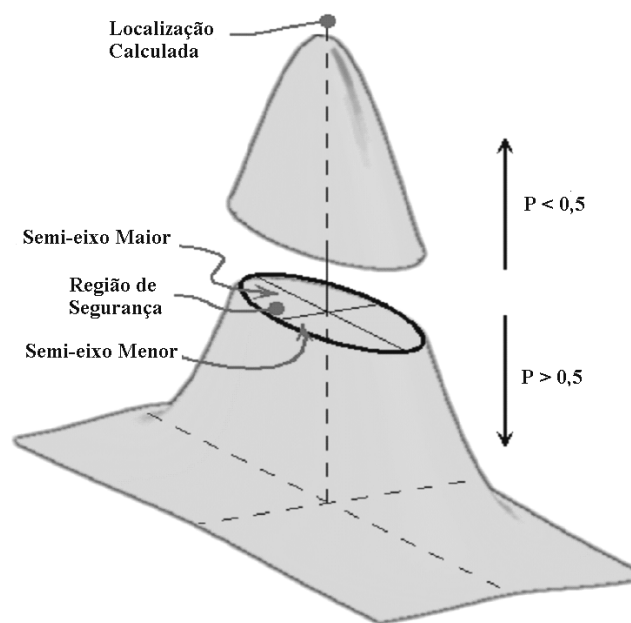


FIGURA 2.11 – Distribuição Gaussiana 2D dos Erros de Localização mostrando a localização estimada do evento no ponto de menor probabilidade (pico). O plano XY é o plano geográfico e o eixo Z a probabilidade/erro.

A Eficiência de Detecção é definida como a habilidade de um sistema de localização em detectar as descargas NS, expressa como uma fração percentual entre o número de detectadas e o número real de ocorridas. Os principais fatores que afetam este parâmetro são:

- Eficiência de detecção individual de cada sensor da rede.
- Número médio de sensores participantes nas soluções.
- Linhas de base da rede (não deve ser maior que o alcance nominal de cada sensor).
- Distribuição dos picos de correntes.

Mesmo quando a RINDAT não consegue encontrar uma solução de um raio – e, conseqüentemente, a sua localização –, é possível obter a sua polaridade, se ao menos uma antena registrou seu sinal de campo elétrico.

2.2 Coleta e Redução dos Dados

Durante a observação das tempestades entre janeiro/2003 e abril/2004, um total de 314 eventos foi registrado, incluindo relâmpagos NS, SN, IN e nuvem-ar. O presente estudo se dedicou a um subgrupo de 264 eventos, que puderam ser identificados como NS. Sobre este conjunto de 264 eventos, puderam-se separar 233 raios negativos, 11 raios positivos e 20 raios sem polaridade definida; tal separação foi realizada pela RINDAT, que infere a polaridade para todas as descargas que são detectadas.

A partir dos dois instrumentos, foram identificados os nuvem-solo durante a redução dos dados com o auxílio da planilha que se encontra no APÊNDICE A. O procedimento utilizado na redução dos dados foi o seguinte: identificar primeiramente cada descarga de retorno (DR), de tal forma que cada uma delas ocupasse uma linha da planilha; as medições posteriores (duração total, duração da corrente contínua, intervalo entre DRs, etc.) foram feitas baseadas nas linhas das DRs.

A Figura 2.12 mostra a distribuição de todas as DRs detectadas pela RINDAT (que fornece a localização) e igualmente observadas pela Câmera Rápida. Para a maior parte dos raios, a distância de observação variou entre 10 e 40 km, sendo observados também raios a uma distância de até 80 km (observação noturna).

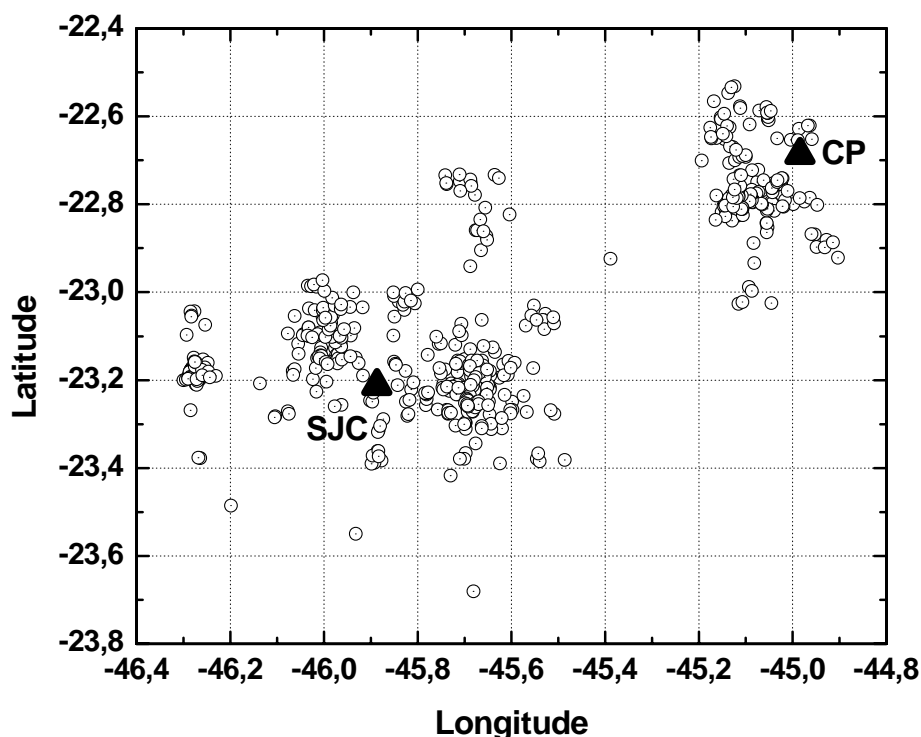


FIGURA 2.12 – Distribuição de todas as DRs detectadas pela RINDAT e registradas pela Câmera Rápida durante as campanhas de 2003 e 2004. Os dois locais de observação estão indicados no mapa por triângulos: São José dos Campos (SJC) e Cachoeira Paulista (CP). A distância entre os dois locais de observação é de 116 km.

Os relâmpagos, depois de registrados pela câmera rápida, foram correlacionados, através do tempo e da posição geográfica, com descargas detectadas pela RINDAT, auxiliando a observação principalmente na determinação do instante em que as descargas de retorno ocorreram; isto aumentou a qualidade dos resultados estatísticos apresentados nas seções 3.1.2 e 3.1.3, que versam sobre a multiplicidade das descargas e o intervalo entre estas, respectivamente. A duração do raio e da corrente contínua e o intervalo entre descargas subsequentes foram medidos pela câmera rápida com precisão de 1,0 ms.

Outro importante auxílio da RINDAT se deu nas situações em que o canal da descarga não estava bem definido na imagem, mas somente um “clarão” foi registrado. Sem o auxílio da RINDAT, tais descargas poderiam ser confundidas com relâmpagos IN, que

geram luminosidade de maneira similar. A eventual dificuldade em visualizar o canal da descarga se deve a dois principais motivos: a grande distância de observação e – este parece ser o mais importante – a opacidade elevada do meio (quantidade integrada de água entre o evento e a câmera).

CAPÍTULO 3

ANÁLISE E DISCUSSÃO

3.1 Relâmpagos Nuvem-Solo Observados no Vale do Paraíba

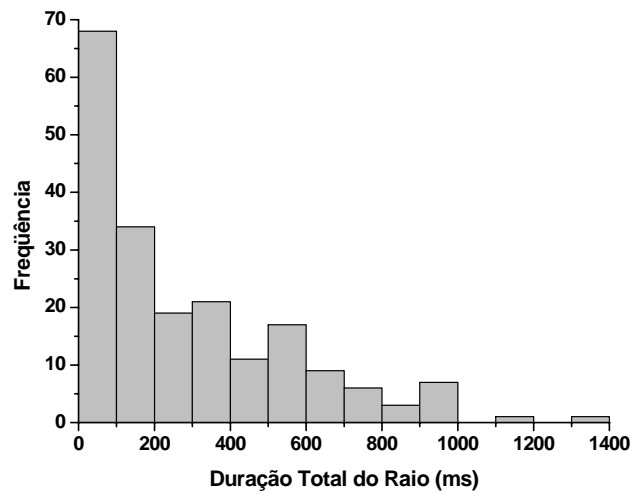
A quase totalidade desta Seção foi dedicada aos 233 raios negativos. Quanto ao pequeno grupo de raios positivos observados pela câmera rápida (11 eventos, grupo muito menor comparado ao dos 233 negativos), somente foi analisada sua multiplicidade de DRs, apresentada no início da Seção 3.1.2.

3.1.1 Duração Total

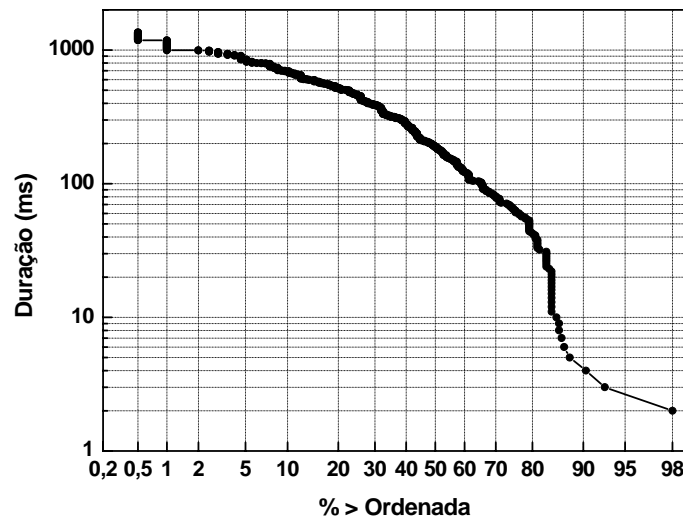
Para os **negativos**, um conjunto de **197 eventos** foi selecionado para a análise da duração total do relâmpago, onde foi possível medir o instante da ocorrência da última DR. Foi medido o tempo entre a primeira descarga de retorno e o término da eventual CC da última descarga subsequente. A Figura 3.1a mostra o histograma deste conjunto. A média aritmética da duração foi de **282 ms** e a mediana foi de **188 ms**.

Uman (1987, p. 341) comentando resultados de Cianos e Pierce (1972) (APÊNDICE B) mostrou um valor para a mediana da duração do raio de 180 ms, valor este muito próximo do encontrado neste trabalho (~ 4% de diferença relativa). A proximidade de ambos resultados torna-se interessante principalmente por três motivos: (a) foram usadas técnicas observacionais distintas, (b) em localidades situadas em diferentes hemisférios e (c) em períodos com mais de 30 anos de diferença. Isso revela, dentre a grande variabilidade dos parâmetros do relâmpago nuvem-solo, um padrão geral de comportamento para sua duração.

A **máxima** duração observada foi de 1,356 s, sendo relacionada com um raio de multiplicidade 16, contendo corrente contínua de 23 ms em sua última descarga. Brantley et al. (1975), analisando 205 raios observados em dois locais diferentes através de filmagem VHS, encontrou durações máximas de 1,1 s (raios com 12 descargas) e de 1,0 s (7 descargas), respectivamente para cada um dos locais.



(a)



(b)

FIGURA 3.1 – (a) Histograma e (b) distribuição de probabilidade de todas as durações medidas.

Podemos notar que a distribuição de probabilidades da Figura 3.1 não segue uma lognormal (tal distribuição seria uma reta neste tipo de gráfico), conforme foi apresentado por Cianos e Pierce (1972) em Uman (1987, p.341). Na verdade, ele apresentou os resultados para a faixa de ~ 40 ms até 900 ms como sendo uma reta, o que não difere muito do nosso resultado para a mesma faixa de valores. No entanto, para a faixa entre 2 e 40 ms, que nosso trabalho complementou, percebemos uma variação

abrupta entre os 80% e 84%. Esta característica será discutida na Seção 3.1.5 – “Corrente Contínua”.

3.1.2 Multiplicidade de Descargas de Retorno

Quanto aos relâmpagos NS positivos, foram observadas 18 DRs referentes a 11 eventos. A multiplicidade média foi, portanto, de **1,6**. Este tipo de raio tem, usualmente, um número menor de DRs por evento em comparação com o NS negativo. Cinco eventos com uma única DR foram registrados, representando **45%** do total. A multiplicidade máxima registrada foi 3. Já, a percentagem de positivos em relação ao total de eventos foi de **4,7% (95,3% de negativos)**. Sabe-se que esta proporção, segundo Uman (1987, p.188) e Pinto e Pinto (2000, p.78), podem variar consideravelmente de acordo com condições meteorológicas, geográficas, topográficas, dentre outras, mas que, “em média, eles [os negativos] representam aproximadamente 90% do total de relâmpagos nuvem-solo” (Pinto e Pinto (2000, p.78).

Estudos anteriores sobre a multiplicidade de raios NS negativos no Vale do Paraíba foram realizados por Miranda et al. (2003) e Miranda (2004), ambos utilizando registros de campo elétrico. Miranda et al. (2003) analisando 26 raios do verão 1998-1999, identificou 131 DRs, resultando numa multiplicidade média igual a 5 (descargas por raio). Este elevado valor se deve, principalmente, ao fato de que a análise baseada unicamente em registros de campo elétrico tende a confundir como DR as descargas que ocorrem usualmente entre as DRs (chamadas de “descargas K”, possuem assinatura no campo elétrico semelhante à da DR, mas com amplitudes ~ 10 vezes menor). Miranda (2004) apresentou resultados referentes a 40 raios ocorridos no período fevereiro a março de 2003 (o presente trabalho engloba este período), onde a multiplicidade média encontrada foi de 3,68. Tal diferença observada entre estes dois resultados se deve, principalmente, a um melhoramento nos critérios de classificação das DRs dos raios NS negativos (baseado na análise comparativa entre registros de campo elétrico e câmera rápida).

Para a multiplicidade dos raios NS negativos em nosso trabalho, um conjunto de 233 raios (890 descargas de retorno) foi utilizado. A multiplicidade média foi, portanto, de

3,8, valor similar a 3,68 encontrado por Miranda (2004). Apesar de nosso espaço amostral ser muito maior, nota-se que as diferentes técnicas observacionais (câmera rápida e campo elétrico) geraram resultados coerentes entre si (lembrando que se referem à mesma localidade).

