



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DOS LÍDERES DE RELÂMPAGOS NATURAIS

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 (ELAT/DGE/INPE, Orientador)
E-mail: msaba@dge.inpe.br

Julho de 2009

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características.....	2
1.3 Motivação e Justificativa.....	10
1.4 Objetivos do Trabalho.....	10
2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	11
2.1 Lista de Materiais Utilizados.....	11
2.2 Instrumentação Observacional.....	11
2.3 Locais de Observação.....	17
3 RESULTADOS.....	21
3.1 Líderes Negativos para o Solo.....	21
3.2 Líderes Positivos para o Solo.....	30
3.3 Líderes Horizontais.....	34
4 CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
ANEXO A – ARTIGO GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS (1)	
ANEXO B – ARTIGO GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS (2)	
ANEXO C – ARTIGO PARA O X INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION	
ANEXO D – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH	
ANEXO E – ARTIGO JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Foto de relâmpago ocorrido em São José dos Campos.....	2
Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.	6
Fonte: modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).	6
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).	8
Fonte: Uman (1984, p. 15).	8
Figura 2.1 – Fotografia da câmara 8000S MotionScope com sua placa de interface com o PC.	12
Fonte: Red Lake (2002).	12
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).	14
Fonte: adaptada de Red Lake (2002, p. 1-2).	14
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.	15
Fonte (a): Red Lake (2002, p. 1-2).	15
Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmara.	15
Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).	16
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).	16
Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel utilizado na campanha brasileira.	17
Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre.	18
Figura 2.9 – Módulo móvel da FASTCAM 512 PCI 2k utilizado durante a campanha no verão norte-americano em Tucson, Arizona.	19
Figura 3.1 – Histogramas de velocidades (a) parcial e (b) média dos 62 líderes escalonados estudados.	22
Figura 3.2 – Histogramas comparativos das velocidades parciais dos líderes escalonados obtidas acima (superior) e abaixo (inferior) de 500 m do solo.	24
Figura 3.3 – Histogramas de velocidade (a) parcial e (b) média obtidos para os 76 líderes contínuos estudados.	25
Figura 3.4 – Seqüência de quadros selecionados do desenvolvimento do Caso 1. SL representa a fase escalonada, DS a fase contínua e RS a descarga de retorno. Os quadros identificados como SL tiveram seu contraste alterado de forma a facilitar a visualização da ponta do líder em cada fase escalonada.	28

Figura 3.5 – Evolução temporal da velocidade (acima) e luminosidade (abaixo) do Caso 1. O tempo $t = 0$ foi tomado no instante do primeiro quadro em que o líder é visível e a descarga de retorno ocorre em $t = 13,75$ ms. SL indica as fases escalonadas e DS indica as fases contínuas. Ver Tabela 3.4 para maiores detalhes.....	28
Figura 3.6 – Histograma das velocidades parciais da fase escalonada dos quatro líderes tipo β_2 estudados.	29
Figura 3.7 – Histograma das velocidades parciais da fase contínua dos quatro líderes tipo β_2 estudados.	30
Figura 3.8 – Histograma das velocidades (a) parcial e (b) média dos 22 líderes positivos analisados.....	31
Figura 3.8 – Aumento da velocidade dos líderes positivos conforme eles se aproximam do solo.	32
Figura 3.8 – (a) fotografia convencional de um relâmpago nuvem-solo positivo; (b) e (c) ilustram um líder de recuo se propagando por um trecho de canal previamente ionizado pelo líder positivo; (d) a (f) demonstram que os líderes de recuo se propagam em direção ao ponto de origem do relâmpago; e (g) é a integração temporal dos vários quadros registrados durante a propagação do líder positivo, antes da ocorrência da descarga de retorno, demonstrando como os líderes de recuo revelam a grande quantidade de ramificações produzidas.	33

1 INTRODUÇÃO

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, 2005; Ballarotti et al., 2005; Campos et al., 2007a, 2007b, 2009; Saba et al., 2006a, 2006b, 2008).

1.2 Definição, Tipos de Relâmpago 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 - Foto de 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 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 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.

1.2.1 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** (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);

Estas sucessivas **descargas subsequentes**, 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. 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, 2006a).

