



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

## **CARACTERÍSTICAS DOS PULSOS DE QUEBRA DE RIGIDEZ DE RELÂMPAGOS**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)

Leandro Zanella de Souza Campos (FEG/UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: leandro.zanella@gmail.com

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE/INPE, Orientador)

E-mail: msaba@dge.inpe.br

### **COLABORADORES**

Dr. Osmar Pinto Jr. (DGE/INPE, Pesquisador)

Mauricio Grade Ballarotti (DGE/INPE, Aluno de Doutorado)

Dr. Wolfgang Schulz (ALDIS, Áustria, Pesquisador)

Julho de 2006

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                                                                                   | <b>5</b>  |
| 1.1 Histórico.....                                                                                                                                             | 5         |
| 1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características.....                                                                                                      | 6         |
| 1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características .....                                                                                                  | 7         |
| 1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo .....                                                                                                           | 12        |
| 1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica e Sua Relevância como Objeto de Estudo .....                                                                        | 12        |
| 1.4 Objetivos do Trabalho .....                                                                                                                                | 13        |
| <b>CAPÍTULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>                                                                                                        | <b>15</b> |
| 2.1 Materiais Utilizados.....                                                                                                                                  | 15        |
| 2.2 Instrumentação Observacional.....                                                                                                                          | 15        |
| 2.3 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade .....                                                                                                    | 16        |
| 2.4 Antena de Campo Elétrico .....                                                                                                                             | 20        |
| 2.5 Local de Observação.....                                                                                                                                   | 21        |
| 2.6 Procedimento das Observações .....                                                                                                                         | 22        |
| <b>CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                               | <b>24</b> |
| 3.1 Amostra Analisada.....                                                                                                                                     | 24        |
| 3.2 Emissão de Luz Associada aos Pulsos de Quebra de Rigidez.....                                                                                              | 25        |
| 3.3 Relação Entre o Tempo do Início dos Pulsos de Quebra de Rigidez até a Descarga de Retorno ( $T_{PB-RS}$ ) e o Pico de Campo Elétrico Desta ( $E_p$ ) ..... | 29        |
| 3.3.1 Descargas de Retorno Iniciais.....                                                                                                                       | 31        |
| 3.3.2 Descargas de Retorno Subseqüentes com Formação de Novo Canal.....                                                                                        | 31        |
| <b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                                                                                         | <b>34</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                                                                                         | <b>35</b> |
| <b>APÊNDICE A - ATIVIDADES PARALELAS REALIZADAS NO PERÍODO DE BOLSA 2005/2006.....</b>                                                                         | <b>37</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 6  |
| FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 9  |
| 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). ....                                        | 11 |
| FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmara <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 16 |
| 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). ....                                                                                                                              | 18 |
| FIGURA 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmara 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 câmara em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade da imagem. ....                                       | 18 |
| FIGURA 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmara. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 19 |
| FIGURA 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 19 |
| FIGURA 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmara com o sensor CCD exposto (seta). ....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 20 |
| FIGURA 2.7 – Antena plana utilizada em medidas de campo elétrico. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 21 |
| FIGURA 2.8 – Exemplo de gráfico de campo elétrico <i>versus</i> tempo obtido com o auxílio da antena plana. A imagem mostra o instante de ocorrência de uma descarga de retorno (pico maior negativo) juntamente com os pulsos de quebra de rigidez (pequenos pulsos bipolares de pequena amplitude). ....                                                                                                                       | 21 |
| FIGURA 3.1 – Mapa dos eventos estudados neste trabalho. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 25 |
| FIGURA 3.2 – Gráfico de campo elétrico (em V/m) <i>versus</i> tempo (em ms). As setas indicam o início dos pulsos de PB bem definidos (a) ou de candidatos (b). ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| FIGURA 3.3 – Relação entre o campo elétrico (a) e os quadros filmados pela câmara rápida (b) de um mesmo raio. O quadro (b-2) está com sua luminosidade ampliada em relação aos demais (a intensidade da luminosidade é muito inferior à produzida pelo líder escalonado, mostrado nos quadros seguintes), e nele tem início os pulsos de PB (conforme indicado, também, no gráfico de campo elétrico <i>versus</i> tempo). .... | 29 |
| FIGURA 3.4 – Exemplo de medida do intervalo entre o início dos PB até a descarga de retorno, $T_{PB-RS}$ (a) e do pico de campo elétrico da descarga de retorno, $1/E_p$ (b). ....                                                                                                                                                                                                                                               | 30 |
| FIGURA 3.5 – Relação $1/E_p$ <i>versus</i> $T_{PB-RS}$ para descargas de retorno iniciais. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| FIGURA 3.6 – Relação $1/E_p$ <i>versus</i> $T_{PB-RS}$ para descargas de retorno subsequente com formação de novo canal. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32 |
| FIGURA 3.7 – Relâmpago ocorrido em um local de clima seco, sendo possível observar o ponto de bifurcação de seu canal. Um cenário deste tipo permitiria identificar, por exemplo, qual parcela do canal foi reutilizada em uma descarga de retorno subsequente. ....                                                                                                                                                             | 33 |

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1.1 - Principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura internacional (Uman, 1984; Rakov e Uman, 2003) e obtidos no Brasil (Saba et al, 2006), sendo estes indicados por um asterisco. .... 11

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 Histórico

A ocorrência de relâmpagos em nosso planeta é bastante comum e mais antiga do que a própria humanidade. O estudo destes fenômenos no Brasil teve início há 25 anos com a criação do ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica) no INPE, e durante este período foi possível observar algumas características diferentes daquelas relatadas na literatura internacional. Este fato, por si só, justifica a continuidade dos esforços já realizados neste sentido.

O relâmpago está entre os fenômenos naturais que mais causam mortes nos Estados Unidos (Wood, 1988), sendo que no Brasil ele é responsável por 100 a 200 mortes por ano além de causar um prejuízo anual em torno de 500 milhões de dólares (Pinto e Pinto, 2000).

Vários setores de atividades são prejudicados diretamente pelos relâmpagos. Transmissão de energia elétrica e telecomunicações são os maiores afetados, mas eles também constituem uma grande ameaça para indústrias e edifícios (comerciais ou residenciais), além da própria segurança das pessoas. Os sistemas de proteção hoje utilizados são desenvolvidos a partir de observações e dados de raios obtidos em outros países (e fora da região tropical, caso em que o Brasil se encaixa), o que aumenta a importância de se possuir mais dados dos casos ocorridos em nossa região.

Os dados colhidos dos relâmpagos no Brasil são baseados em:

- Parâmetros fornecidos pela RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas), um conjunto de 24 sensores localizados na região sudeste do Brasil e arredores. Pertence a um consórcio de empresas com participação do INPE (Pinto, 2003).
- Raios artificiais (induzidos), cujas características são apenas equivalentes aos naturais, induzidos por foguetes lançados pelo INPE no CIPRIN (Centro

Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais), localizado em Cachoeira Paulista (Saba et al, 2005).

- Imagens de câmera rápida e dados de campo elétrico de raios naturais. Ambos sincronizados e com horário universal (GPS) com precisão de milissegundo (Ballarotti et al., 2005; Saba et al., 2006).

## 1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características

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 freqüentes (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 freqüência. 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 freqüentes, 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 subtipos: 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 freqüentes 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.

### **1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características**

Um relâmpago nuvem-solo negativo segue geralmente seis etapas, nesta ordem, a saber: (a) Pulso de Quebra de Rigidez ou descarga p-N, (b) líder escalonado, (c) descarga conectante, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno subsequente, sendo que as etapas (e) e (f) podem se repetir várias vezes ou mesmo não ocorrer (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. Esta descarga é conhecida como **Pulso de Quebra de Rigidez** (mais detalhes na seção 1.3) (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);