Também comparamos a multiplicidade e o número de raios simples (aqueles contendo apenas uma descarga de retorno) com resultados de alguns trabalhos (apenas 4) que, segundo Rakov e Huffines (2003), estão baseados numa “contagem acurada” das descargas (tal contagem utiliza geralmente duas técnicas conjugadas: medição do campo elétrico irradiado e vídeo VHS). A Tabela 3.1 exhibe um sumário dos resultados de tais trabalhos. Observações baseadas somente na técnica de vídeo VHS (30 ou 60 quadros por segundo) como, por exemplo, Brantley et al. (1975), não são adequados para a contagem precisa das descargas, pois perdem aquelas separadas por pequenos intervalos de tempo.

TABELA 3.1 – Número de descargas por raio negativo e percentual de raios simples obtidos por estudos de contagem acurada de descargas.

Referência	Localização Geográfica	Número Total de Raios	Número de Tempestades Observadas	Multiplicidade Média	Multiplicidade Máxima	Percentual de Raios Simples
Rakov et Uman (1990), Rakov et al. (1994)	Tampa, FL (EUA)	76	3	4,6	18	17
Kitagawa et al. (1962)	Socorro, NM (EUA)	193	3	6,4	26	14
Cooray e Perez (1994)	Uppsala (Suécia)	137	2	3,4	10	18
Cooray e Jayaratne (1994)	Colombo (Sri Lanka)	81	2	4,5	12	21
Este trabalho	Vale do Paraíba	233	27	3,8	16	20

FONTE: Adaptada de Rakov et Huffines (2003).

Na Tabela 3.1 pode-se observar que, independentemente da localidade geográfica, a grande maioria dos raios negativos (80% ou mais) contém mais de uma descarga; nosso resultado (20%) está também de acordo com esta conclusão.

O número médio de descargas por raio no Novo México - publicado em Kitagawa et al. (1962) - é o maior encontrado na literatura. É possível que os raios NS do Novo México analisados pelo autor tenha sido observados a partir de várias células de tempestades (unidades básicas da tempestade), localizadas lado-a-lado e que estavam ativas

eletricamente ao mesmo tempo (Rakov et Huffines, 2003). São necessárias mais observações de tempestades nestas condições para que se possa avançar nesta discussão.

A Figura 3.2 mostra um histograma do número de descargas por raio encontrado. Um resultado importante e significativo que se pode extrair deste histograma é sobre a moda da multiplicidade que é **2** (10 a mais que os simples e 13 a mais que a multiplicidade 3). Rakov et Huffines (2003) analisando um histograma elaborado a partir dos resultados de Kitagawa et al. (1962), para um subconjunto de 83 raios, encontrou também a moda em 2; ao analisar, entretanto, um histograma proveniente de Rakov et Uman (1990), obteve-se a moda em 4.

Um sistema de detecção, como, por exemplo, a RINDAT (este tópico será melhor analisado na Seção 3.2.1), costumam apresentar a moda da multiplicidade em 1, pois para muitos dos raios de duas descargas, nem sempre ambas são detectadas, resultando, assim, em uma maior quantidade de relâmpagos simples [esta consideração é também a razão mais provável de ocorrência apresentada por Rakov et Huffines (2003)]. A moda diferente de 1 é um indicativo de que a técnica observacional é capaz de uma boa identificação das DRs.

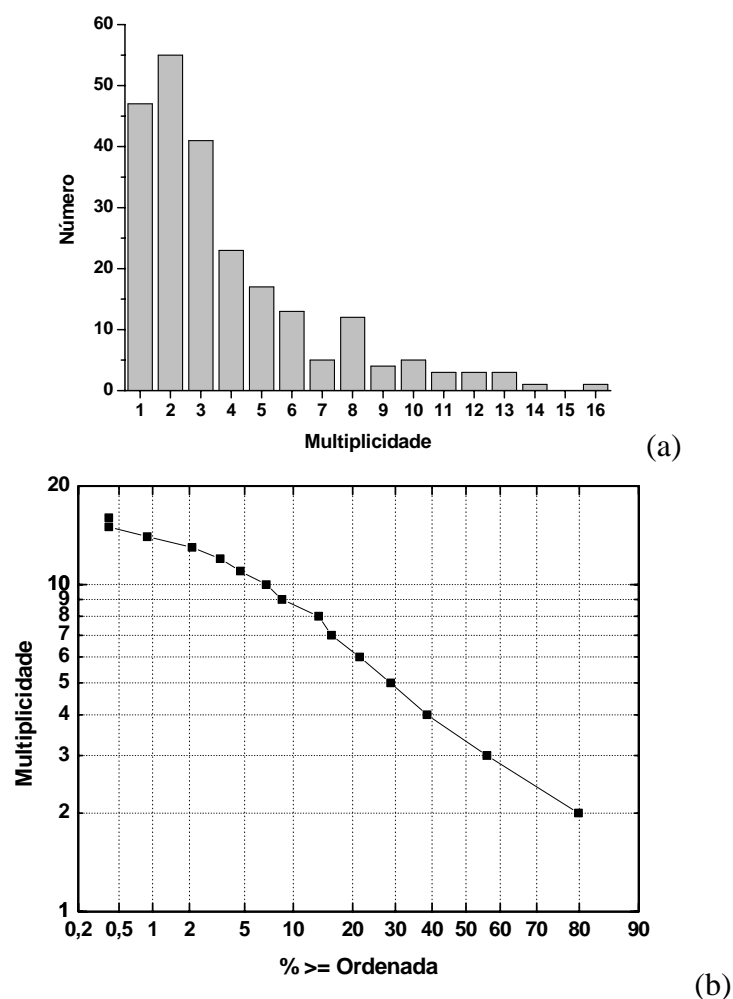
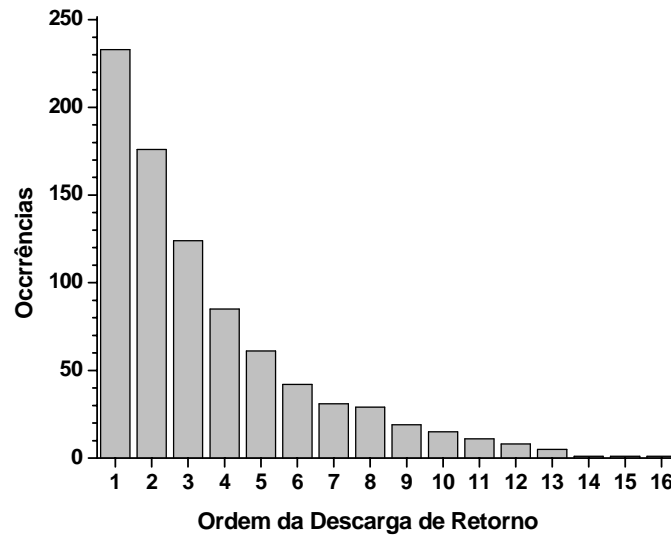
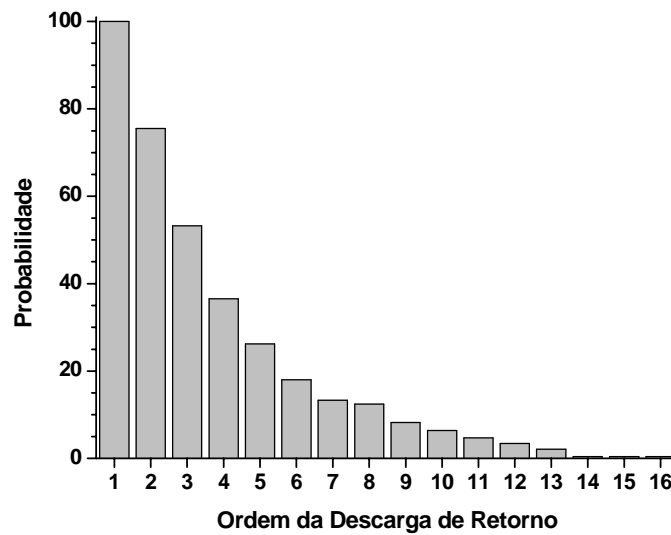


FIGURA 3.2 – (a) Histograma e (b) distribuição de probabilidades do número de descargas por raio. A multiplicidade máxima observada foi 16, em somente uma ocorrência, (relacionada com a máxima duração registrada e apresentada na Seção 3.1.1).

Foi realizada também a classificação da assim chamada “ordem da descarga de retorno”, que consiste em atribuir a cada descarga sua ordem de ocorrência – no nosso caso, de “primeira” a “décima sexta”, ou $N=1...16$. A Figura 3.3 exibe dois gráficos baseados em 842 descargas de retorno: (a) um histograma e (b) a probabilidade calculada a partir das ocorrências.



(a)



(b)

FIGURA 3.3 – (a) Histograma da ocorrência de DR de ordem N e (b) probabilidade de ocorrência da DR de ordem N.

3.1.3 Pontos de Contato no Solo

Nesta Seção serão apresentados resultados estatísticos e algumas especulações acerca da assim chamada bifurcação do raio. Uma abordagem simples com o intuito de explicar a formação de uma nova terminação após a 1ª DR de um raio pode ser feita utilizando-se da lei de Ohm generalizada ($\vec{J} = \vec{\sigma} \bullet \vec{E}$). O vento intenso próximo às nuvens de

tempestades e o rearranjo de cargas dentro da própria nuvem e também no solo, considerando-se um intervalo de tempo de dezenas de milissegundos (por exemplo, 60 ms, o intervalo típico entre DRs), são capazes de mudar os tensores (e grandezas) $\vec{\sigma}$ e \vec{E} num dado ponto ao longo do canal, favorecendo o surgimento de uma nova ramificação (onde a propagação das cargas é de alguma forma mais favorável) e, conseqüentemente, a formação de uma nova terminação para o solo.

Para a análise geral dos pontos de contato no solo (também chamada de bifurcação ou multiplicidade de canal), foi selecionado um conjunto de 161 raios negativos. Este parâmetro do relâmpago nuvem-solo, caracterizado para o Brasil pela primeira vez, é de fundamental importância para a área de Proteção contra Descargas. A Figura 3.4 mostra quadros da filmagem rápida que registraram a bifurcação de um raio.

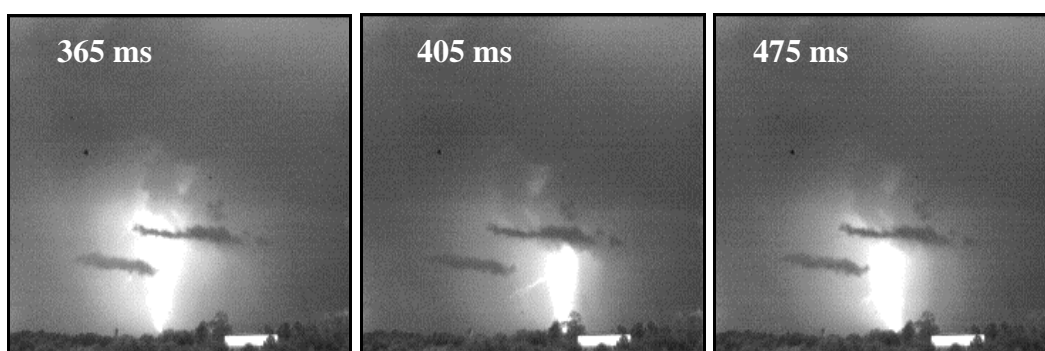


FIGURA 3.4 – Quadros não-seqüenciais ilustrando um raio 236 com 3 diferentes pontos de contato no solo. Evento ocorrido em 29/mar/2004, às 17h10min42s (UT).

Dentre estes, 90 raios (**56%**) apresentaram bifurcação, ou seja, multiplicidade de canal maior que um ou mais de um ponto de contato no solo. Rakov et al. (1994), analisando 76 raios negativos através de técnica observacional conjugada (VHS e campo elétrico), encontrou 50% de raios bifurcados; comentou, inclusive, em seu trabalho que este resultado está provavelmente subestimado, devido a limitações de visualização dos canais. Se considerarmos, somente raios múltiplos (127 raios), 71% apresentam bifurcação. É grande, portanto, a probabilidade de bifurcação para raios com mais de uma DR.

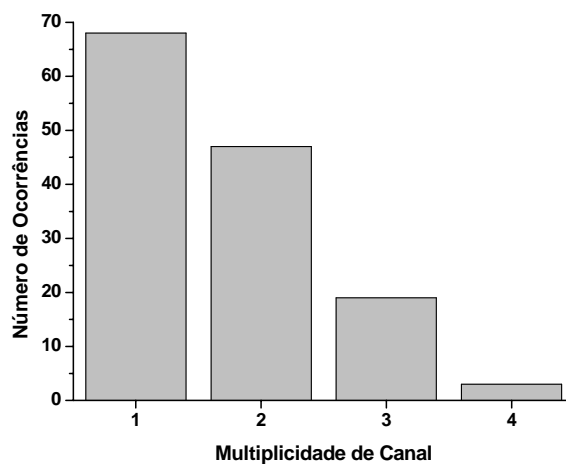
Número Médio dos Pontos de Contato

Para esta análise foi selecionado um conjunto de 137 eventos (onde foi possível, além de classificar como bifurcado ou não, contar com precisão o número de contatos com o solo: esta é a razão da diminuição do espaço amostral). O número médio de pontos de contato no solo por relâmpago é de **1,69**, muito próximo ao valor de 1,67 encontrado por Rakov et al. (1994). Isto significa que, em média, 100 raios atingem 169 locais diferentes no solo. Outro resultado interessante que relaciona multiplicidade média de DRs e o número médio de pontos de contato no solo é o número médio de DRs por ponto de contato; ou seja, quando ocorre um raio NS, 2,3 DRs atingirão, em média, um mesmo ponto de contato no solo. Este é um dado fundamental na concepção de tecnologias de proteção contra raios, que até então não era conhecida para nenhuma região brasileira.