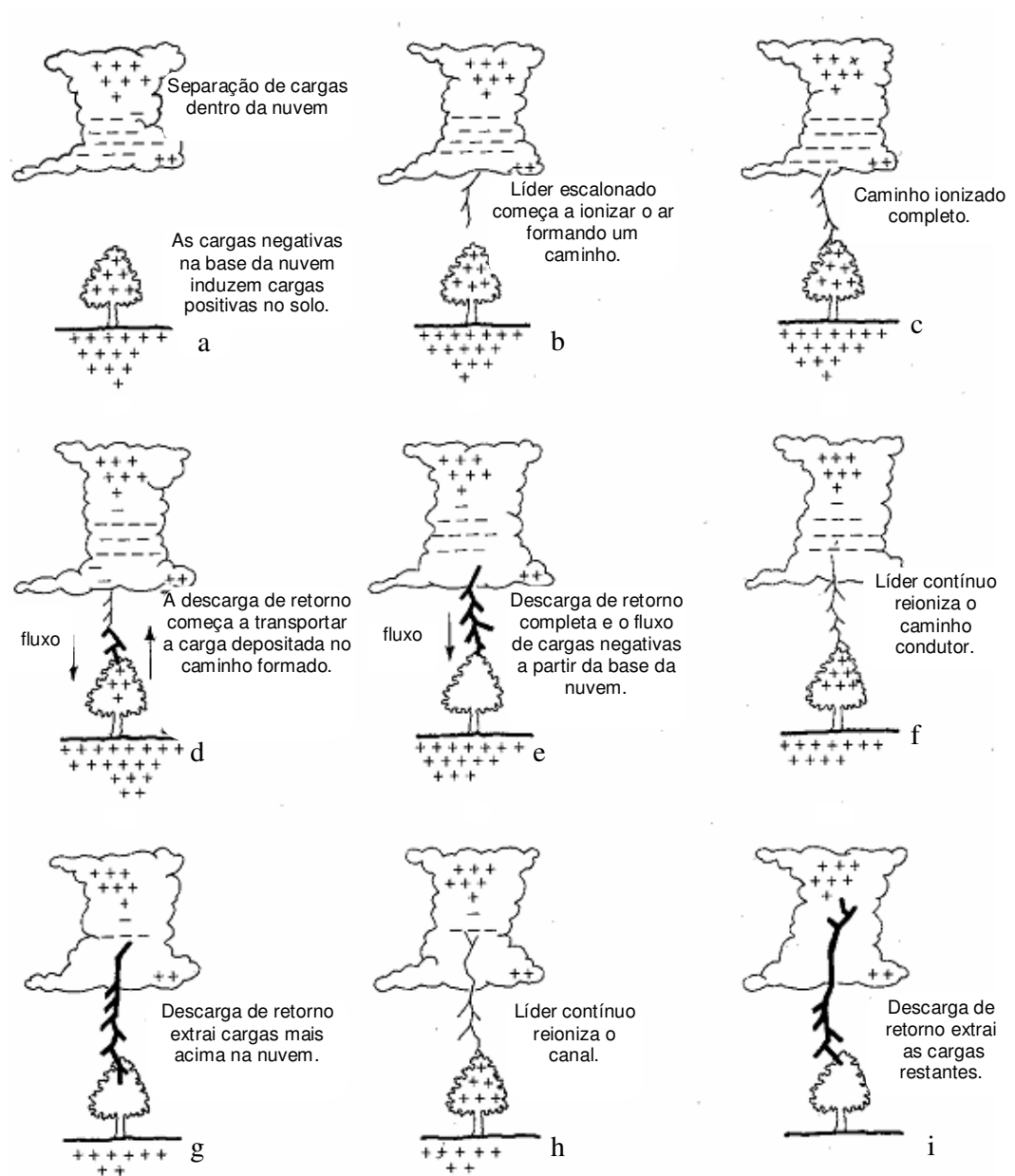


Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).

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, 1984). Cerca de 70% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de corrente contínua (Saba et al, 2006a).

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.