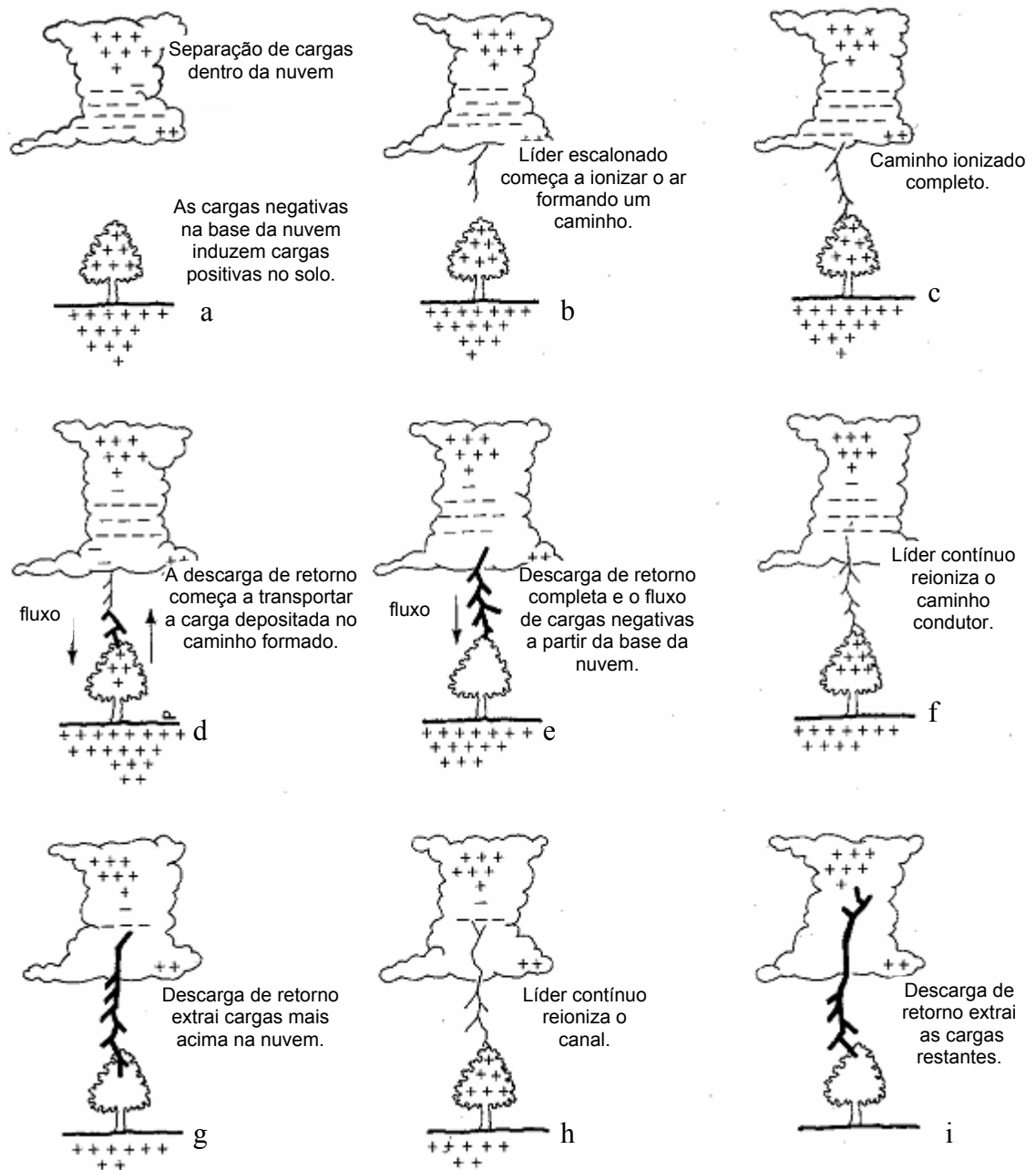


FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

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 subseqüentes são menos ramificadas do que a primeira descarga de retorno. Cerca de 50% dos casos elas não seguem uma trajetória única, formando os chamados raios de canais múltiplos, que atingem mais de um local (Saba et al., 2006).

As descargas de retorno geralmente são 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 são dezenas ou centenas de ampères, e de duração de até centenas de milissegundos” (Rakov e Uman, 2003). Normalmente denomina-se corrente contínua curta quando ela dura entre 10 e 40 ms e longa aquelas que ultrapassam 40 ms. Ballarotti (2005) observou uma grande ocorrência de correntes contínuas com duração inferior a 10 ms, até então inexistentes na literatura consultada em seu trabalho, e as denominou mini-correntes contínuas. 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). Cerca de 70% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de corrente contínua (Saba et al, 2006).

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 1.3 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.

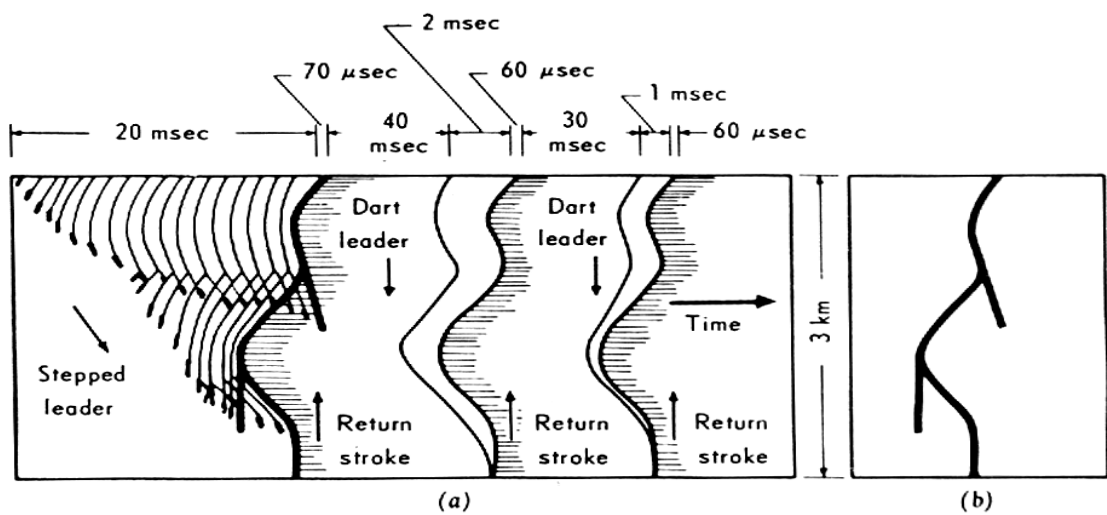


FIGURA 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado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

FONTE: Uman (1984, p. 15).

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 e Uman, 2003) e obtidos no Brasil (Saba et al, 2006), sendo estes indicados por um asterisco.

| CARACTERÍSTICA                  | ETAPA | VALOR TÍPICO           |
|---------------------------------|-------|------------------------|
| <b>Líder Escalonado</b>         |       |                        |
| Comprimento dos passos          |       | 50 m                   |
| Intervalo de tempo entre passos |       | 20 - 50 $\mu$ s        |
| Velocidade média de propagação  |       | $2 \cdot 10^5$ m/s     |
| Corrente                        |       | 100 A                  |
| Duração total                   |       | 35 ms                  |
| <b>Descarga de Retorno</b>      |       |                        |
| Velocidade de propagação        |       | $(1-2) \cdot 10^8$ m/s |
| Pico de corrente                |       | 30 kA                  |
| Comprimento do canal            |       | 5 km                   |
| Duração                         |       | 70 $\mu$ s             |

|                                                                            |                           |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>Líder Contínuo</b>                                                      |                           |
| Velocidade de propagação                                                   | (1-2).10 <sup>7</sup> m/s |
| Corrente                                                                   | 1 kA                      |
| Duração total                                                              | 1 – 2 ms                  |
| <b>Descarga Subseqüente</b>                                                |                           |
| Corrente                                                                   | 10 – 15 kA                |
| Velocidade de propagação                                                   | (1-2).10 <sup>8</sup> m/s |
| <b>Corrente Contínua</b>                                                   |                           |
| Duração                                                                    | 100 ms                    |
| Porcentagem de Descargas de Retorno com corrente contínua (duração >= 1ms) | 50% *                     |
| <b>Características Gerais de um Relâmpago</b>                              |                           |
| Diâmetro do canal                                                          | 1-2 cm                    |
| Número de descargas de retorno                                             | 3,8 *                     |
| Intervalo de tempo entre as descargas                                      | 62 ms *                   |
| Duração total                                                              | 180 ms *                  |
| Carga total envolvida                                                      | 25 C                      |
| Porcentagem de Relâmpagos com Canais Múltiplos                             | 56% *                     |

---

### 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 se 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.

### 1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica e Sua Relevância como Objeto de Estudo

Um meio dielétrico passa a ser condutor quando o campo elétrico local atinge um determinado valor. A este fenômeno damos o nome de quebra de rigidez dielétrica.

Em tempestades elétricas os pulsos de quebra de rigidez dielétrica do ar (PB, abreviação do inglês *preliminary breakdown pulses*) são descargas de baixa intensidade que ocorrem dentro da nuvem, entre 3 e 5 km do solo, durante períodos que variam de 10 a 100 ms (Pinto e Pinto, 2000) precedendo o líder escalonado do relâmpago (Rakov e Uman, 2003). Elas são observáveis em medições de campo elétrico através de pulsos normalmente bipolares com uma duração média de 50  $\mu$ s e cerca de 100  $\mu$ s entre eles. Os detalhes quanto à sua origem ainda não possuem uma explicação satisfatória. Medidas de campo elétrico dentro de nuvens de tempestade indicam valores máximos entre 100 e 400 kV/m, bastante inferiores ao que seria esperado como necessário para a quebra da rigidez dielétrica do ar na altura da nuvem, estimado em 1 MV/m (Pinto e Pinto, 2000). Este fato é bastante intrigante e tem levado a diversas especulações distintas, envolvendo desde a polarização de gotículas de água pelo campo no local (causando uma diminuição na intensidade mínima do campo elétrico para causar a quebra de rigidez dielétrica do ar) até a influência de radiação cósmica, ou mesmo uma união das duas possibilidades ().