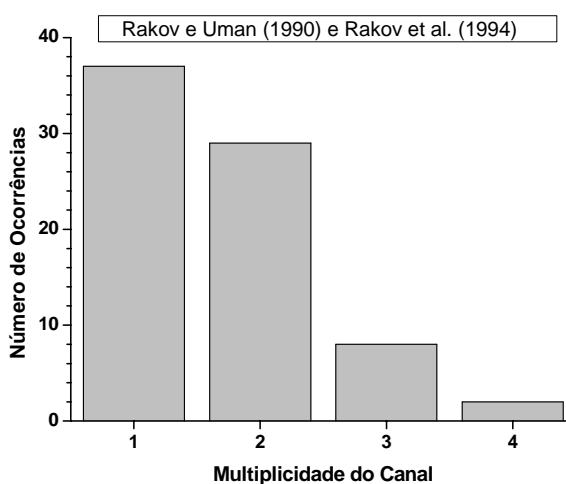
A Figura 3.5 mostra histogramas da multiplicidade de canal observada no Vale do Paraíba, comparando-os com a observação no estado da Flórida, EUA [de acordo com Rakov e Uman (1990) e Rakov et al. (1994), comentados em Rakov e Huffines (2003)]. A Tabela 3.2 mostra os mesmos resultados comparados em termos de percentagem, verificando-se uma grande semelhança. Um aspecto importante é que o espaço amostral deste trabalho é praticamente o dobro daquele utilizado na Flórida, 76 eventos. Ambos os estudos utilizaram-se de técnicas acuradas e quantidades significativas de dados e, portanto, mostram que provavelmente não há variação geográfica deste parâmetro.

TABELA 3.2 – Porcentagem das diferentes multiplicidades de canal encontradas no Vale do Paraíba e no estado americano da Flórida.

Número de Pontos de Contato no Solo	% no Vale do Paraíba	% na Flórida
1	50,4	48,7
2	33,6	38,2
3	13,9	10,5
4	2,2	2,6



(a)



(b)

FIGURA 3.5 – Histogramas da multiplicidade do canal observadas (a) no Vale do Paraíba e (b) no estado da Flórida (EUA).

Bifurcação *versus* Ordem da Descarga de Retorno

Pudemos observar também que, conforme aumenta a ordem da DR, mais improvável é que ocorra bifurcação. A Tabela 3.3 mostra tais resultados, comparando-os com os de Rakov et al. (1994). Constatei que a ordem da DR onde a formação de um novo canal é mais freqüente é a segunda. Para as ordens 2 e 3, nota-se grande semelhança entre os resultados. Já, para 4 e 5, nota-se diferenças mais significativas. Explica-se, em parte, a diferença para as ordens 4 e 5, lembrando-se do menor espaço amostral utilizado por Rakov et al. (1994) - 76 raios em oposição aos 137 utilizados neste trabalho. É

interessante analisar os três casos observados para a ocorrência de bifurcação em DR de ordem 5 (nenhuma bifurcação nesta ordem foi observada em outros trabalhos, caracterizando um caso anômalo). No caso do raio 257, as duas primeiras DRs usaram o mesmo canal, houve bifurcação na 3ª DR, a 4ª DR voltou ao primeiro canal e a 5ª DR formou um novo canal, diferentes dos anteriores. Já nos caso do raio 295, as 5 DRs utilizaram ao menos 4 diferentes pontos de contato no solo. O raio 123, por sua vez, teve sua 5ª DR bifurcada após 4 DRs num mesmo ponto de contato. Estes três casos não apresentaram nenhum comportamento similar de bifurcação.

TABELA 3.3 – Ocorrência de bifurcação em relação à ordem da descarga de retorno.

Ordem da DR	Número de Bifurcações Registradas neste Trabalho	% de Ocorrência	
		Este Trabalho	Rakov et al. (1994)
2	72	40	37
3	34	27	27
4	9	11	2
5	3	5	0
6	0	0	0

Consolidação do Canal

Vários autores já observaram [Kitagawa et al. (1962); Rakov et al. (1994); Valine e Krider (2002); dentre outros] uma espécie de “memória do canal”. Em tal memorização, uma corrente contínua anterior ou, principalmente, o número de DRs ocorridas num mesmo canal, reforçaria de alguma maneira sua condutividade, consolidando-o e diminuindo, assim, a probabilidade da formação de um novo. Para estudar tal consolidação do canal, analisamos quantas bifurcações se deram após n DRs ocorridas num mesmo canal (Tabela 3.4). Nesta análise foram selecionados 117 raios NS negativos. Percebemos que, para a grande maioria dos casos (90,6%), a bifurcação ocorre quando houve apenas uma descarga anterior. Este resultado está fortemente de

acordo com a idéia da consolidação do canal dependente do número de DRs num mesmo canal.

Rakov et al. (1994) conclui que “um caminho inalterável para o solo, em um dado raio, se estabeleceria após, ao menos, 4 DRs consecutivas participando no condicionamento do canal”. O raio 123, cuja bifurcação se dá após 4 DRs no mesmo canal, corrigiria tal afirmação: ao menos 5 DRs seriam necessárias para consolidar o canal.

TABELA 3.4 – Probabilidade de bifurcação após n DRs ocorridas num mesmo canal.

Número de DRs num Mesmo Canal Antes da Bifurcação	Número de Bifurcações	% de Ocorrências (Probabilidade)
1	106	90,6
2	8	6,8
3	2	1,7
4	1	0,9
5	0	0

Duas singularidades do raio 123 podem ajudar a explicar porque a 5^a DR foi capaz de bifurcar mesmo após 4DRs terem utilizado o mesmo canal:

- 1) o raio 123 teve sua 1^a DR bifurcada, tocando o solo em dois pontos distintos quase-simultaneamente, conforme mostrado na Figura 3.6. Como uma descarga de retorno bifurcada divide, de maneira geral, sua corrente em dois diferentes canais (tanto o valor de pico quanto a carga total envolvida), estes ficam consolidados menos intensamente;
- 2) o longo intervalo de tempo (251 ms; 4 vezes o valor típico, como será visto na Seção 3.1.4) anterior à 5^a DR, pode ter sido responsável pelo decaimento da temperatura do canal e, assim, explicar o surgimento de um novo canal.

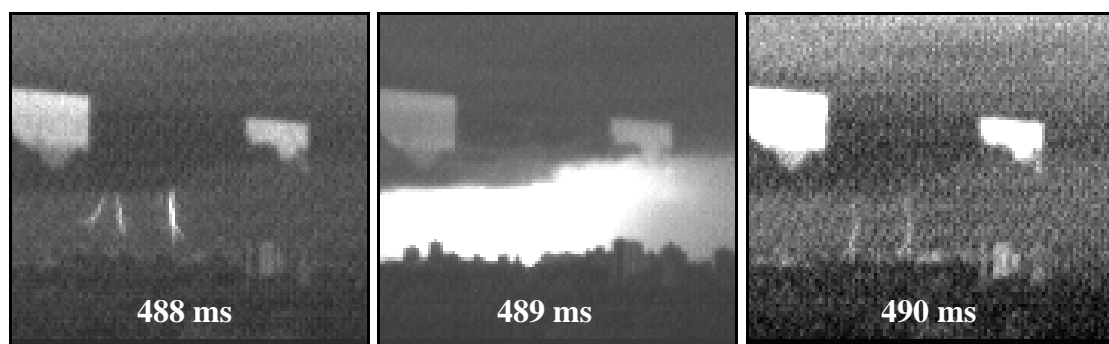


FIGURA 3.6 – Três quadros seqüenciais da 1ª DR do raio 123, ocorrido em 15/jan/2004 às 19h10min26s (UT). Da esquerda para a direita: três ramos principais do líder escalonado aproximando-se da conexão com o solo; clarão devido à descarga de retorno; e os dois ramos da DR bifurcada pouco iluminadas devido ao decaimento da corrente.

O raio 123 foi atípico em outros aspectos também: multiplicidade igual à 12 e duração total de 992 ms. Apresentou também corrente contínua em duas DRs, 10ª e 11ª, com durações, respectivamente, de 22 e 26 ms. A carga envolvida neste raio foi, certamente, superior ao valor típico, podendo esta maior disponibilidade de carga na nuvem ser também uma das razões de tal singularidade.

Retorno ao Canal Anterior Após Bifurcação

Conforme foi descrito no caso do raio 257, outros 5 raios tiveram suas DRs retornando para um canal anterior após a formação de um novo canal. Em dois raios isto aconteceu duas vezes. Por que o relâmpago formaria outro canal para depois utilizar um previamente elaborado? A resposta não foi ainda encontrada. Este problema está certamente relacionado de alguma maneira com a memória do canal. O intervalo de tempo característico deste conjunto de 7 retornos de canal será analisado na Seção 3.1.4.

Descarga de Retorno Bifurcada

Dois canais observados em mesmo quadro (janela de 1 ms) da filmagem rápida, como aquele da Figura 3.6, podem ser classificados de duas maneiras: (1) duas DRs independentes com intervalo de tempo entre si menor que 1 ms; ou (2) uma DR

bifurcada, onde o intervalo de tempo entre as duas conexões com o solo é suficientemente pequeno de tal forma que a conexão do primeiro ramo conectado não é capaz de inibir a conexão do segundo ramo (normalmente, os ramos não-conectados do líder escalonado têm suas cargas drenadas pelo ramo principal, que foi conectado). A ocorrência de bifurcação na DR mostrou-se pouco freqüente nos registros da câmera rápida – lembrando que a resolução utilizada (1ms) não é apropriada para tal identificação. Pouco se sabe sobre este fenômeno. Talvez o trabalho mais importante publicado neste tópico foi o de Rakov e Uman (1994), baseado em registros de câmera VHS e campo elétrico, onde se associou a ocorrência de tal fenômeno em 9 raios dentre os 76 analisados (aproximadamente 10%).

Pude observar a bifurcação da DR em, pelo menos, dois casos: (1) no raio 123 (Figura 3.6), onde os dois ramos permanecem conectados após o momento da DR; (2) no raio 237 (Figura 3.7), pois além do quadro da filmagem apresentar dois ramos acesos diferentemente do caso 123, foi possível obter a diferença de tempo em que os dois ramos tocaram o solo através dos dados da RINDAT.



FIGURA 3.7 – Quadros consecutivos envolvendo a DR bifurcada do raio 237, ocorrido em 29/mar/2004, às 17h12min43s (UT). Os dados temporais indicados são provenientes do GPS da camera rápida. Da esquerda para a direita: líder escalonado com os dois ramos principais prestes a conectar o solo; conexão da DR; CC no ramo esquerdo – o ramo direito ou se extinguiu ou possui baixos níveis de luminosidade.

Os instantes em que a RINDAT detectou as descargas estão mostradas na Tabela 3.5. Nota-se a diferença de 4,5 μ s entre as duas. As antenas que compõem a Rede não são

capazes de responder em tão curto espaço de tempo, pois necessitam, em média, de algumas centenas de μs para processamento e transmissão dos dados para a central. O que permitiu, então, tal situação foi a “distribuição” da detecção em diferentes antenas: no caso, um grupo de 3 antenas mediram a radiação da 1ª descarga e um outro grupo de 4 antenas, a radiação da 2ª. De todos os 10 casos onde foi possível observar 2 ramos num mesmo quadro, somente este obteve 2 soluções da RINDAT.

Uma simples estimativa pode confirmar a existência da bifurcação de uma DR. Sabemos que, para inibir a propagação do ramo direito, a frente de onda do ramo esquerdo deve encontrar-se com a extremidade mais próxima do solo do ramo direito do líder, de forma a drenar as cargas lá existentes antes que o mesmo conecte ao solo (considerarei somente 2 ramos para simplificar, mas na realidade o ramo mais próximo ao solo tende a drenar as cargas de todos os outros ramos do líder escalonado). Sabe-se, também, que a velocidade de propagação da frente de onda da corrente ao longo do canal durante a DR vale algo entre $c/2$ e $c/3$. Com o intuito de encontrar o tempo máximo necessário para que ocorra a bifurcação da DR, tomaremos a velocidade valendo $c/2$. A Figura 3.8 ilustra tal situação. A expressão fica sendo então: $\Delta t_{\text{max}} = (d_1 + d_2)/(c/2)$.

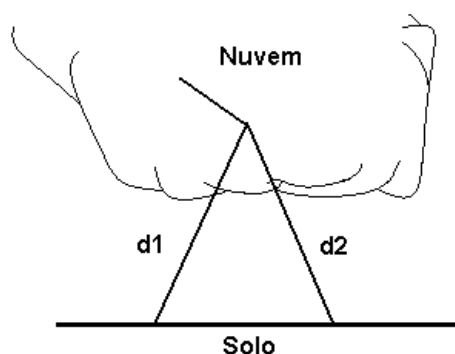


FIGURA 3.8 – Ilustração de um raio bifurcado, indicando os comprimentos dos dois ramos, entre o nó e o ponto de contato no solo.

De acordo com os resultados encontrados por Thottappillil et al. (1992) sobre a separação espacial entre os pontos de contato, e considerando uma altura máxima para o nó da bifurcação como sendo 5 km, usaremos, como sendo uma mínima estimativa, (d_1

+ d_2) = 12 km . Encontramos, assim, que o intervalo de tempo máximo (Δt_{\max}) necessário vale $\sim 80 \mu\text{s}$. Vemos, portanto, que $4,5 \mu\text{s}$ não são suficientes para que ocorra a inibição.

TABELA 3.5 – Dados da RINDAT para a DR do raio 237 em questão. As informações temporais da ordem de μs estão em negrito.

Data	Tempo (hora:min:seg.ms. μs .ns)	Latitude	Longitude	Pico de Corrente (kA)
29/03/2004	17:12:43.195. 149 .500	-23,3033	-45,7189	-12,2
29/03/2004	17:12:43.195. 154 .035	-23,3097	-45,6201	-16,8

É a primeira vez que se tem uma comprovação observacional deste fenômeno com observações dos picos de correntes. Até então existiam várias evidências baseadas em registros de *streak-camera* [Schonland et al. (1935)], de campo elétrico associado com luminosidade [Guo e Krider (1982)] e de campo elétrico associado com TV [Rakov e Uman (1994)].

A Figura 3.9 mostra o caso do raio 221, onde pode ter havido bifurcação da DR. A observação foi muito próxima, sendo possível também identificar vários ramos acesos do líder escalonado por onde a frente de onda da DR passou; isso acontece em parte do ramo esquerdo, dando a entender também que o CCD interrompeu o registro da descarga neste ramo ao finalizar sua exposição.