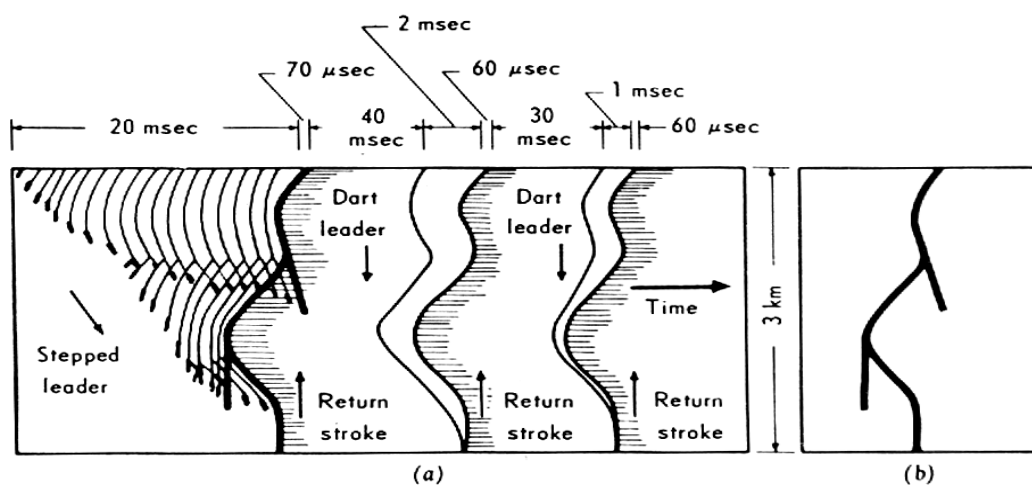


Figura 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera 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, 2006a), sendo estes indicados por um asterisco.

CARACTERÍSTICA	ETAPA	VALOR TÍPICO
Líder Escalonado		
Comprimento dos passos		50 m
Intervalo de tempo entre passos		20 - 50 μ s
Velocidade média de propagação		$2 \cdot 10^5$ m/s
Corrente		100 A
Duração total		35 ms
Descarga de Retorno		
Velocidade de propagação		$(1-2) \cdot 10^8$ m/s

Pico de corrente	30 kA
Comprimento do canal	5 km
Duração	70 μ s

Líder Contínuo

Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^7$ m/s
Corrente	1 kA
Duração total	1 – 2 ms

Descarga Subseqüente

Corrente	10 – 15 kA
Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^8$ m/s

Corrente Contínua

Duração	100 ms
Porcentagem de Descargas de Retorno com corrente contínua	73% *

Características Gerais de um Relâmpago

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 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 Motivação e Justificativa

Conforme comentado na seção 1.1 Histórico, desde 2003 uma série de estudos utilizando câmera rápida (com velocidades variando entre 1000 e 8000 quadros por segundo) vem sendo realizados pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica - ELAT/INPE para a obtenção de diversos parâmetros relacionados aos relâmpagos nuvem-solo observados na região de São José dos Campos, SP, Brasil (Saba et al., 2006a, 2006b; Campos et al., 2007a, 2007b, 2009).

Existem poucos trabalhos na literatura que apresentam observações de líderes de relâmpagos naturais a partir de câmeras de alta resolução, sendo todos focados apenas em um número pequeno de casos (e.g., Mazur et al., 1998). Nenhum deles apresenta histogramas que mostram a distribuição de velocidades para uma grande base de dados. Como este é um importante parâmetro para modelos e simulações dos processos físicos de formação do relâmpago, muitas vezes com aplicações em proteção (e.g., Lalande et al., 2002), uma contribuição para o aumento do nível em que ele é conhecido possui bastante relevância para as pesquisas em eletricidade atmosférica.

1.4 Objetivos do Trabalho

Este trabalho visa obter e analisar registros ópticos dos vários tipos de líderes de relâmpagos (negativos para o solo, positivos para o solo e horizontais de ambas polaridades), bem como de seus subtipos, de tal forma a:

- Fazer uma descrição fenomenológica de cada um deles; e
- Estimar suas velocidades de propagação, obtendo dados estatísticos para este parâmetro e analisando sua dependência com outras características do relâmpago.

2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

2.1 Lista de Materiais Utilizados

- Câmeras rápidas *MotionScope 8000S PCI*, fabricada pela Red Lake; e *FASTCAM 512 PCI 2k*, fabricada pela Photron;
- Microcomputador com os softwares *MiDAS Player*, *Photron Motion Tools* (ambos para visualização dos vídeos obtidos com as câmeras rápidas), *Microsoft Excel* (para organização de dados e cálculos matemáticos), e *OriginPro 8.0* (para plotagem de gráficos).

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). 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 foram utilizadas duas câmeras de alta resolução temporal com sincronização GPS. Uma foi configurada de tal forma a gerar filmes com 1000 fps e a outra entre 4000 e 8000 fps (maiores detalhes nas próximas sessões), o que possibilita uma análise bastante detalhada do raio e o acompanhamento de sua corrente contínua de forma bastante eficiente.