Suas características, ocorrência e influência sobre a descarga de retorno que as seguem ainda não são bem compreendidas, o que justifica uma série de estudos mais aprofundados que permitiriam uma melhor compreensão do processo envolvido na ocorrência de um relâmpago. Trabalhos anteriores (Kitagawa e Brook 1960, Krider e Radda 1975, Beasley et al. 1982, Gomes et al. 1998) apresentam estudos utilizando apenas aferições de campo elétrico. Devido à sua grande rapidez e baixa intensidade, câmeras VHS não são úteis para este fim. Este é o primeiro estudo a aliar imagens de alta resolução temporal a medidas de campo elétrico no solo e dados de uma rede de detecção de descargas atmosféricas (RINDAT no nosso caso).

#### **1.4 Objetivos do Trabalho**

Este trabalho obter novos dados a respeito dos pulsos de quebra de rigidez dielétrica (PB) que precedem a ocorrência das descargas (iniciais e subseqüentes em novo canal) de um relâmpago. Para isso combinamos imagens obtidas através de uma câmera de alta resolução temporal, medidas de campo elétrico e dados da rede nacional de detecção de relâmpagos (RINDAT). Os seguintes parâmetros foram estudados:

- Características visuais da região da nuvem de tempestade de onde o relâmpago se origina;
- Relação entre o intervalo de tempo transcorrido desde o início dos PB até o instante em que ocorre uma descarga de retorno (inicial ou subsequente com formação de novo canal) e o pico de campo elétrico desta.

## CAPÍTULO 2

### MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

#### 2.1 Materiais Utilizados

- Câmera rápida *MotionScope 8000S* PCI, fabricada pela *Red Lake*;
- Microcomputador com a interface PCI da câmera rápida e os softwares *MIDAS 2.0* e *Origin 7.0*;
- Antena plana para medições de campo elétrico;
- Módulo de aquisição PCI BNC-6110 da National Instruments, com 12 bits e 8 entradas analógicas; e
- Antena GPS para sincronismo dos equipamentos.

#### 2.2 Instrumentação Observacional

Estudos internacionais de relâmpagos já foram realizados com a utilização de câmera VHS juntamente com antenas de campo elétrico. Porém, este método não é adequado para efetuar uma contagem precisa das descargas, visto que o tempo entre quadros é de 33ms (30 fps, *frames* por segundo, ou seja, 30 quadros por segundo) (Rakov e Uman, 2003; Saba et al., 2006). Além da perda eventual de descargas de um relâmpago, o sistema VHS convencional não é capaz de registrar o líder escalonado ou correntes contínuas com resolução inferior a 33 ms.

Neste trabalho foi utilizada uma câmera de alta resolução temporal com sincronização GPS. Ela foi configurada de tal forma a gerar filmes com 1000 fps (maiores detalhes na próxima sessão), o que possibilita uma análise bastante detalhada do raio, determinar o instante de sua ocorrência com precisão de milissegundo, bem como observar a emissão de luz associada aos pulsos de quebra de rigidez dielétrica do ar.

Aliada à câmera utilizamos uma antena plana para medições de campo elétrico com uma largura de banda que vai de 306 Hz a 1,5 MHz. Seus dados foram adquiridos com uma taxa de 5 MS/s (*mega-samples* por segundo, ou seja, um milhão de aquisições por segundo), também com sincronização GPS, através de um módulo de aquisição PCI-6110 da National Instruments. Com as medidas obtidas por ela é possível, através da análise de formas de campo elétrico, observar a ocorrência das descargas de retorno e os pulsos de quebra de rigidez dielétrica do ar.

### 2.3 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 (*Global Positioning System*), 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 para facilitar o posicionamento da câmera durante as aquisições de imagens.

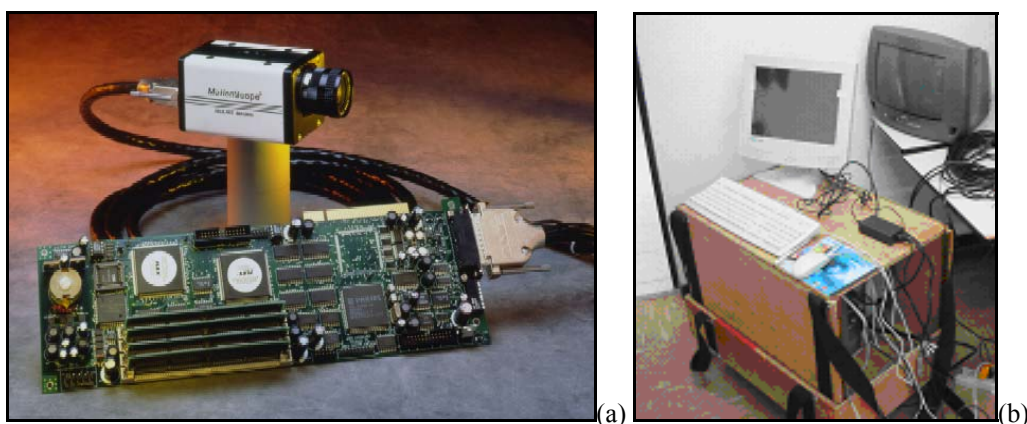


FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera *8000S MotionScope* com sua placa de *interface* com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.



FONTE (a): Red Lake (2002).

A taxa de aquisição está configurada para 1.000 fps. Não foi usada a máxima (8.000 fps) porque há um compromisso entre taxa de aquisição e ângulo de abertura (ou, equivalentemente, área utilizável do CCD). Assim, a 1.000 fps, 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  $\mu\text{m}$  x 7,4  $\mu\text{m}$ . 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.

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*<sup>1</sup>) 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.

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 e de acordo com as

---

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

necessidades do trabalho. 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.

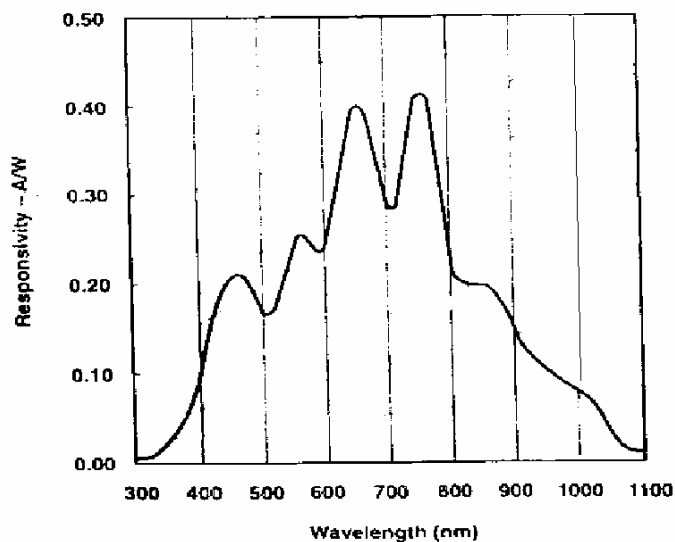


FIGURA 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

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

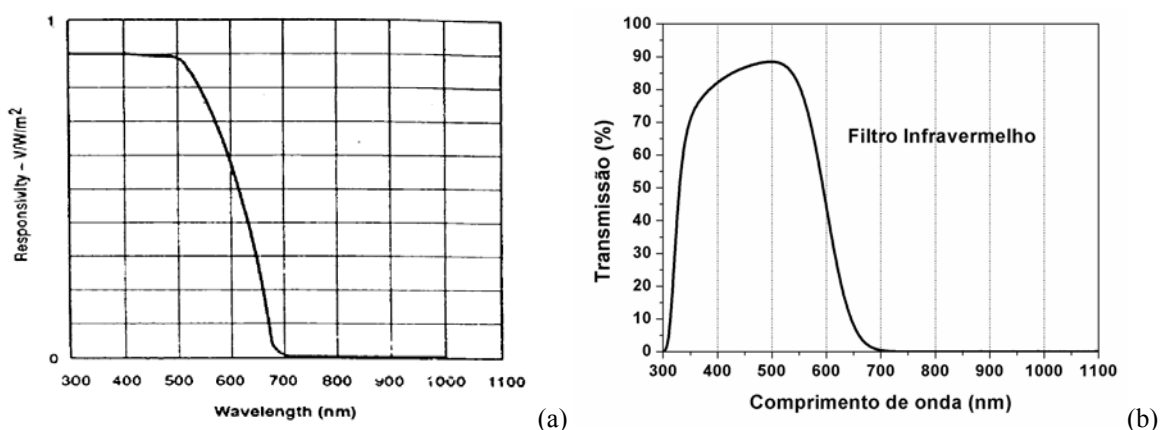


FIGURA 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o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