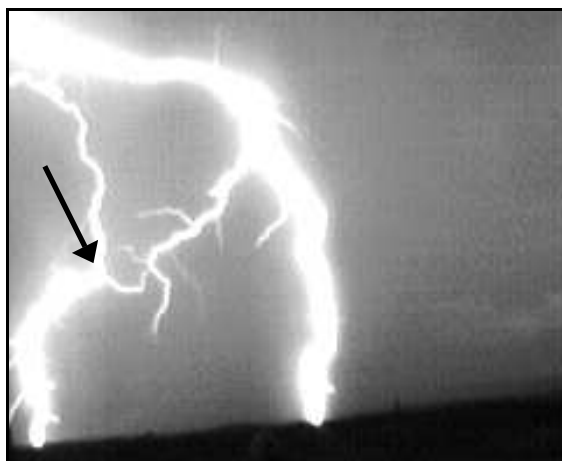


FIGURA 3.9 – Quadro da DR do raio 221, onde não é possível classificar entre DR bifurcada ou duas DR distintas separadas por centenas de μ s. O CCD finalizava a exposição do frame quando a frente de onda do lado esquerdo ainda subia pelo canal (seta). Evento ocorrido em 01/mar/2004, às 20h17min15s423ms (UT).

3.1.4 Intervalo entre Descargas de Retorno

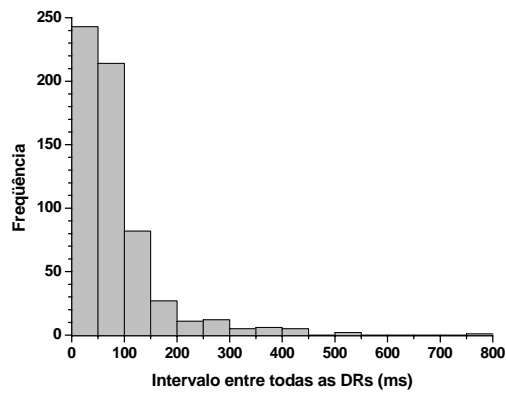
Para este parâmetro, foi utilizado um conjunto de 608 intervalos entre descargas de retorno, referentes a 178 relâmpagos NS negativos. A Figura 3.10 mostra histogramas em diferentes escalas e a distribuição de probabilidades para este conjunto de dados. É possível observar a distribuição lognormal. A média geométrica de todos os intervalos considerados foi de **60,9 ms**, valor muito similar ao encontrado por Rakov et al. (1994), 60 ms, para a região do estado norte-americano da Flórida e baseado na observação com técnicas conjugadas (VHS e campo elétrico).

O máximo intervalo registrado no Vale do Paraíba foi de **782 ms**, entre a 2^a e a 3^a DR de um raio de 4 DRs e de canal simples. Pode-se concluir que tão grande tempo se deu, principalmente, porque a 2^a DR conteve uma corrente contínua muito longa (a mais longa registrada), 541 ms. Quanto ao mínimo valor medido, pudemos afirmar que foi de **2 ms**, muito embora em casos como o raio 221 (Figura 3.9), bem como em casos de clarões em dois quadros sucessivos da filmagem rápida, evidenciam a ocorrência de

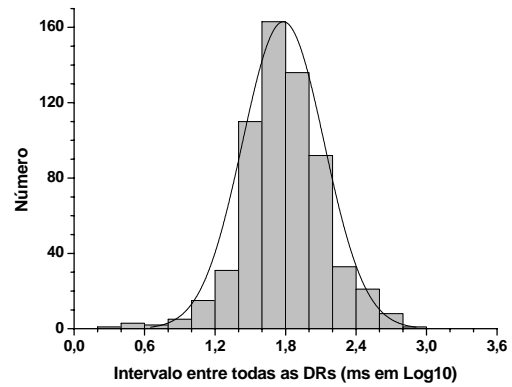
intervalos menores do que 2 ms e até de DRs bifurcadas. Trata-se, portanto, da limitação da técnica utilizada de câmera rápida em termos de resolução temporal (1 ms).

O menor intervalo registrado que certamente envolveu diferentes canais seu deu no raio 229. A Figura 3.11 apresenta a seqüência de quadros referente a este intervalo. Concluimos que não é possível ser um caso de DR bifurcada, pois o tempo entre as duas (> 1 ms) excede em aproximadamente 10 vezes o mínimo calculado na Seção 3.1.3 (80 μ s). Trata-se de um caso interessante, inclusive, pela ocorrência da bifurcação em tão curto intervalo de tempo. Aqui, certamente, não foi a memória do canal exclusivamente que propiciou a mudança do ponto de contato com o solo, mas talvez algum processo referente ao desenvolvimento do canal dentro da nuvem.

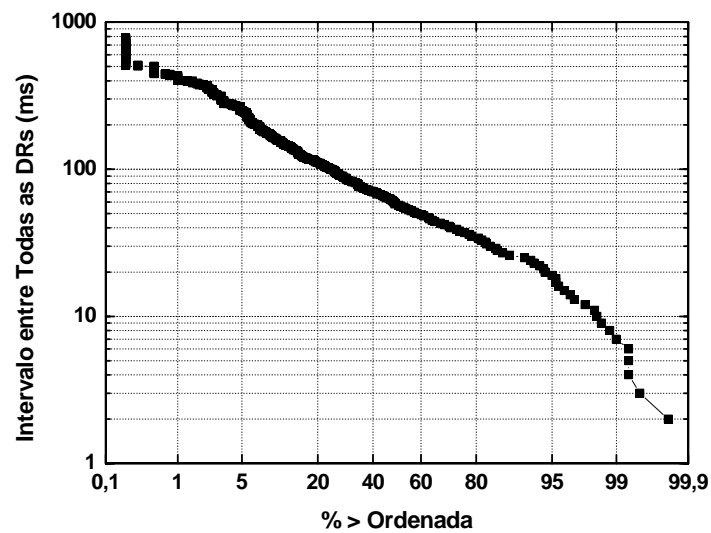
E, em termos gerais, comparando nossa distribuição de probabilidades (Figura 3.10c) com a de Cianos e Pierce (1972) em Uman (1987, p. 341), notamos, para a faixa de intervalos entre 10 e 350 ms, grande concordância. Nossos resultados expandiram esta faixa de valores nas extremidades: de 400 até 782 ms e de 2 até 10 ms. As descontinuidades encontradas entre 500 e 800 ms e entre 2 e 6 ms se devem, principalmente, ao pequeno número de amostras obtido.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3.10 – (a) e (b) Histogramas e (c) distribuição de probabilidades de todos os 608 intervalos entre DRs referentes aos 178 raios, medidos entre 2 e 782 ms.

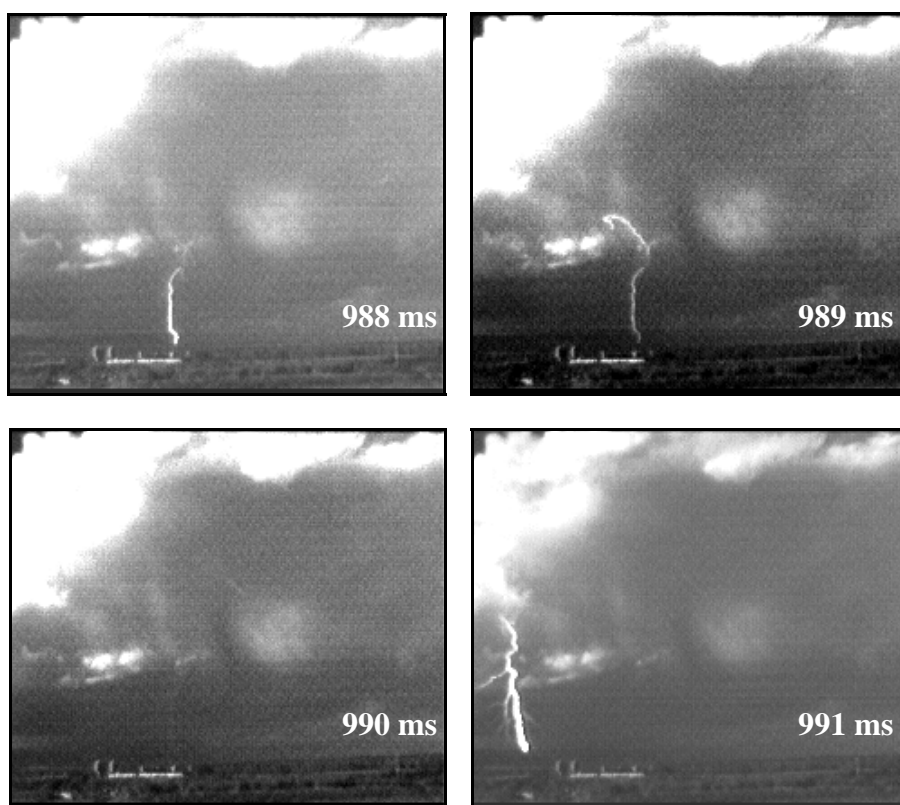


FIGURA 3.11 – Seqüência de quadros consecutivos referentes às 2 primeiras DRs do raio 229, ocorrido em 27/mar/2004, às 19h40min02s (UT). Informações temporais do GPS/câmera estão estampadas em cada quadro. Os instantes 988 ms, que registra a iluminação da base do canal, e 989 ms, do restante do canal visível, envolvem a primeira DR. O instante 990 ms não possui DR, mas, em 991 ms, o raio se bifurca, originando a 2ª DR em um outro ponto de contato.

Segue uma análise comparativa de dois subconjuntos de dados: **(1)** referente aos intervalos entre DRs que seguiram o **mesmo canal**, e **(2)** referente aos intervalos entre DRs precedendo a ocorrência de um **novo canal**.

A Figura 3.12 mostra 2 histogramas, em diferentes escalas, do subconjunto **(1)**, que contem 253 intervalos. Aqui, a média geométrica foi de **59,9 ms**, muito próxima a do conjunto geral de todos os intervalos. Thomson et al. (1984) encontrou, para este caso, 67 ms em 245 intervalos. Pode se tratar de uma diferença real, pois além dos dois trabalhos possuírem um espaço amostral suficientemente grande, o desvio padrão do

logaritmo (base 10) deste trabalho foi de **0,27** (equivalente a 53,8 ms), ligeiramente menor do que o encontrado por Thomson et al. (1984), 0,32. Os histogramas da Figura 3.12 mostram a distribuição lognormal do conjunto (1), que teve sua normalidade confirmada através do método Shapiro-Wilks (*software* STATISTICA).

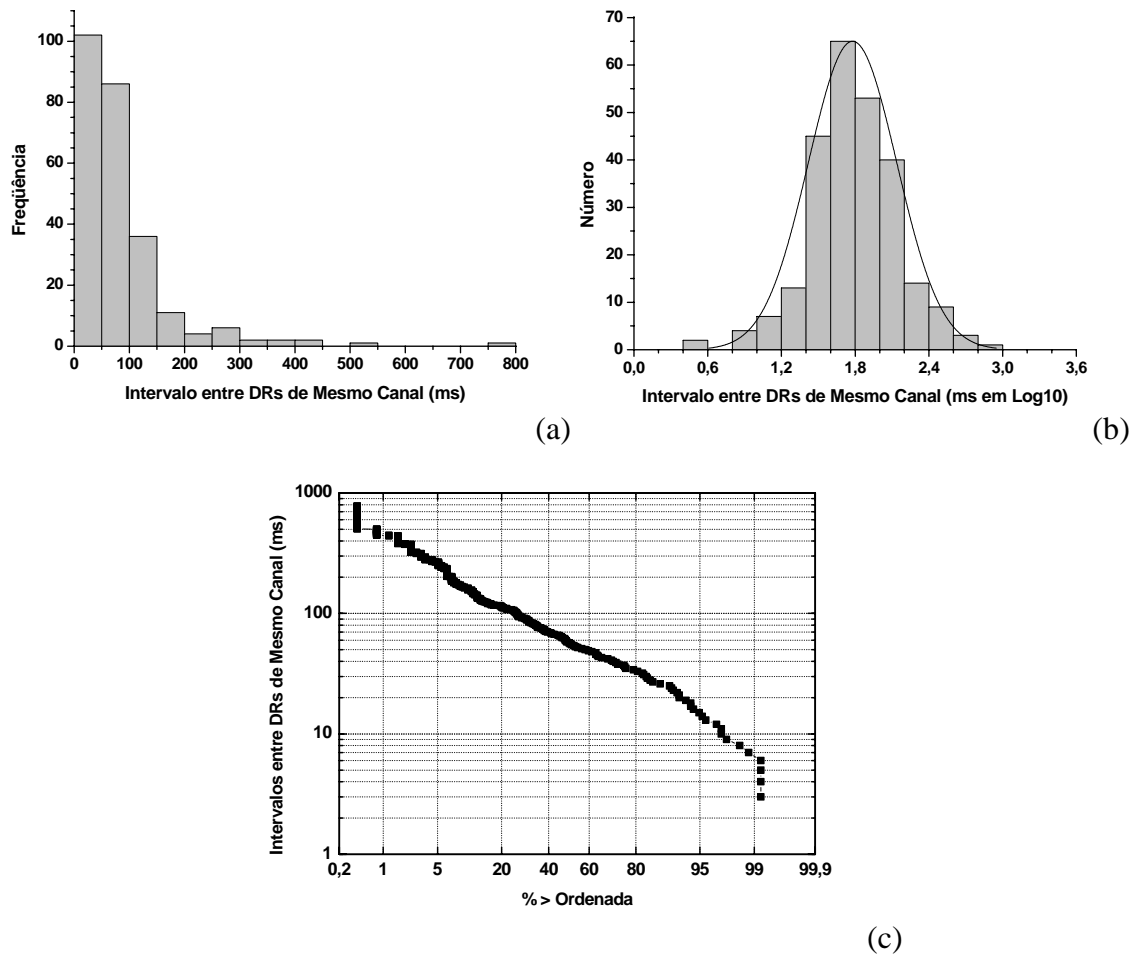


FIGURA 3.12 – (a) e (b) Histogramas em diferentes escalas e (c) distribuição de probabilidades dos intervalos entre DRs que seguiram o mesmo canal da anterior.