2.2.1 Câmera Rápida *MotionScope 8000S*

Utilizamos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (ou câmera rápida HS-1, forma abreviada utilizada neste trabalho, ou ainda *High Speed Digital Imaging System*, nomenclatura usada pelo fabricante) “*MotionScope 8000S 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.

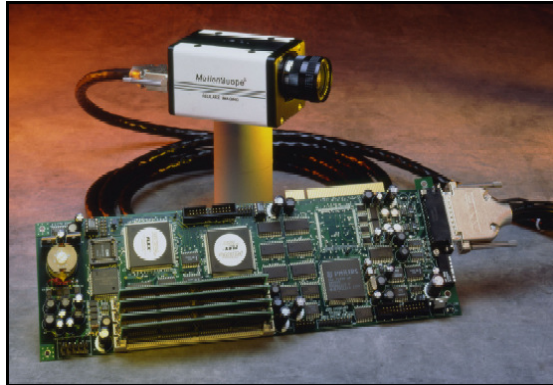


Figura 2.1 – Fotografia da câmera 8000S MotionScope com sua placa de *interface* com o PC.

Fonte: 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 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 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.

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 Figura 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

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

com as 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.

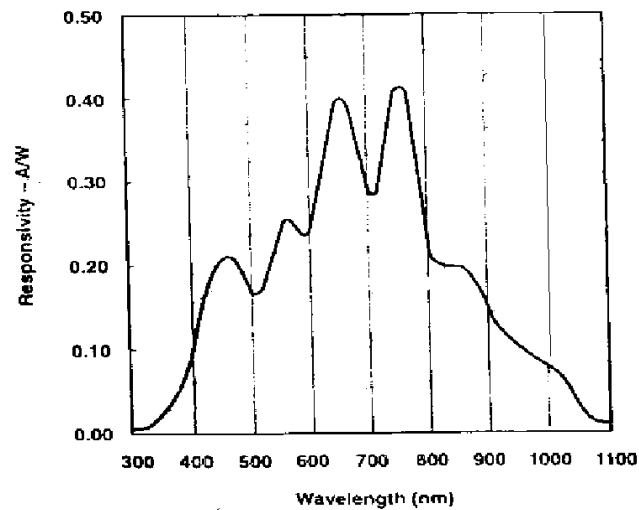


Figura 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

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

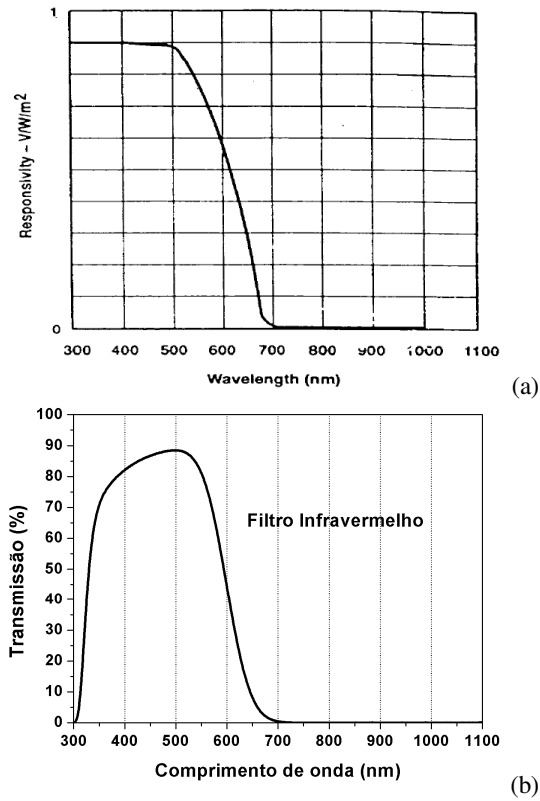


Figura 2.3 – Curvas Características da (a) Respositividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o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