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

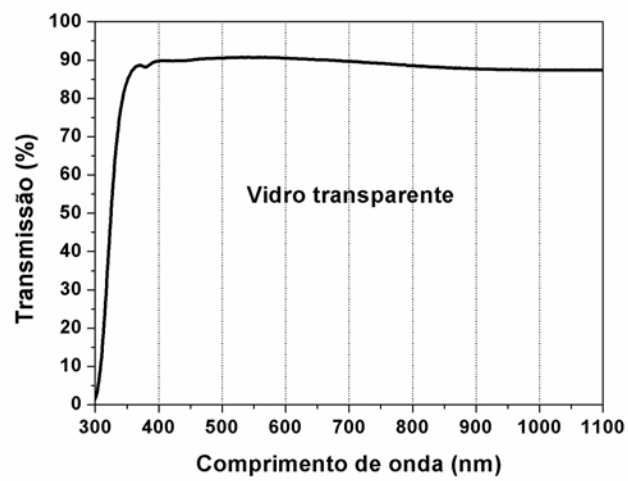


FIGURA 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

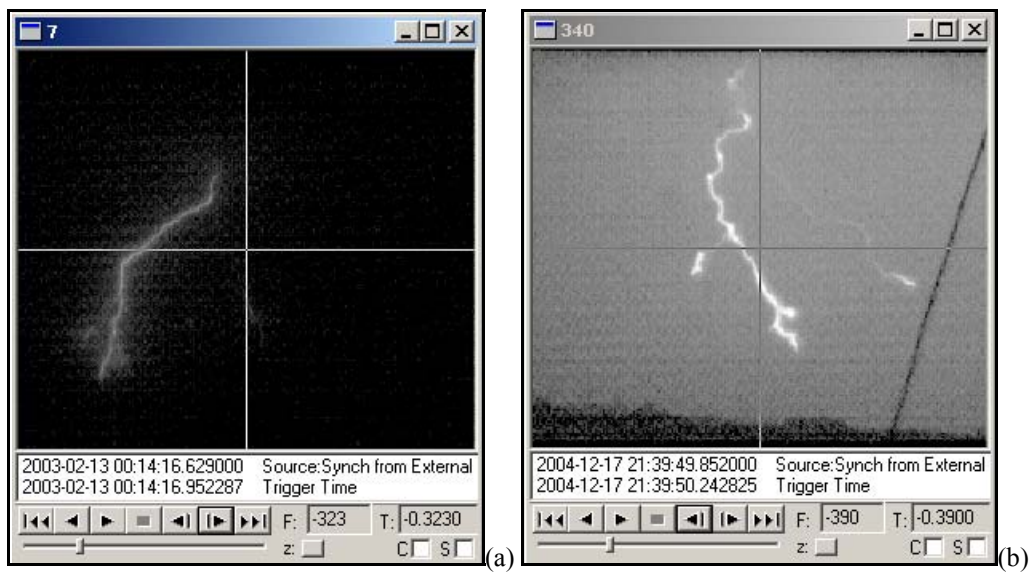


FIGURA 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).

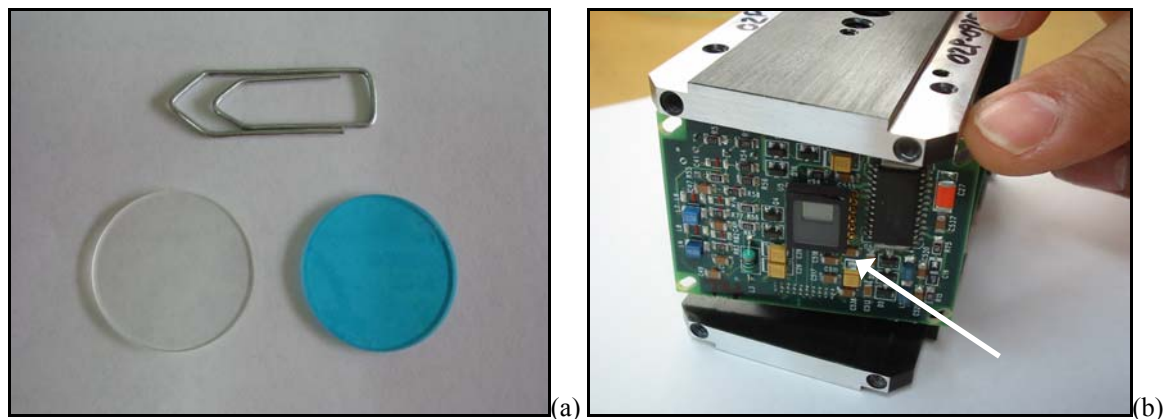


FIGURA 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

## 2.4 Antena de Campo Elétrico

Uma antena plana com largura de banda de 306 Hz a 1,5 MHz serviu para efetuar medições de campo elétrico. Para aquisição de seus dados utilizamos o módulo BNC-6110 da National Instruments, que possui 8 entradas analógicas de 12 bits e sincronização com GPS, configurado para uma resolução de 5 MS/s (*mega-samples* por segundo, ou seja, 5 milhões de aquisições em 1 segundo). As medições são salvas por um software do tipo *data logger* em arquivos *.bin*, possibilitando a gravação, visualização e análise. Seus dados podem ser facilmente confrontados com os vídeos registrados pela câmera rápida graças à sincronização com tempo GPS que as duas possuem, tornando os dois instrumentos praticamente complementares. A FIGURA 2.7 é uma fotografia da antena e a FIGURA 2.8 mostra um exemplo de gráfico do campo elétrico de um relâmpago *versus* tempo obtido com seu auxílio.



FIGURA 2.7 – Antena plana utilizada em medidas de campo elétrico.

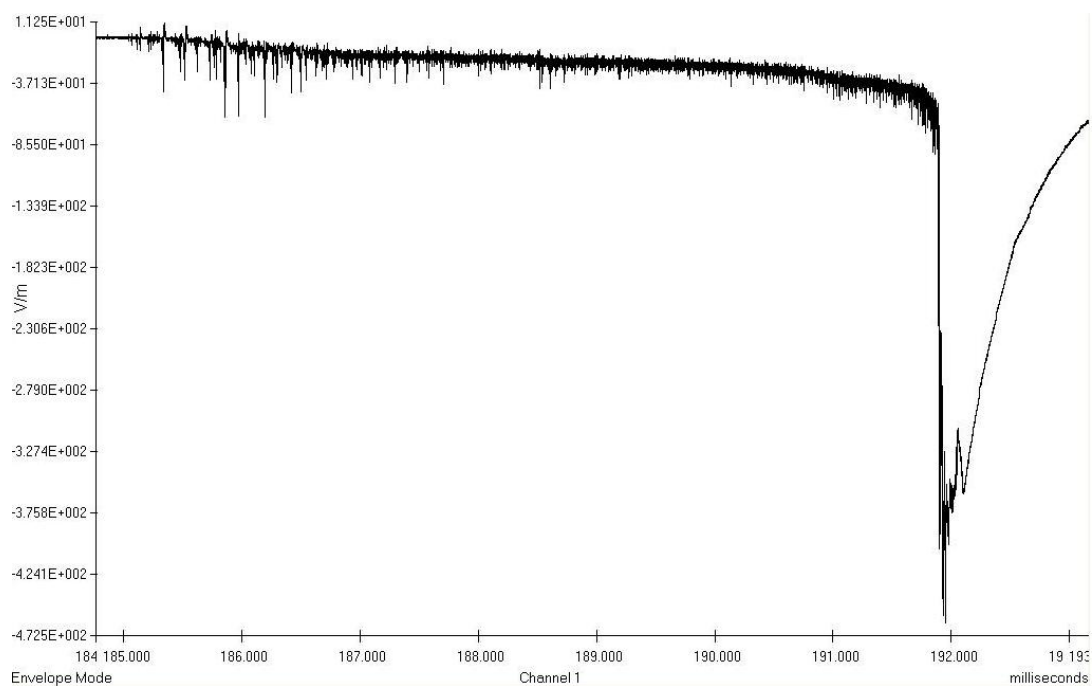


FIGURA 2.8 – Exemplo de gráfico de campo elétrico *versus* tempo obtido com o auxílio da antena plana. A imagem mostra o instante de ocorrência de uma descarga de retorno (pico maior negativo) juntamente com os pulsos de quebra de rigidez (pequenos pulsos bipolares de pequena amplitude).

## 2.5 Local de Observação

Para as observações realizadas utilizou-se a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, locada no município de São José dos Campos (situado no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo), gentilmente cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Trata-se de um

ponto elevado em comparação com o relevo local, possibilitando boa visibilidade em praticamente 360° ao redor. A FIGURA 2.9 exibe uma foto do local.



FIGURA 2.9 – Torre de observação do CTA/IAE/AEL.