Intervalos de Tempo entre DRs que Precedem Bifurcações

Analisando agora o subconjunto (2), referentes aos intervalos que precedem a ocorrência de um novo canal, foram gerados os histogramas apresentados na Figura 3.13. Sua normalidade também foi confirmada pelo método Shapiro-Wilks (através do

software STATISTICA). Os resultados desta análise estão mostrados na Tabela 3.6, onde comparamos com os de Thomson et al. (1984). Vale lembrar que, para este subconjunto e com o propósito de aumentar a fidelidade dos dados, foram utilizados somente os intervalos que envolviam DRs de canais visíveis (não-difusos pela chuva, por exemplo) ou que foram detectadas pela RINDAT no reprocessamento (cenário E).

TABELA 3.6 – Resultados estatísticos dos intervalos que precedem a ocorrência de um novo canal.

Referência	Número de Amostras	Média Geométrica dos Intervalos Precedendo a Bifurcação (ms)	σ_{\log}	Técnica Observacional
Este Trabalho	101	68,1	0,22	Câmera Rápida e RINDAT
Thomson et al. (1984)	28	83	0,33	Campo Elétrico e VHS

O σ_{\log} de 0,22 que encontrei equivale a 46,1 ms. Em termos estatísticos, a análise da média geométrica não é suficiente, muitas vezes, para descrever um conjunto de dados. Com o intuito de verificar mais detalhadamente as diferenças entre os intervalos envolvendo ou não a bifurcação, comparamos nossos subconjuntos (1) e (2) entre si em termos de média, através do teste t-Student (independente) e do teste ANOVA (níveis de confiança igual a 0,05). Para ambos os testes, os dois subconjuntos não são significativamente diferentes. Thomson et al. (1984) também realizou o teste t-Student (nível de confiança de 0,05) entre seus dois conjuntos de intervalos – que utilizaram mesmo canal e que envolvia bifurcação – e encontrou o mesmo resultado: a diferença não é significativa. Concluimos, então, que o intervalo de tempo precedente à bifurcação não difere em termos gerais do intervalo envolvendo somente um canal.

Lembrando do resultado discutido na Seção 3.1.3 - “Consolidação do Canal”, de que a bifurcação ocorre 90% das vezes após uma única utilização do canal, concluimos que a bifurcação não está relacionada de maneira significativa com um intervalo de tempo maior, mas principalmente com o número de “utilizações” do canal.

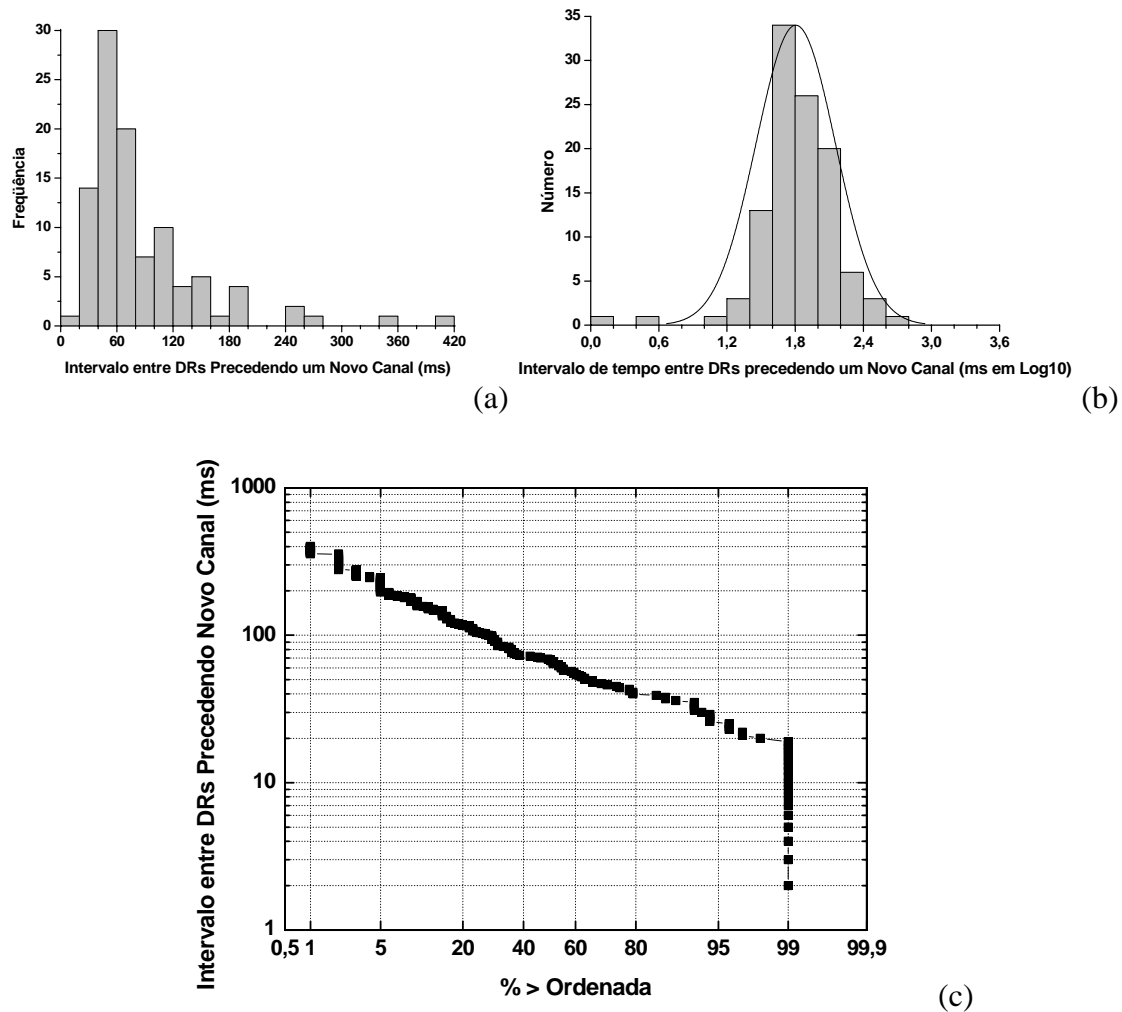


FIGURA 3.13 – (a) e (b) Histogramas em diferentes escalas e (c) distribuição de probabilidades dos intervalos entre DRs que precederam um novo canal.

Intervalos de Tempo entre DRs que Precedem o Retorno a um Canal Preexistente

Outro resultado importante, apesar do pequeno número de amostras envolvido - apenas 7 intervalos - foi quanto ao intervalo de tempo entre duas DRs de diferentes canais, sendo que a segunda utilizou um canal previamente elaborado. A média geométrica foi muito inferior à do conjunto geral de intervalos, **25,8 ms**, com $\sigma_{\log} = 0,22$ (equivalente a 13,6 ms). É de se esperar que seja inferior, pois os canais utilizados assim por uma segunda vez são mais “antigos”, estando menos consolidados. Ou seja, este resultado

corroborar com o pressuposto de que: a volta a um canal previamente elaborado se dê num tempo menor do que o típico (60 ms), pois caso contrário o canal não apresentará condições suficientes de condutividade.

Intervalo Médio entre DRs para Raios com Diferentes Multiplicidades

A Figura 3.14a mostra um gráfico que relaciona o subconjunto de 561 intervalos entre DRs (onde foi possível determinar a multiplicidade do raio envolvido) com a multiplicidade. Comparamos com os resultados obtidos por W. Schulz (comunicação privada), baseados em centenas de milhares de DRs detectadas pela rede austríaca ALDIS (*Austrian Lightning Detection Information System*) e mostrados na Figura 3.14b. Ambos os gráficos contêm somente intervalos de até 500 ms. A tendência observada nos dados da ALDIS – de que o intervalo médio entre DRs é inversamente proporcional à número de DRs – torna-se bastante evidente. Observamos a mesma tendência em nossos dados, mas de modo menos evidente, devido principalmente ao menor número de intervalos amostrados por valor de multiplicidade.

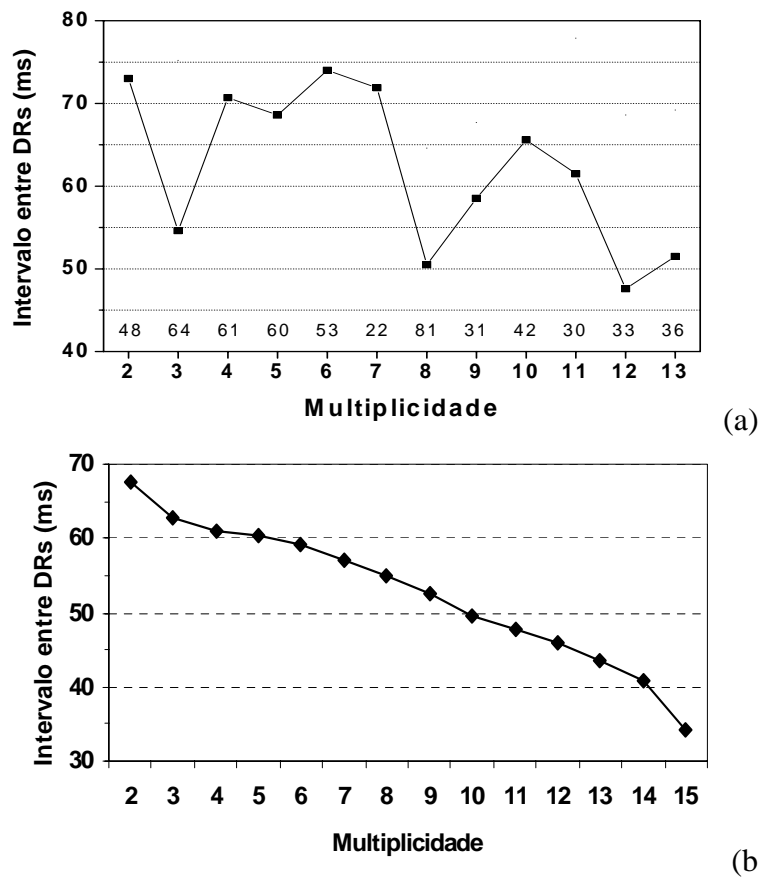


Figura 3.14 – Média Geométrica dos intervalos entre DRs em relação à multiplicidade encontrados (a) em nosso trabalho e (b) pela ALDIS. O número de intervalos utilizado em nosso trabalho, para cada valor de multiplicidade, está indicado no interior do gráfico.

3.1.5 Corrente Contínua

Ainda não estão estabelecidos completamente os fundamentos físicos que explicam a ocorrência da corrente contínua após uma descarga de retorno. No entanto, a teoria mais fundamentada e apoiada por alguns registros observacionais é a do Líder Bidirecional de Carga Líquida Nula, apresentada mais recentemente por Mazur et al. (1995) e Mazur (2002). Tal teoria apresenta a idéia de que enquanto o líder escalonado se propaga em direção ao solo, um outro líder de carga oposta se propaga na direção contrária (dentro da nuvem). Assim, imediatamente após a ocorrência da DR, “a corrente contínua seria

uma manifestação e uma parte do processo deste líder no interior da nuvem” (Mazur, V., comunicação privada, 2004).

Nesta Seção serão utilizadas as duas denominações usuais para a duração da corrente contínua (CC): **longa**, para durações maiores que 40 ms, e **curta**, para durações entre 10 e 40 ms. Será definida como **mini** aquelas CC com durações menores do que 10 ms: já que foram abundantemente observadas neste trabalho e são inexistentes na literatura consultada. Em termos práticos, foi identificado o quadro da DR, descontado o seguinte, referente à eventual corrente intermediária, para, assim, iniciar com certeza a medição da duração da CC. Portanto, medimos a duração entre 2 e 10 ms para as CC mini. A Figura 3.15 ilustra este procedimento sobre um registro da câmera rápida. Outro aspecto referente à medição é que independentemente da técnica utilizada (VHS, campo elétrico ou câmera rápida), a duração da CC é sempre subestimada. As medidas de duração da CC baseadas na câmera rápida foram especialmente subestimadas quando, entre o canal e o instrumento, havia grande quantidade de chuva integrada ou muita luminosidade difusa no ambiente.

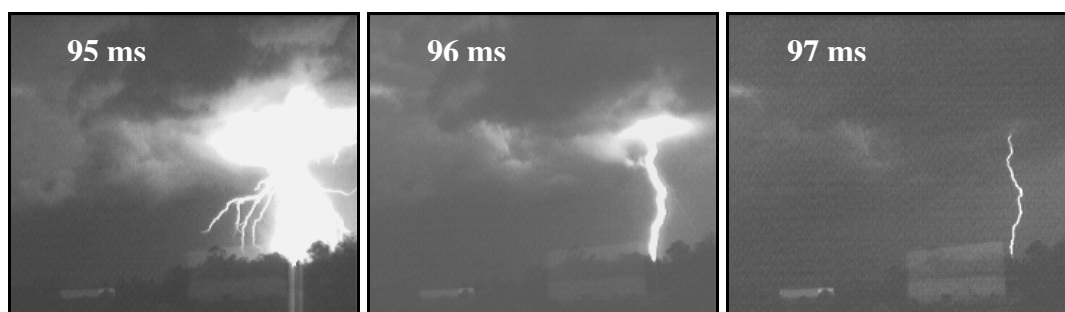
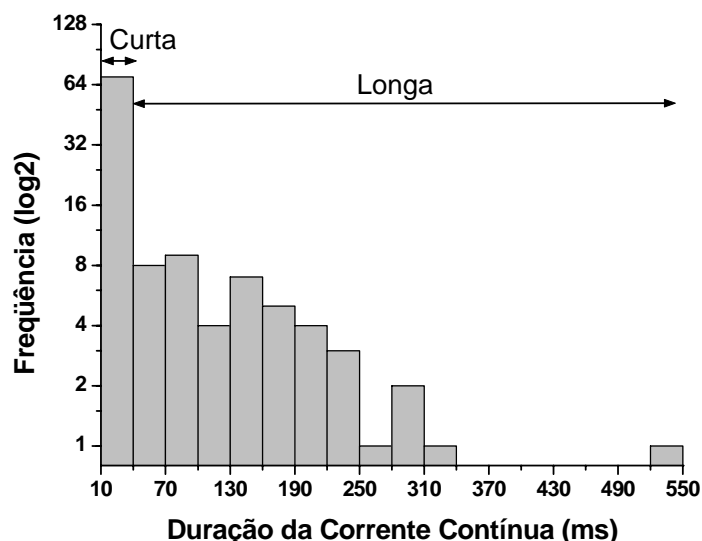


FIGURA 3.15 – Sequência de quadros consecutivos retratando o início de uma mini CC de 6 ms. Da esquerda para a direita: DR, corrente intermediária, e início da CC. Ocorrido em 07/nov/2003, 18h26min49s UT e observado na Torre de SJC.

Para este parâmetro, foi selecionado todo o conjunto de 233 raios negativos, envolvendo 892 DRs. O número de DRs sem nenhum tipo de CC foi de 465, **49,7%** do total; **50,3%** contiveram algum tipo de CC. A Figura 3.16 mostra um histograma das ocorrências do

tipo curta e longa. A máxima duração observada foi de **541 ms**, que precedeu ao maior intervalo entre DRs registrado neste trabalho (782 ms).



A média geométrica da duração da longa foi de **124 ms**, superior aos 115 ms encontrados por Shindo e Uman (1989). Isso pode ser explicado pelo fato de que, apesar de termos encontrados proporcionalmente um menor número de casos, medimos 5 durações na faixa de 250 até 550 ms, enquanto Shindo e Uman (1989) encontraram durações de no máximo ~ 250 ms. A Figura 3.17 exhibe um histograma das ocorrências de CC longa observadas no Vale do Paraíba.

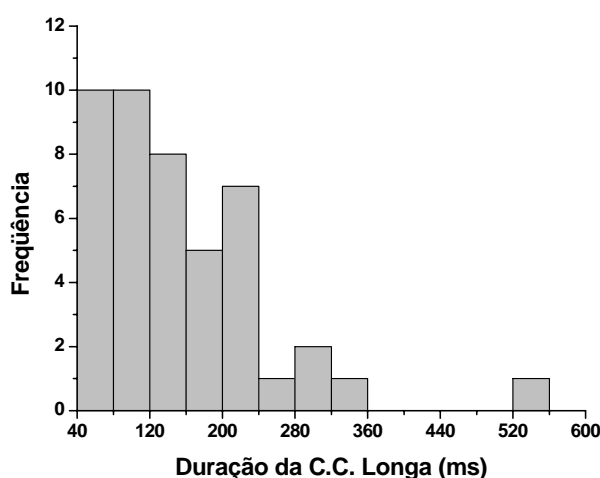


FIGURA 3.17 – Histograma das ocorrências de CC longa no Vale do Paraíba. São mostradas aqui 45 ocorrências, já que alguns raios contiveram mais de uma CC longa.

Um número maior de casos (46) foi observado na faixa de CC **curta**. O histograma da Figura 3.18 mostra este conjunto de dados. A porcentagem de raios contendo CC curta foi de **19,7%**, superior aos 12,2% encontrados por Shindo e Uman (1989). Somando as porcentagens de longa e curta para ambos os estudos, encontramos: **35,6%** para este estudo e 36,6% para o estudo de Shindo e Uman (1989). Notamos grande similaridade entre as porcentagens de ocorrência de raios com C.C. longa e curta. Lembrando da especial subestimação da câmera rápida em condições de baixa visibilidade, muito provavelmente medimos casos de C.C. longas como sendo curtas, classificando-as erroneamente. A média geométrica, porém, foi de **17 ms**, enquanto que na Flórida foi de 23 ms. Vale lembrar também que nossas observações foram feitas sobre 27 dias de

tempestades ao longo de 2 anos, o que resultaria em algo mais geral, enquanto que Shindo e Uman (1989) observaram 3 dias de tempestades de um único mês.

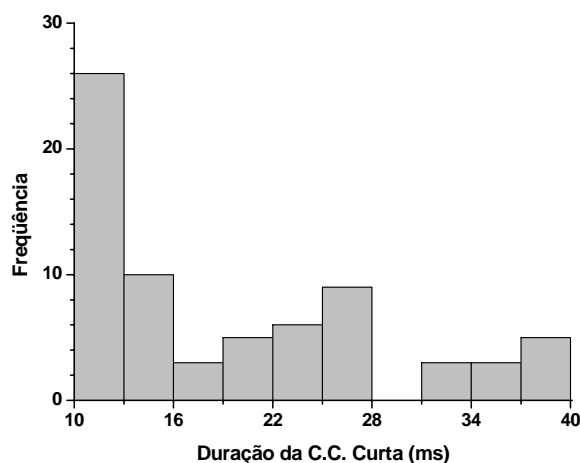


FIGURA 3.18 – Histograma das ocorrências de CC curta. São mostradas aqui 70 ocorrências, já que alguns raios contiveram mais de uma CC curta.

Tanto Shindo e Uman (1989) quanto Kitagawa et al. (1962) observaram que raios simples e primeiras DRs de raios múltiplos pouco freqüentemente apresentam CC. Shindo e Uman (1989) observaram um único raio com CC, dentre 19 simples (5,3%). Pudemos observar 8 (4 longas e 4 curtas) dentre 47 raios simples (17,0%), um acréscimo substancial, que se deve, em parte, ao maior número de amostras. O resultado mais significativo, entretanto, se encontra na ocorrência de CC nas primeiras DRs de raios múltiplos. Shindo e Uman (1989) não observaram nenhuma, enquanto que registramos 8 casos de curta e 1 de longa. A probabilidade de tal ocorrência é baixa de qualquer forma, perfazendo 3,9% para os dois tipos. Visto a baixíssima ocorrência de CC nas primeiras DRs de raios múltiplos, compreendemos melhor a variação abrupta na distribuição de probabilidades das durações medidas, entre 80 e 83% (Figura 3.1b). Ou seja, como ~ 20% dos raios são simples e, em 96,1% das vezes, não ocorre CC maiores ou iguais a 10ms, a duração experimenta um “salto” em ~ 80% de sua distribuição, valor que corresponde a ~ 40 ms, tempo este que permite muitos casos de DRs de ordem 2.

Outro resultado importante, e onde a câmera rápida pareceu ser muito eficiente, foi a medição da CC **mini**. Lembrando a subestimação de valores, certamente CC curtas foram medidas como mini, entretanto o número de casos para esta análise é muito grande, **352** eventos. A Figura 3.19 mostra um histograma deste conjunto de dados. A percentagem de ocorrência entre todas as DRs foi de **39,6%**. A média geométrica foi de **3,1 ms**. Outra informação importante é que **50,3%** de todas as DRs apresentaram CC de algum dos três tipos.

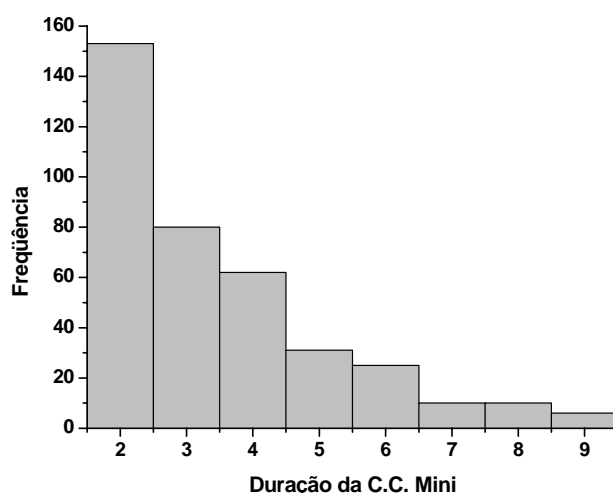


FIGURA 3.19 – Histograma das ocorrências de CC mini.

A partir dos valores do histograma da Figura 3.19, foi feito um ajuste exponencial, mostrado na Figura 3.20. Pode-se notar um elevado nível de correlação ($R^2 = 0,99$) para um ajuste exponencial. Este resultado indica, de alguma maneira, o decaimento de corrente no canal e reforça uma conclusão de Mazur et al. (1995) de que: “observações de vídeo e campo elétrico indicam que todas as DRs possuem, ao menos, uma pequena corrente contínua, da ordem de um ou poucos ms”.

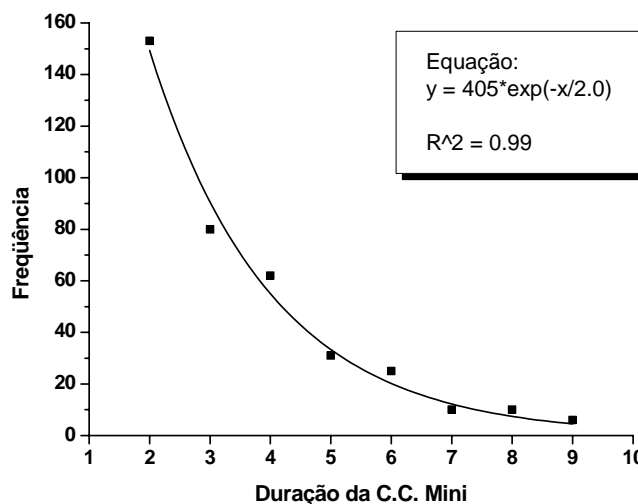


FIGURA 3.20 – Ajuste exponencial dos valores encontrados no histograma da Figura 3.19.

3.2 Breve Avaliação de Desempenho da RINDAT para o Vale do Paraíba

Como já foi mencionado, além de ser um instrumento auxiliar, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas foi também objeto de avaliação de seu próprio desempenho na região do Vale do Paraíba (SP). Para tal, foi selecionado um conjunto de dados referentes aos raios NS negativos que ocorreram entre os dias 7 de novembro de 2003 (quando a antena de Pirassununga já se encontrava em operação) e 16 de abril de 2004, perfazendo um total de 18 diferentes tempestades. Os dados da RINDAT analisados foram os reprocessados, tanto para o estudo da eficiência de detecção (ED) quanto para a precisão de localização (PL). O critério adotado no reprocessamento exigiu pelo menos 4 medidas de tempo de chegada, ou seja, não exigiu necessariamente a participação de uma antena IMPACT na solução. Foram considerados como importantes na geração de soluções para o Vale do Paraíba os sensores das seguintes localidades, indicados com sua correspondente geração tecnológica (Figura 3.21):

1. São José dos Campos (IMPACT).
2. Cachoeira Paulista (IMPACT).
3. Pirassununga (IMPACT).

4. Ibiúna (LPATS IV).
5. Rio de Janeiro (LPATS IV).
6. Lavras (LPATS III).



FIGURA 3.21 – Sensores da RINDAT envolvendo o Vale do Paraíba, com seus respectivos proprietários.

3.2.1 Eficiência de Detecção

A eficiência de detecção (ED) foi calculada de dois modos: (a) para as DRs, conforme descrito na Seção 2.1, e (b) para os raios, onde um raio detectado significa que ao menos uma de suas DRs foi detectada pela RINDAT.

Para a eficiência de detecção das DRs, foram selecionadas **413 DRs** negativas e com canal visível nos registros da câmera rápida. Destas, foram detectadas 226 DRs. Identificamos a polaridade das DRs não detectadas através dos dados brutos das antenas (*raw data*), onde, apesar de não haver tido uma solução, alguma dentre as antenas da RINDAT foi capaz de determinar a polaridade da descarga. Chegamos então a uma ED para DRs de **54,7%**. A Figura 3.22 mostra a distribuição geográfica de todas as DRs detectadas utilizadas nesta análise. A distância média entre as DRs e a câmera rápida foi de 24,6 km e a mediana foi de 21,5 km. Como 50% das descargas ocorreram a ~ 20 km das antenas de S. José dos Campos e de Cachoeira Paulista – os locais de observação coincidiram – muitas destas poderiam ter causado a saturação das respectivas antenas, pelo fato de estarem próximas, excluindo assim tais antenas das soluções.

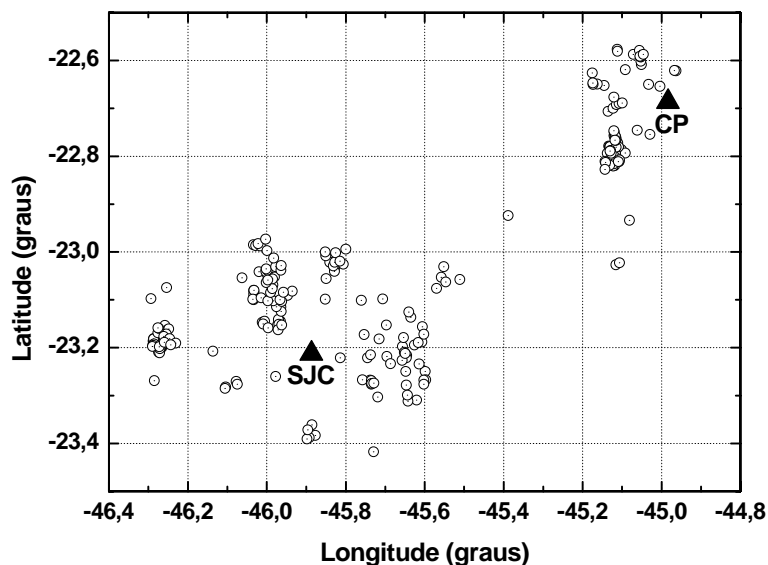


FIGURA 3.22 – Distribuição de todas as DRs de canal visível detectadas ao redor dos dois locais de observação: a Torre de Antenas CTA/IAE/AEL e o INPE/CIPRIN, indicadas por seus respectivos municípios (SJC e CP).

Um resultado interessante é sobre a média do pico de corrente das descargas detectadas, que foi de **-13,6 kA** para 105 casos. A média climatológica para o Vale do Paraíba entre os anos de 1999 e 2003 foi de **-18,0 kA**. Sabemos que este valor se refere a uma grande período e um grande número de amostras (centenas de milhares de DRs), mas antes da antena de Pirassununga haver entrado em operação. Podemos formular, basicamente, duas hipóteses:

- 1) que a antena de Pirassununga, após entrar em operação, aumentou a ED da rede para a região, capacitando-a para detectar DRs com picos de corrente menores – o que parece mais provável;
- 2) que, apesar do aumento da ED da rede para a região com a entrada da antena de Pirassununga, a temporada que amostramos, sofrendo uma variação sazonal, foi abaixo da média dos últimos quatro anos – o que parece menos provável.