## 2.6 Procedimento das Observações

A obtenção dos dados foi realizada com um operador, que, basicamente, realizava as seguintes funções com a câmera rápida: (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 operador pressiona 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 este 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.

A operação da antena de campo elétrico se dá de forma semelhante, com esta locada sobre a torre de observação na parte exterior desta. O operador pressiona também um botão *trigger* simultaneamente com o da câmera, que faz com que o computador grave os dados obtidos módulo de aquisição BNC-6110 utilizando o mesmo recurso computacional de fila circular (explicado acima). No caso do campo elétrico a aquisição se dá em um período mais longo, normalmente de 2 a 3 segundos antes mais 2 a 3 segundos depois do acionamento do *trigger*, garantindo que todo o intervalo de tempo coberto pela câmera seja também registrado pelo campo elétrico.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Amostra Analisada

De todas as descargas subseqüentes analisadas ( $N = 75$ ) percebemos que as aquelas que seguem o canal da descarga anterior não apresentam pulsos de quebra de rigidez pelo fato de encontrarem o canal ainda ionizado.

Um total de 29 descargas de retorno iniciais e 16 descargas de retorno subseqüentes com formação de novo canal observadas no dia 23 de março de 2005 apresentaram pulsos de quebra de rigidez. Obtivemos para todas elas medidas de campo elétrico além do registro em vídeo com a câmera rápida. Em todos estes casos, pelo menos uma descarga de retorno foi detectada pela RINDAT.

O caso de descarga de retorno inicial mais distante (dado fornecido pela RINDAT) atingiu o solo a 76 km do local de observação, enquanto para as subseqüentes (com formação de novo canal) atingiram o solo a 18 km ou menos. Esta diferença entre as distâncias máximas ocorreu devido ao fato dos PB possuírem uma intensidade muito menor em descargas subseqüentes, sendo necessário que esta ocorra a uma distância menor do local de observação para que não haja ambigüidade nas medições realizadas. A FIGURA 3.1 mostra um mapa com a localização de todos os eventos analisados neste trabalho.



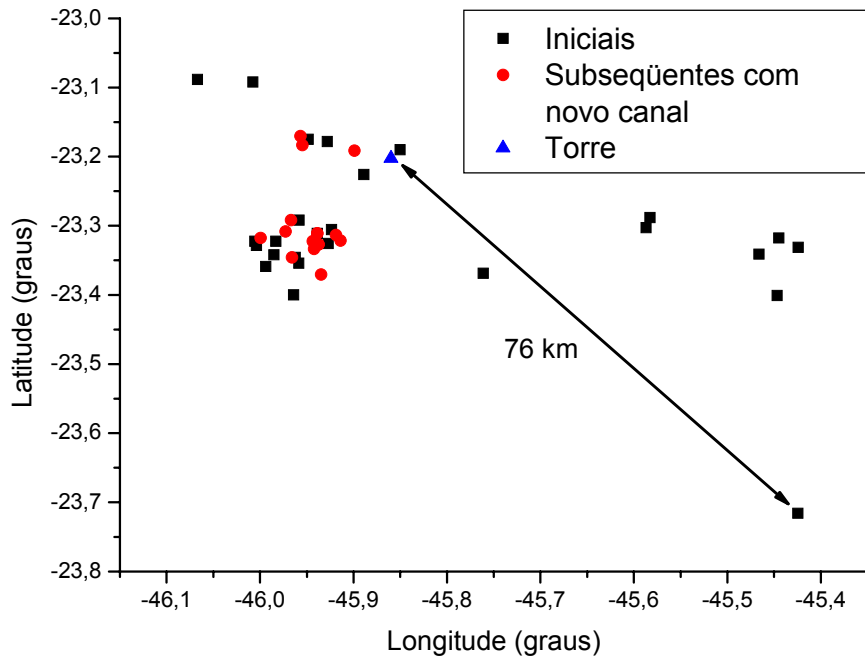
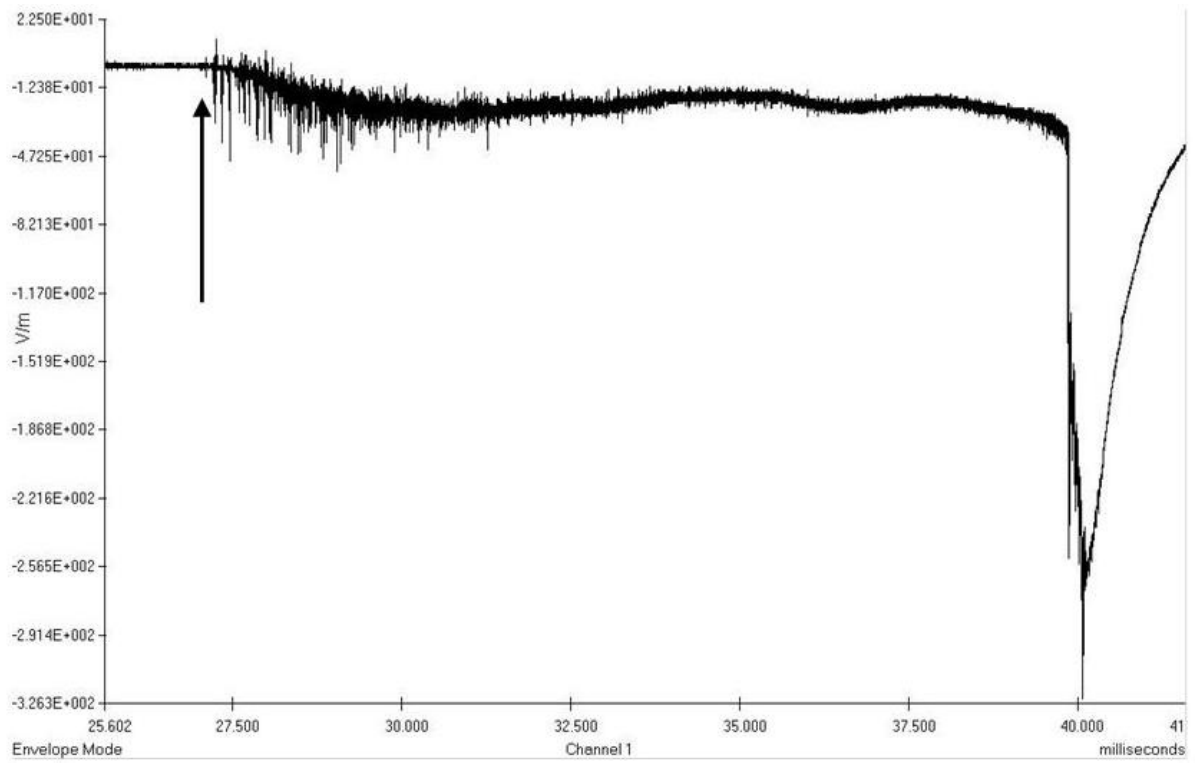


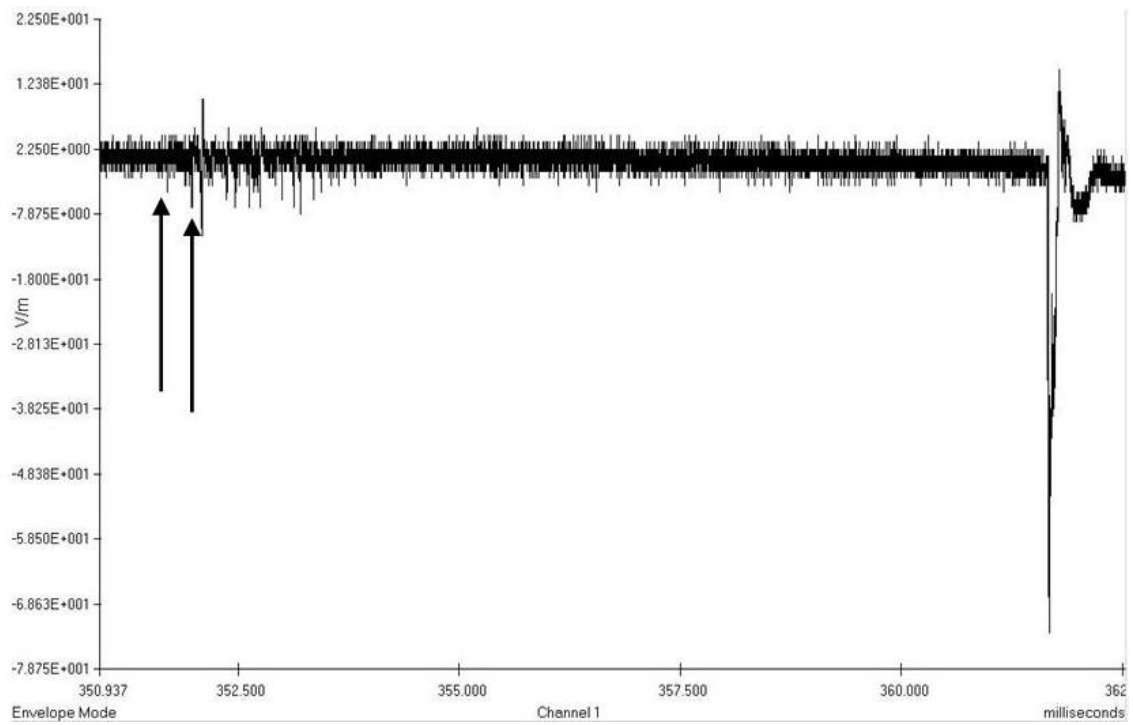
FIGURA 3.1 – Mapa dos eventos estudados neste trabalho.

### 3.2 Emissão de Luz Associada aos Pulsos de Quebra de Rigidez

Estudos anteriores acerca dos pulsos de quebra de rigidez de relâmpagos baseavam-se principalmente em medições de campo elétrico (Kitagawa e Brook 1960, Krider e Radda 1975, Beasley et al. 1982, Gomes et al. 1998). Devido à relativamente baixa intensidade destes pulsos em muitos casos sua observação era impossibilitada, especialmente aqueles ocorridos a uma distância muito grande do local de observação. A FIGURA 3.2a mostra o gráfico de campo elétrico (em V/m) *versus* tempo (em ms) de um exemplo de evento ocorrido em um local bem próximo à torre de observação, cuja identificação do início dos PB é bastante simples (indicada por uma seta), e a 3.2b mostra um caso mais distante em que esta identificação fica bastante comprometida (indicamos dois “candidatos” a início dos PB utilizando duas setas) pelo fato da amplitude dos pulsos serem muito próximas ao nível de ruído.



(a)

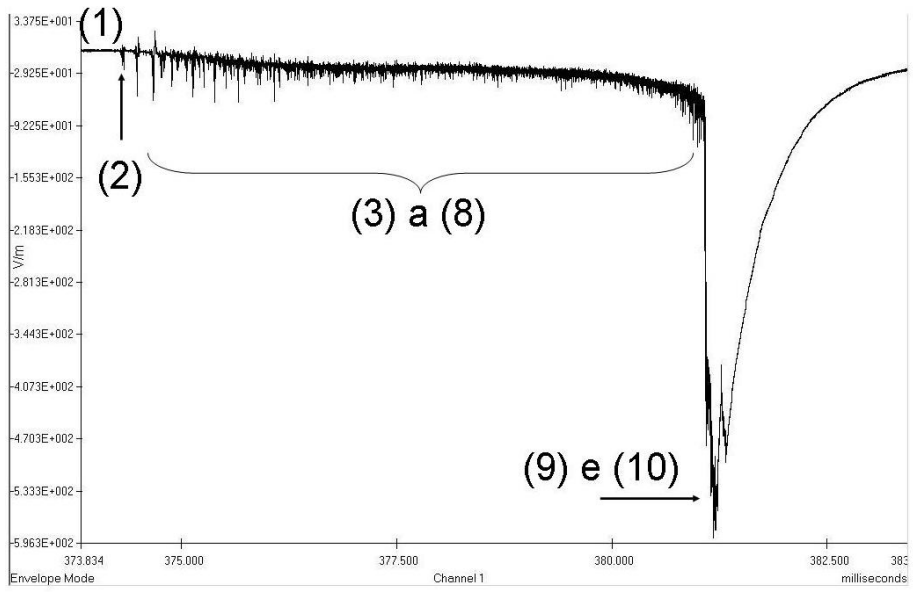


(b)

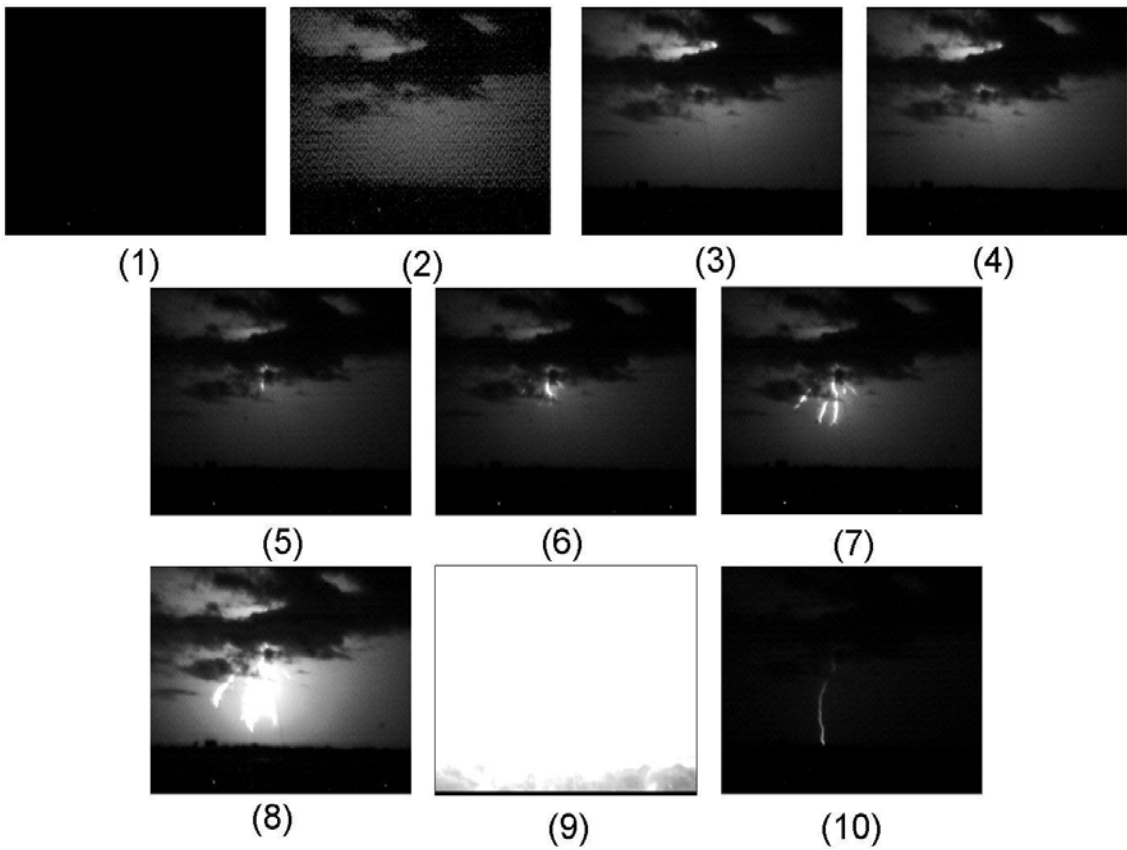
FIGURA 3.2 – Gráfico de campo elétrico (em V/m) versus tempo (em ms). As setas indicam o início dos pulsos de PB bem definidos (a) ou de candidatos (b).

Este é o primeiro estudo deste parâmetro que se baseia em vídeos de alta resolução temporal (obtidos pela câmera rápida) aliados às medidas de campo elétrico de raios. Observamos no vídeo o instante do início dos PB (conhecido através da análise das medidas de seu campo elétrico) de um relâmpago ocorrido próximo à torre de observação (com seu campo bem definido, semelhante ao da FIGURA 3.2a). Foi possível notar a emissão, neste mesmo instante, de pulsos luminosos de intensidade muito pequena na região da nuvem que originou o relâmpago. A análise de outros vídeos demonstrou que estas emissões de luz são regulares e possíveis de observar em grande parte dos vídeos com boa visibilidade do cenário. A FIGURA 3.3 exemplifica esta relação, sendo que o quadro (b-2) em que o pulso de luminosidade associado aos PB está com sua luminosidade ampliada. Observou-se a ocorrência tanto dos pulsos de PB quanto dos pulsos de luminosidade não só em descargas de retorno iniciais mas também nas subseqüentes em que houve formação de um novo canal. Isto nos levou a concluir que os pulsos existem apenas quando o líder precisa romper trechos de ar ainda virgem. Descargas de retorno subseqüentes que passam por um canal já formado não apresentam estas características.

A relação entre este pulso de luminosidade com o PB foi notada graças à alta resolução temporal da câmera rápida e ao sincronismo com GPS utilizado tanto para a câmera quanto para o módulo de aquisição da antena. Tendo este novo critério adicional, realizamos este estudo considerando apenas os casos em que os PB eram visíveis tanto nas medidas de campo elétrico quanto no vídeo da câmera rápida, descartando completamente os casos ambíguos.



(a)



(b)

FIGURA 3.3 – Relação entre o campo elétrico (a) e os quadros filmados pela câmera rápida (b) de um mesmo raio. O quadro (b-2) está com sua luminosidade ampliada em relação aos demais (a intensidade da luminosidade é muito inferior à produzida pelo líder escalonado, mostrado nos quadros seguintes), e nele tem início os pulsos de PB (conforme indicado, também, no gráfico de campo elétrico *versus* tempo).