Já, na análise da ED para os raios, foram selecionados **206** relâmpagos nuvem-solo negativos, onde identificamos a polaridade ou pela solução gerada ou pelos dados brutos das antenas. O agrupamento das descargas formando um raio foi realizado baseado na câmera rápida. Foram detectados **180** raios, sendo, portanto, a ED para raios de **87,4%**.

Idone et al. (1998), ao avaliar o desempenho da Rede Nacional de Detecção dos E.U.A. (NLDN) através de várias centenas de registros de VHS (múltiplas estações) e de registros de campo elétrico, encontrou variações significativas na ED em relação às diferentes tempestades. Segundo o autor, isto se deve “à inerente variabilidade das características da DR entre as tempestades”. Consideramos então que tais variações não seriam expressivas em nossos resultados, pois analisamos 18 diferentes tempestades, sendo, portanto, uma metodologia adequada para a obtenção da média da ED.

Considerando o número razoável de amostras e o método empregado, pudemos notar que tanto a ED para DRs quanto para raios estão coerentes com os valores estimados do fabricante (VAISALA), respectivamente, ~ 50% e 80-90%. Foi a primeira vez que se avaliou criteriosamente a rede em uma região do Brasil, onde todas as antenas da região encontravam-se em operação. Miranda (2004) já avaliou a ED da rede para a mesma região utilizando uma antena de campo elétrico, mas quando as antenas de São José dos Campos e Cachoeira Paulista não estavam operando normalmente (devido a problemas técnicos) e para um pequeno conjunto de 184 DRs (correspondente a aproximadamente 50 raios).

3.2.2 Estimativa da Precisão de Localização

Para a análise da precisão de localização (PL), foram utilizados somente raios com três ou mais DRs e de canal simples; ou seja, aqueles que tiveram três ou mais DRs atingindo o mesmo ponto de contato no solo. Para este estudo foram selecionados 26 raios, onde foi possível identificar com exatidão o ponto de contato. A Figura 3.23 mostra a identificação de um ponto de contato de um raio ocorrido a ~ 15 km da câmera rápida; aqui o tamanho do pixel é de 30 m.

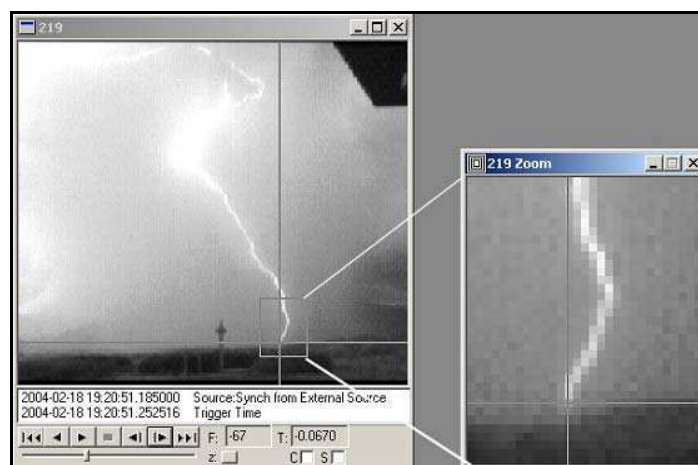


FIGURA 3.23 – Identificação do ponto de contato no solo para o raio 219, observado a 15 km de distância; o tamanho do pixel é de 30 m, para este caso.

A precisão de localização não foi calculada propriamente – pelo fato dos registros de câmera rápida não fornecerem a localização geográfica da descarga –, mas calculamos a maior distância entre as posições (soluções) encontradas pela RINDAT referentes às DRs de um mesmo raio (MD), com o intuito de calcular um **erro máximo estimado** para a PL. A Figura 3.24 ilustra tal método adotado.

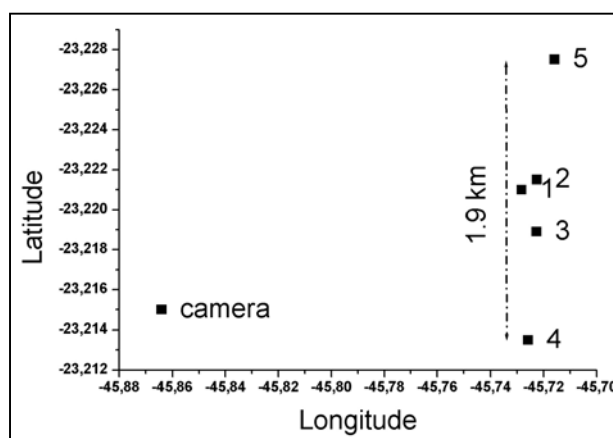


FIGURA 3.24 – Método de cálculo da maior distância entre soluções para raios não-bifurcados (que tocam o solo num único ponto). As soluções de localização encontradas pela RINDAT estão mostradas de 1 a 5. A máxima distância encontrada, neste caso, foi de 1,9 km para um raio que teve todas as suas DRs ocorridas num mesmo ponto.

A média dos 26 valores de MD foi de **5,3 km**, a mediana de **3,4 km** e a média geométrica de **3,6 km**. O histograma desta distribuição está mostrado na Figura 3.25. Sabemos que o cálculo realizado desta maneira superestima o erro de localização, já que a MD é uma **medida relativa** entre soluções da rede e não medidas absolutas da distância ente o ponto real de contato e as soluções. Não foi possível, portanto, realizar uma comparação com a precisão de localização esperada do fabricante para uma distribuição adequada de sensores (como é o caso do Vale do Paraíba), que vale 0,5-1 km.

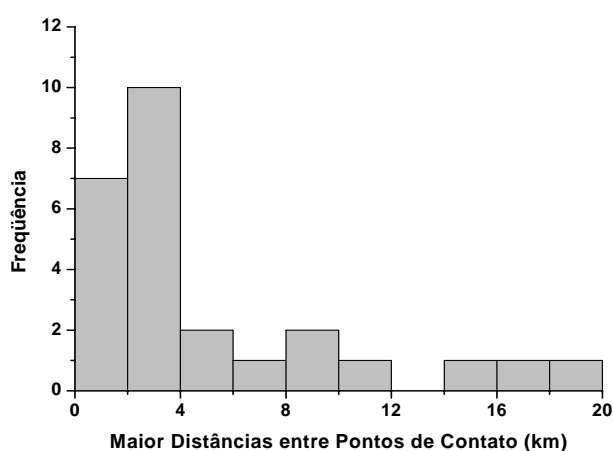


FIGURA 3.25 – Histograma das maiores distâncias entre pontos de contato encontrados pela RINDAT referentes a raios de canal simples.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

Este trabalho foi o primeiro na América Latina a estudar parâmetros do raio através de uma técnica acurada e altamente confiável e para uma amostra significativa de dados. A técnica observacional empregada baseou-se numa câmera de alta resolução temporal. Não existe ainda na literatura resultados observacionais baseados em câmeras rápidas para um grande espaço amostral, como o realizado por este trabalho. Somente quatro estudos no mundo foram realizados utilizando técnicas acuradas e envolvendo um grande número de amostras. Os parâmetros do relâmpago nuvem-solo investigados neste trabalho com alto grau de confiabilidade foram: (a) a multiplicidade das descargas de retorno (DRs), (b) o intervalo entre as DRs e (c) bifurcações ou o número de contatos no solo. Também foram feitas observações de corrente contínua e duração total do raio que, embora parcialmente limitadas, representam as primeiras realizadas no Brasil para um número grande amostras.

Através de duas campanhas em anos consecutivos (2003 e 2004), foram registrados 264 relâmpagos nuvem-solo com uma câmera rápida (1.000 quadros/s) no Vale do Paraíba. Com o auxílio da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), fizemos a classificação entre negativos e positivos. Quanto aos positivos, encontramos, dentre os 11 eventos observados, 45% com uma única descarga de retorno, uma multiplicidade média de **1,6** e a máxima de 3. A percentagem de ocorrência em relação ao total foi de **4,7%** (95,3% foram negativos).

Quanto aos 233 raios negativos registrados, foram analisados os seguintes parâmetros, referentes a 27 tempestades (fica aqui, portanto, a variação destes parâmetros por tempestade pouco expressiva, diferentemente dos outros quatro trabalhos, que se restringiram a um máximo de três tempestades):

- 1) Duração total: encontramos uma média de **282 ms** e uma mediana de **188 ms**. Sua distribuição de probabilidades nos mostrou a descontinuidade existente

entre 10 e 40 ms, que ilustra a rara ocorrência de corrente contínua após as primeiras descargas de retorno.

- 2) Multiplicidade de descargas de retorno: a média foi de **3,8** DRs por raio, a máxima, de 16 e o percentual de raios simples foi de **20%**. Tais valores foram, pela primeira vez, encontrados para o Brasil com um alto grau de confiabilidade. A distribuição de probabilidades deste parâmetro seguiu uma lognormal, sendo que a moda vale 2. Calculamos a probabilidade de ocorrência de cada DR segundo a sua ordem de ocorrência.
- 3) Pontos de contato no solo: **56%** de todos os raios observados e **71%** daqueles com duas ou mais DRs apresentaram mais de um ponto de contato no solo. O número médio de pontos de contato atingidos em cada raio foi de 1,69, ou seja, em média, **100** raios atingem **169** diferentes pontos no solo. Observamos que conforme aumenta a ordem da DR, o canal se consolida, ou seja, mais improvável é que ocorra bifurcação. Outro aspecto sobre a consolidação do canal, é que em **90,6%** das vezes a bifurcação ocorre após uma única utilização do canal anterior. Entretanto, foi observado um raríssimo evento de bifurcação **após 4 DRs** ocorridas num mesmo canal. Casos de retorno à canais previamente utilizados foram também observados. Foi comprovada, pela primeira vez, a ocorrência de uma DR bifurcada através de registros de imagem e de picos de corrente. Também foi estimado um tempo mínimo para que isto ocorra.
- 4) Intervalo entre descargas de retorno: encontramos uma média geométrica de **60 ms** e uma distribuição lognormal para este parâmetro. A diferença entre intervalos que precederam bifurcações e que seguiram o mesmo canal não foi significativa, enfatizando que a consolidação do canal está relacionada principalmente com o **número de utilizações do mesmo**. Os intervalos que envolveram **retorno** a um canal previamente utilizado foram significativamente menores, enfatizando neste caso que existe um limite temporal a partir do qual a condutividade do canal se torna insuficiente para a ocorrência de novas

descargas. Observamos uma tendência de que quanto maior é a multiplicidade, menor será o intervalo entre as descargas.

- 5) Corrente contínua: **35,6%** de todos os raios contiveram ao menos uma ocorrência de CC com durações maiores ou iguais a 10 ms. Elas aparecem em **4,8%** de todas as primeiras DRs de raios múltiplos, fato raro segundo a literatura atual. Uma contribuição deste trabalho foi a primeira medição já realizada, para um grande número de casos, de CC abaixo de 10 ms (mini): **39,6%** de todas as DRs. Apesar da duração ser subestimada pela câmera, pudemos observar com elevada frequência a sua ocorrência. A sua distribuição em frequência apresentou um ajuste exponencial com alta correlação, o que, de alguma maneira, indica o decaimento da corrente no canal.

Em síntese, foi implementada uma técnica observacional acurada - principalmente no que se refere à identificação das descargas de retorno - até então inexistente no Brasil. Foram levantados os primeiros resultados estatísticos, para um grande número de amostras, de importantes parâmetros do raio no Brasil, que estão expostos sumariamente na Tabela 4.1. Com isso, pudemos observar aspectos do comportamento do relâmpago nuvem-solo comum a outras regiões do globo e também comportamento não-usuais, pouco descritos na literatura, como a bifurcação da descarga de retorno, a reutilização de canais após a bifurcação do raio, uma bifurcação após 2 ms da descarga anterior, uma bifurcação após 4 DRs ocorridas num mesmo canal.

TABELA 4.1 – Características do relâmpago nuvem-solo negativo encontradas neste trabalho.

<i>CARACTERÍSTICA</i>	<i>VALOR</i>
Duração Total (média)	282 ms
Multiplicidade de Descargas de Retorno (média)	3,8
Percentual de Raios com uma única DR	20%
Percentual de Raios com Mais de Um Canal	56%
Percentual de Raios Múltiplos com mais de Um Canal	71%
Número de Pontos de Contato no Solo por Raio (média)	1,69
Número de DRs por Ponto de Contato (média)	2,3
Intervalo de Tempo entre DRs (média geométrica)	61 ms
Percentual de Raios contendo Corrente Contínua (duração ≥ 10 ms)	35,6%
Percentual de Raios Múltiplos contendo Corrente Contínua (duração ≥ 10 ms)	44,6%

Os resultados encontrados acerca da multiplicidade, porcentagem de raios bifurcados, presença de CC e quantidade de descargas que atingem um mesmo ponto de contato são informações fundamentais no desenvolvimento de proteção de sistemas elétricos de potência, eletrônicos, dentre outros.

Foi realizada pela primeira vez no Brasil uma avaliação da RINDAT com um número razoável de amostras. Seu desempenho, em termos de eficiência de detecção para o Vale do Paraíba, se mostrou coerente com o estimado pelo fabricante: **54,7%** para DRs e **87,4%** para raios. Já, em termos de precisão de localização, foi calculado somente um erro máximo, resultando numa média aritmética de 5,3 km.

Recomendações de Trabalhos Futuros:

- Utilizar registros de campo elétrico em conjunto com a câmera rápida: (a) campo elétrico “lento” (abaixo de ELF) para medições acuradas da CC e (b) campo elétrico “rápido” (ULF) para melhor identificação das DRs bifurcadas e para melhor avaliação de desempenho da RINDAT.