### 3.3 Relação Entre o Tempo do Início dos Pulsos de Quebra de Rigidez até a Descarga de Retorno ( $T_{PB-RS}$ ) e o Pico de Campo Elétrico Desta ( $E_p$ )

Com o auxílio da descoberta exposta na seção anterior (3.2), analisamos a amostra descrita em 3.1 medindo o intervalo de tempo decorrido entre o início dos pulsos de PB até a ocorrência da descarga de retorno ( $T_{PB-RS}$ ) e a intensidade desta ( $E_p$ ). A FIGURA 3.4 mostra como realizamos estas medidas com o campo elétrico. Consideramos apenas casos em que houve uma concordância muito boa (ocorrência dentro do mesmo milissegundo) entre a observação do pulso de luz no vídeo da câmera rápida e o início dos pulsos no campo elétrico.

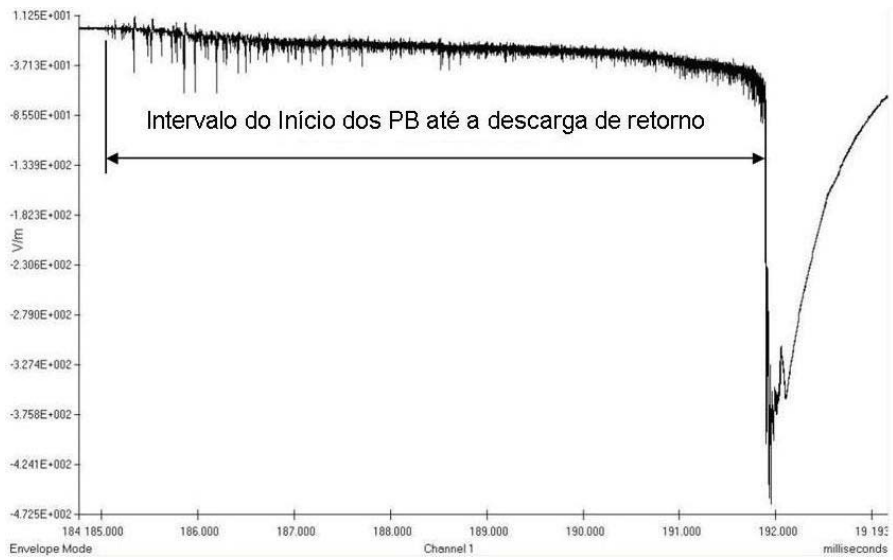
Para uniformizar as medidas de pico de campo elétrico consideramos a distância entre a torre de observação e o ponto em que o raio tocou o solo. Esta distância pode ser calculada considerando os dados da solução gerada pela RINDAT, possibilitando que normalizemos o valor do campo de um raio que caiu a uma distância  $D$  para uma outra distância padrão qualquer  $D_{std}$  através da seguinte relação:

$$E_{p_{std}} = \frac{E_p D}{D_{std}} \text{ (Eq. 1)}$$

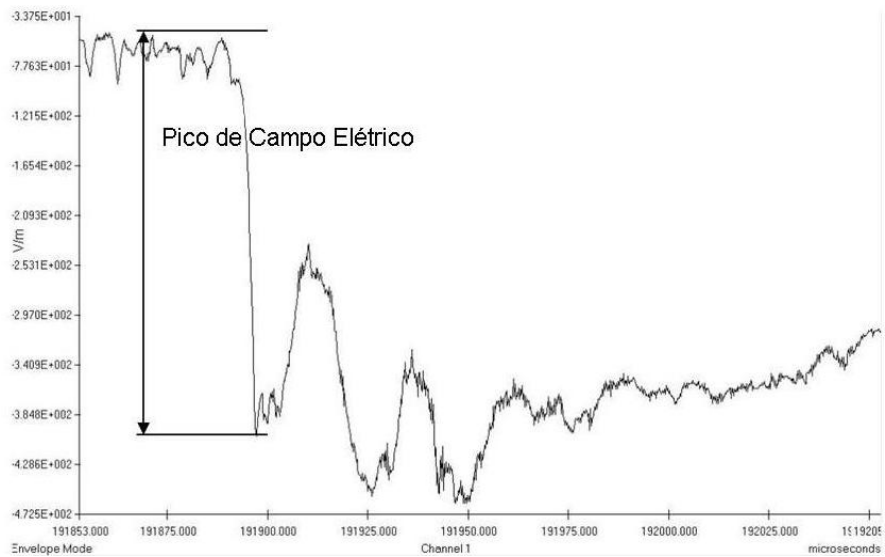
Onde o subscrito *std* indica que a grandeza está relacionada à distância padrão escolhida,  $E_p$  é o pico de campo elétrico medido na torre de observação (dado em V/m),  $D$  a distância dela até o ponto em que o raio atingiu o solo e  $D_{std}$  é a distância padrão escolhida. (as duas distâncias devem ser medidas na mesma unidade, no nosso caso em km). Desta forma,  $E_{p_{std}}$  será o valor do pico de campo elétrico na distância padrão escolhida dado também em V/m.

Neste estudo a distância padrão ( $D_{std}$ ) escolhida foi 100km tanto para descargas de retorno iniciais quanto para subseqüentes com formação de novo canal. Com as medidas de campo normalizadas, plotamos gráficos do inverso do pico de campo elétrico normalizado ( $1/E_{p_{std}}$ )

versus o intervalo de tempo entre o início dos PB até a descarga de retorno ( $T_{PB-RS}$ ) para os casos estudados, mostrados nas subseções seguintes.



(a)



(b)

FIGURA 3.4 – Exemplo de medida do intervalo entre o início dos PB até a descarga de retorno,  $T_{PB-RS}$  (a) e do pico de campo elétrico da descarga de retorno,  $1/E_p$  (b).

### 3.3.1 Descargas de Retorno Iniciais

O gráfico descrito em 3.3 é exibido na FIGURA 3.5 para descargas de retorno iniciais. A relação entre as grandezas apresenta boa concordância com uma função linear ( $R = 0,85$ ). Pode-se concluir que, em descargas de retorno iniciais, quanto maior o tempo entre os pulsos de PB e a descarga de retorno menor será a intensidade desta.

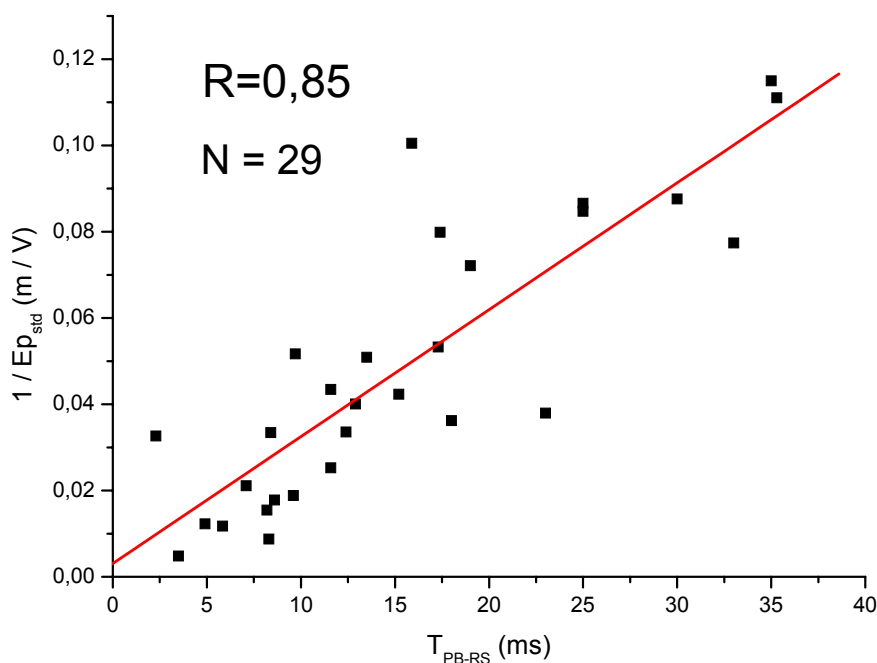


FIGURA 3.5 – Relação  $1/Ep$  versus  $T_{PB-RS}$  para descargas de retorno iniciais.

### 3.3.2 Descargas de Retorno Subseqüentes com Formação de Novo Canal

O gráfico descrito em 3.3 é exibido na FIGURA 3.6 para descargas de retorno subseqüentes em que houve a formação de um novo canal. O *range* de valores para o intervalo dos PB até a descarga de retorno é igual ao de descargas de retorno iniciais mas os picos de campo elétrico são, em média, inferiores.