- Caracterizar o relâmpago nuvem-solo (através de câmera rápida, campo elétrico e imagens de radar e satélite) para as tempestades isoladas e para os sistemas convectivos de mesoescala através de um estudo comparativo.
- Observar as tempestades – principalmente as de sistemas frontais, pois são mais previsíveis – do seu início até sua dissipação com o objetivo de medir a variação de alguns parâmetros ao longo de sua vida, tais como multiplicidade, CC, etc..
- Verificar a importância da CC na consolidação no canal.
- Analisar a mínima duração total do raio para cada valor de multiplicidade. Estas grandezas aparentemente estão correlacionadas.
- Utilizar os resultados da avaliação de desempenho da RINDAT para a validação dos modelos de ED da rede, que se encontram atualmente em desenvolvimento pelo ELAT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brantley, R. D.; Tiller, J. A.; Uman, M. A. Lightning properties in Florida thunderstorms from video tape records. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 24, p. 3402-3406, Aug. 1975.
- Cianos, N.; Pierce, E. T. **A Ground-lightning environment for engineering usage**. Menlo Park (California, EUA): Stanford Research Institute, 1972. (Stanford Research Institute Project 1834, Technical Report 1).
- Cooray, V.; Jayaratne, K.P.S.C. Characteristics of lightning flashes observed in Sri Lanka in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p.21.051-21.056, 1994.
- Cooray, V.; Perez, H. Some features of lightning flashes observed in Sweden. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p.10.683-10.688, 1994.
- Global Atmospherics Inc (GAI). **LP2000 – Lightning Processor User's Guide**. Tucson, 1999.
- Guo, C.; Krider, E. P. The optical and radiation field signatures produced lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 8913-8922, 1982.
- Idone, V. P.; Davis, D. A.; Moore, P. K.; Wang, Y.; Henderson, R. W.; Ries, M.; Jamason, P. F. Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 9.045-9.055, Apr. 1998.
- Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 637-647, Feb. 1962.
- Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The atmosphere**. 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1982. 478 p.
- Mazur, V.; Krehbiel, P. R.; Shao, X.-M. Correlated high-speed video and interferometric observations of a cloud-to-ground flash. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 25.731-25.753, Dec. 1995.

- Mazur, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Journal Physique** 3, p. 1393-1409, Dec. 2002.
- Miranda, F. J.; Pinto, O.; Saba, M. M. F. A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning fashes in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 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. 192 p. (INPE-12181-TDI/975). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- Pinto Júnior, O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 196p.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning. Interlaken, Switzerland. In: International Conference On Lightning Protection, 20, Swiss Electrotechnical Association, 1990. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. Origin of lightning electric field signatures showing two return-stroke waveforms separated in time by a millisecond or less. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D4, p. 8.157-8.165, Apr. 1994.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Thottappillil, R. Review of lightning properties from electric field TV observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 10.745-10.750, 1994.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687p.
- Rakov, V. A.; Huffines, G. R. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, p. 1.455-1.462, Oct. 2003.
- Red Lake. **Instructions for operating**. Manual no. 9400-0010. Revision S. San Diego: Feb. 2002. Disponível em: <www.redlake.com>. Acesso em: 11 jun. 2003.
- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT)**. Disponível em: <www.rindat.com.br>. Acesso em: 16 maio 2004.

Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. 1997. 180 p. (INPE-6675-TDI/625). Tese (Doutorado em Ciência Espacial/ Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

Schonland, B.F.J.; Malan, D.J.; Collens, H. Progressive lightning II. **Proceedings of the Royal Society: Series A**, v. 152, p. 595-625, 1935.

Schulz, W. **Performance evaluation of lightning location systems**. 1997. 136 p. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering) - Technical University of Vienna, Vienna, Austria, 1997.

Shindo, T.; Uman, M. A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 5.189-5.198, 1989.

Thomson, E. M.; Galib, M. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J. Some features of strokes occurrence in Florida lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D3, p. 4910-4916, June 1984.

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, May 20, 1992.

Uman, M. A. **Lightning**. New York: Dover, 1984. 320p.

Uman, M. A. **The lightning discharge**. London: Academic Press, 1987. 377p.

Uman, M. A.; Krider, E. P. Natural and artificially initiated lightning. **Science**, v.246, p.457-464, Oct. 1989.

Valine, W. C.; Krider, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D20, p. 4.441, Oct. 2002.

APÊNDICE A

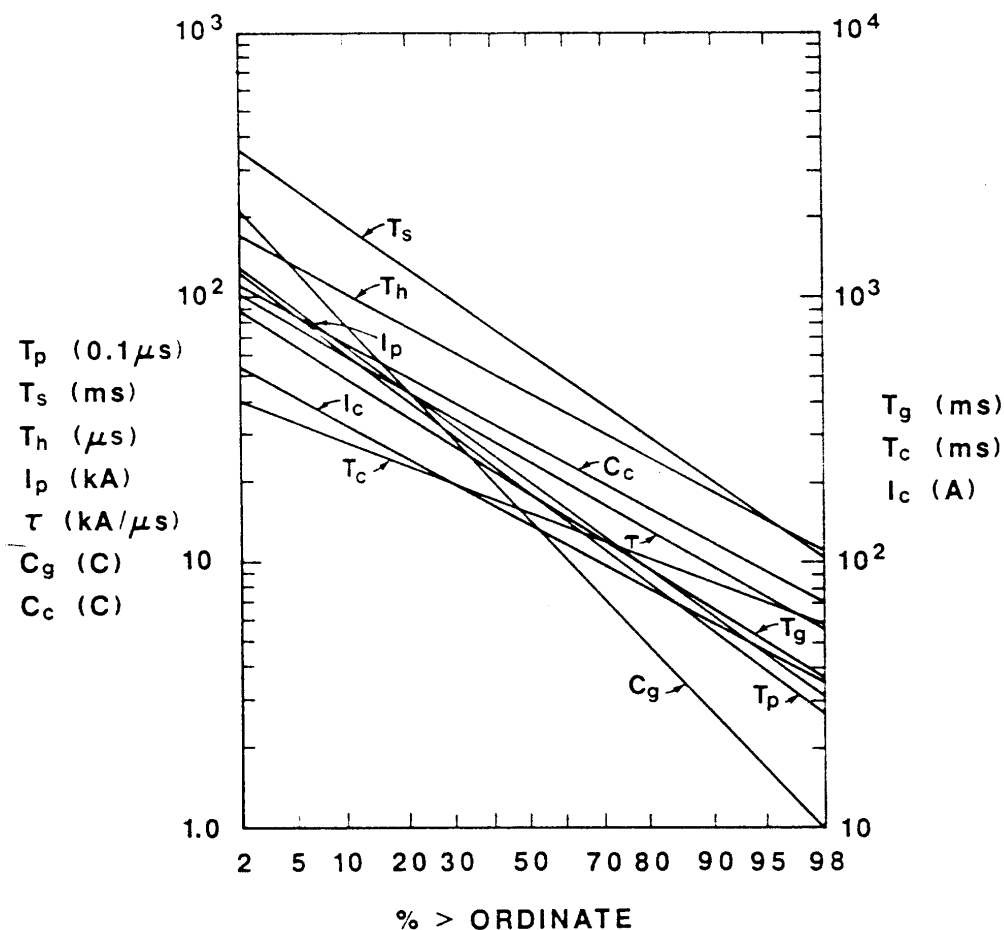
PLANILHA UTILIZADA NA REDUÇÃO DOS DADOS OBSERVACIONAIS

Esta planilha foi elaborada através do programa Microsoft Excel e possui 1800 linhas. Exibe-se aqui parcialmente a pasta principal, que contém os dados brutos, onde cada linha se refere a uma descarga de retorno. O que não foi exibido desta pasta refere-se a RINDAT.

Microsoft Excel - hspeed85															-d85														
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda															Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda														
A15 3															-45,9361														
Planilha de Dados Observacionais de Relâmpagos Naturais - ELAT															Raio - Indet.. I Bipol. b														
Camera Rápida e Instrumentos Auxiliares - Redução e Classificação															Raio + IC Ascen. A														
Posição Caixa D'Água do INPE -23,2024 -45,8597 Posição da Torre CTA -23,2126 -45,8867 Posição Site CP -22,8865 -44,9838															Raio Negativos														
Informações Temporais do Início do Candidato a Stroke															Corrente Continuada (Lum. Observada)														
Negativos															com E														
Stepped Leader: quantos frames dura? #d=dituso #l=loro #i=intermi- InterStroke InterVal. (s)															Multiplicidade de Canal (Bifurcação do Canal)														
Vis. do Canal v=visível f=fora p=parcial d=dituso (só claro) Neg. Order																													
Quant. de Strokes																													
Indicador de Inclusão p/ Flash Detection																													
Dur. (ms) Não se conta o frame do stroke n=nada x=caso ignorado																													
Pela VHS Digital Num. do quadro n=(não usada) 3=Pol index																													
Para os Raios Neg.																													
Para os Raios Pos.																													
Filme																													
Ano																													
Mês																													
Dia																													
hh (UT)																													
mm																													
ss																													
ms																													
Número do Frame no.avi Util p/ Lens Calc.																													
7																													
8																													
9																													
10																													
11																													
12																													
13																													
14																													
15																													
16																													
17																													
18																													
19																													
20																													
21																													
22																													
23																													
24																													
25																													
26																													
27																													
28																													
29																													
30																													
31																													
32																													
33																													
34																													
35																													
36																													
37																													
38																													
39																													
40																													
41																													
42																													
43																													
44																													
45																													
46																													
47																													
48																													
49																													
50																													
51																													
52																													
53																													
54																													
55																													
56																													
57																													
58																													
59																													
60																													
61																													
62																													
63																													
64																													
65																													
66																													
67																													
68																													
69																													
70																													
71																													
72																													
73																													
74																													
75																													
76																													
77																													
78																													
79																													
80																													
81																													
82																													
83																													
84																													
85																													
86																													
87																													
88																													
89																													
90																													
91																													
92																													
93																													
94																													
95																													
96																													
97																													
98																													
99																													
100																													
101																													
102																													
103																													
104																													
105																													
106																													
107																													
108																													
109																													
110																													
111																													
112																													
113																													
114																													
115																													
116																													
117																													
118																													
119																													
120																													
121																													
122																													
123																													
124																													
125																													
126																													
127																													
128																													
129																													
130																													
131																													
132																													
133																													
134																													
135																													
136																													
137																													
138																													
139																													
140																													
141																													
142																													
143																													
144																													
145																													
146																													
147																													
148																													
149																													
150																													
151																													
152																													
153																													
154																													
155																													
156																													
157																													
158																													
159																													
160																													
161																													
162																													
163																													
164																													
165																													
166																													
167																													
168																													
169																													
170																													
171																													
172																													
173																													
174																													
175																													
176																													
177																													
178																													
179																													
180																													
181																													
182																													
183																													
184																													
185																													
186																													
187																													
188																													
189																													
190																													
191																													
192																													
193																													
194																													
195																													
196																													
197																													
198																													
199																													
200																													
201																													
202																													
203																													
204																													
205																													
206																													
207																													
208																													
209																													
210																													
211																													
212																													
213																													
214																													
215																													
216																													
217																													
218																													
219																													
220																													
221																													
222																													
223																													
224																													
225																													
226																													
227																													
228																													
229																													
230																													
231																													
232																													
233																													
234																													
235																													
236																													
237																													
238																													
239																													
240																													
241																													
242																													
243																													
244																													
245																													
246																													
247																													
248																													
249																													
250																													
251																													
252																													
253																													
254																													
255																													
256																													
257																													
258																													
259																													
260																													
261																													
262																													
263																													
264																													
265																													
266																													
267																													
268																													
269																													
270																													
271																													
272																													
273																													
274																													
275																													
276																													
277																													
278																													
279																													
280																													
281																													
282																													
283																													
284																													
285																													
286																													
287																													
288																													
289																													
290																													
291																													
292																													
293																													
294																													
295																													
296																													
297																													
298																													
299																													
300																													
301																													
302																													
303																													
304																													
305																													
306																													
307																													
308																													
309																													
310																													
311																													
312																													
313																													
314																													
315																													
316																													
317																													
318																													
319																													
320																													
321																													
322																													
323																													
324																													
325																													
326																													
327																													
328																													
329																													
330																													
331																													
332																													
333																													
334																													
335																													
336																													
337																													
338																													
339																													
340																													
341																													
342																													
343																													
344																													
345																													
346																													
347																													
348																													
349																													
350																													
351																													
352																													
353																													
354																													
355																													
356																													
357																													
358																													
359																													
360																													
361																													
362																													
363																													
364																													
365																													
366																													
367																													
368																													
369																													
370																													
371																													
372																													
373																													
374																													
375																													
376																													
377																													
378																													
379																													
380																													
381																													
382																													
383																													
384																													
385																													
386																													
387																													
388																													
389																													
390																													
391																													
392																													
393																													
394																													
395																													
396																													
397																													
398																													
399																													
400																													
401																													
402																													
403																													
404																													
405																													
406																													
407																													
408																													
409																													
410																													
411																													
412																													
413																													
414																													
415																													
416																													
417																													
418																													
419																													
420																													
421																													
422																													
423																													
424																													
425																													
426																													
427																													
428																													
429																													
430																													
431																													
432																													
433																													
434																													
435																													
436																													
437																													
438																													
439																													
440																													
441																													
442																													
443																													
444																													
445																													
446																													
447																													
448																													
449																													
450																													
451																													
452																													
453																													
454																													
455																													
456																													
457																													
458																													
459																													
460																													
461																													
462																													
463																													
464																													
465																													
466																													
467																													
468																													
469																													
470																													
471																													
472																													
473																													
474																													
475																													
476																													
477																													
478																													
479																													
480																													
481																													
482																													
483																													
484																													
485																													
486																													
487																													
488																													
489																													

APÊNDICE B

DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE APROXIMADAS PARA PARÂMETROS DA DESCARGA DE RETORNO E DO RAI (ADAPTADO DE UMAN, 1987, P. 341).



STATISTICAL DISTRIBUTIONS FOR LIGHTNING
PARAMETERS

PARAMETER	OCCURRENCE %				
	2	10	50	90	98
Duration of flash (T_g), msec	850	480	180	68	36
Return stroke interval (T_s), msec	320	170	60	20	11
Return stroke peak current (I_p), kA	140	65	20	6.2	3.1
Charge transfer per flash (C_g), C	200	75	15	2.7	1
Time to r.s. peak current (T_p), μ sec	12	5.8	1.8	0.66	0.25
Rates of r.s. current rise (τ), kA/ μ sec	100	58	22	9.5	5.5
Time to r.s. current half-value (T_h), μ sec	170	100	45	17	10.5
Duration of continuing current (T_c), msec	400	260	160	84	58
Continuing current (I_c), A	520	310	140	60	33
Charge in continuing current (C_c), C	110	64	26	12	7