Ao contrário da FIGURA 3.5 não observamos aqui uma relação linear entre as grandezas. Uma possível explicação para isso é o fato de que quase nunca um novo canal nem sempre é

completamente novo. Muitas vezes a descarga subsequente utiliza parte do canal anterior que se encontra ainda ionizada. Quanto maior a parcela de canal reutilizado menor será o tempo entre os pulsos de PB e a descarga de retorno. Isto acontece devido ao líder estar mais próximo do solo quando os pulsos PB começarem a acontecer. Devido à altura relativamente baixa das nuvens de tempestade que ocorrem na região do estudo não foi possível realizar uma estimativa confiável da parcela reutilizada e sua influência sobre a intensidade da descarga de retorno. Este estudo seria mais viável em climas secos onde a altura da base da nuvem é mais elevada. A FIGURA 3.7 mostra um exemplo de relâmpago bifurcado ocorrido em uma região com este clima.

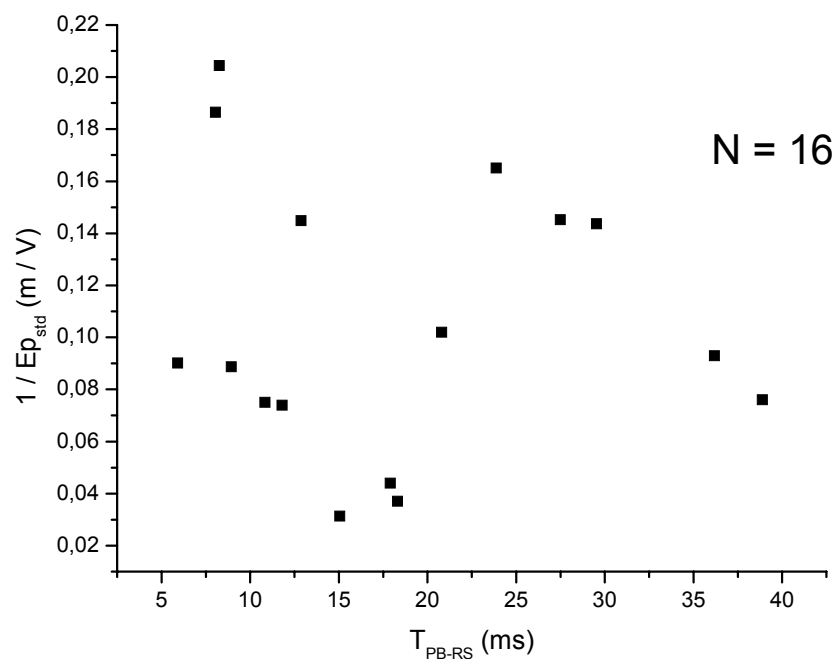


FIGURA 3.6 – Relação  $1/Ep$  versus  $T_{PB-RS}$  para descargas de retorno subsequente com formação de novo canal.





FIGURA 3.7 – Relâmpago ocorrido em um local de clima seco, sendo possível observar o ponto de bifurcação de seu canal. Um cenário deste tipo permitiria identificar, por exemplo, qual parcela do canal foi reutilizada em uma descarga de retorno subsequente.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os processos que dão origem aos relâmpagos ainda não são bem conhecidos e os resultados aqui apresentados são uma contribuição nesta área. É a primeira vez que se observam as emissões luminosas originadas pelas pequenas descargas na nuvem relacionadas aos PB, conhecimento que será de grande valia em estudos posteriores. O uso de uma câmera com resolução temporal superior permitirá um conhecimento ainda mais amplo como, por exemplo, observar em detalhes o desenvolvimento da luz emitida pelas descargas no interior da nuvem, suas características e influência sobre, por exemplo, o líder escalonado e o canal formado nos milissegundos seguintes.

A correlação entre a intensidade da descarga de retorno e o tempo entre o PB e sua ocorrência apresentou bons resultados que devem ser expandidos. Para as iniciais é importante ampliar o estudo para um número maior de dias com grande quantidade de relâmpagos observados, de tal forma a averiguar uma eventual existência, por exemplo, de curvas de correlação distintas para cada dia ou tempestade.

O conhecimento da relação  $T_{BP-RS}$  *versus*  $E_p$  poderia, no futuro, contribuir no desenvolvimento de um sistema de proteção que se prepara mais adequadamente para a intensidade da descarga que o atinge.

Já para as descargas subseqüentes com formação de novo canal estudos posteriores no Vale do Paraíba ficam comprometidos devido à altura média das nuvens de tempestade que dificulta a determinação de qual parcela do canal foi reutilizado e qual foi completamente desenvolvida durante a descarga em questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballarotti, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida**. 2005-02-21. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Ballarotti, M. G.; Saba, M. M. F.; Pinto Jr, O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, Vol. 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889, 2005.

Beasley, W. H.; Uman, M. A.; Rustan, P.L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 87, p. 4883-4902, 1982.

Gomes, C., Cooray, V., Jayaratne, C.; Comparison of preliminary breakdown pulses observed in Sweden and in Sri Lanka. **Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics**, Vol. 60, p. 975-979, 1998.

Kitagawa, N., Brook, M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 65, p. 1189-1201, 1960.

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**: Vol.67, p. 637-647, 1962.

Krider, E. P., Radda, G. J. Radiation field waveforms produced by lightning stepped-leaders. **Journal of Geophysical Research**. Vol 80, p. 2653-2657, 1975.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The Atmosphere**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Feb. 1982, 528 p.

Pinto Jr., O. The Brazilian lightning detection network: a historical background and future perspectives. In: VII SIPDA, 2003, Curitiba. **Proceedings**, 2003.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

Rakov, V. A.; Uman, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge, 2003.

Red Lake. **Instructions for Operating**. Manual no. 9400-0010. Revision S. San Diego: Feb., 2002. Disponível em: [http://www.redlake.com/Manuals/motion\\_scope\\_PCI\\_manual.pdf](http://www.redlake.com/Manuals/motion_scope_PCI_manual.pdf) (último acesso: 14/06/2006).

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

Saba, M. M. F.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr, O. Cloud-to-ground lightning properties in Brazil from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006.

Saba, M. M. F.; Pinto Jr., O.; Solórzano, N. N.; Eybert-Berard, A. Lightning current observation of an altitude-triggered flash. **Atmospheric Research**, v. 76, n. 1-4, p. 402-411, 2005.

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

Uman, M. A. **The lightning discharge**. Academic Press, 1987.

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

Wood, R. A. When lightning strikes! **Weatherwise**, Vol. 41, n. 4, p. 206-210, 1988.

## APÊNDICE A

### ATIVIDADES PARALELAS REALIZADAS NO PERÍODO DE BOLSA 2005/2006

#### A.1 Extensão do Projeto de Pesquisa Anterior (2005) e Publicação de Resultados

Ampliamos o estudo anterior apresentado no SICINPE 2005, *Estudo da corrente contínua de relâmpagos naturais através de uma câmera rápida*, de 14 para 63 casos, realizando também, paralelamente, as seguintes publicações:

- Campos, L. Z. S.; Saba, M. M. F.; Pinto Jr., O.; Ballarotti, M. G. Continuing current and M-components properties from high-speed video observations. In: American Geophysical Union Fall Meeting, 2005, San Francisco. **2005 AGU Fall Meeting – Program and Abstracts**. San Francisco: American Geophysical Union, 2005.
- Campos, L. Z. S.; Saba, M. M. F.; Pinto Jr., O.; Ballarotti, M. G. Continuing currents wave shapes and M-components properties of natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed observations. **Atmospheric Research**, submetido em maio de 2006.

#### A.2 Estimativas de Velocidade do Líder Escalonado

Utilizando dados obtidos com a câmera rápida nos verões de 2004 e 2005 realizamos um breve estudo de 30 casos determinando a velocidade com a qual o líder escalonado desce em direção ao solo. Seus resultados foram publicados em:

- Campos, L. Z. S.; Saba, M. M. F.; Fatini, A. C.; Schulz, W.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr., O. Preliminary breakdown and leader characteristics from electric field and high-speed video observations. In: European Geosciences Union General Assembly 2006, 2006, Viena. **Geophysical Research Abstracts**. Viena: European Geosciences Union, 2006. v. 8.

### **A.3 Publicação dos Resultados do Presente Trabalho**

Os resultados deste trabalho já foram submetidos e aceitos para publicação no congresso GROUND'2006 – International Conference on Grounding and Earthing & 2<sup>nd</sup> LPE – International Conference on Lightning Physics and Effects, a ser realizado em novembro de 2006 em Maceió. O trabalho já está automaticamente submetido para uma possível edição especial do Journal of Lightning Research centrada no congresso. Segue abaixo a referência:

- Campos, L. Z. S.; Saba, M. M. F.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr., O.; Schulz, W. Characteristics of preliminary breakdown for first strokes and subsequent new-channel strokes. In: GROUND'2006 – International Conference on Grounding and Earthing & 2<sup>nd</sup> LPE – International Conference on Lightning Physics and Effects, 2006, Maceió. **GROUND'2006 & 2<sup>nd</sup> LPE Conference Proceedings**. No prelo.