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

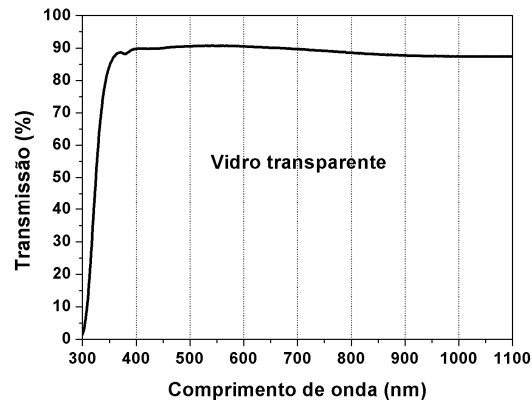


Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

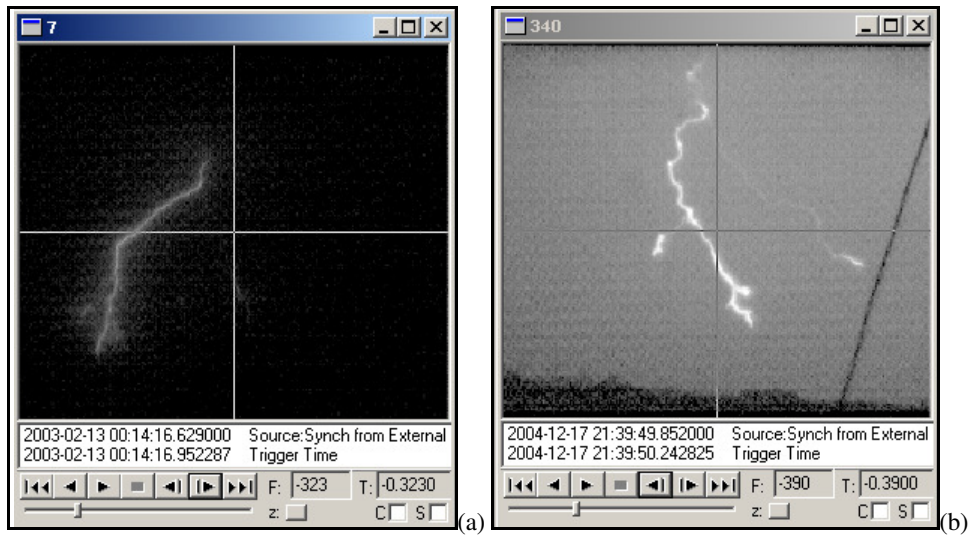


Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).

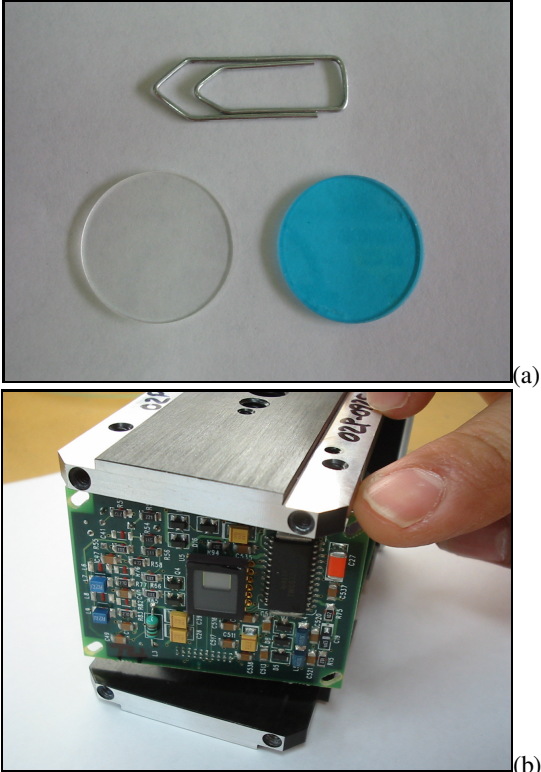


Figura 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

2.2.2 Câmera Rápida FASTCAM 512 PCI 2k

Utilizamos também a câmera rápida “FASTCAM 512 PCI 2k” (doravante abreviada como HS-2), do fabricante *Photron*. Sua taxa de gravação de imagens é superior à da câmera HS-1, indo de 50 a 32.000 quadros por segundo. Para este trabalho utilizamos, dependendo da abertura vertical que o cenário exigiu, sempre 4.000 (para uma abertura maior) ou 8.000 (para uma abertura menor) quadros por segundo. Seu funcionamento é praticamente idêntico ao da HS-1, realizando gravações com o método da fila circular (salvando 1 s antes e 1 s depois do *trigger* ser ativado) e sincronizando seus vídeos com tempo GPS.

A Figura 2.7 mostra a HS-2 montada no módulo móvel que utilizamos durante a coleta de dados no Brasil.



Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel utilizado na campanha brasileira.

2.3 Locais de Observação

2.3.1 Torre de Antenas do IAE/AEL – São José dos Campos, SP, Brasil

O primeiro local de observação, no município de São José dos Campos, SP, é a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Com cerca de 20 m de altura e localizada em relevo propício, a torre permite a realização de observações ao longo de quase todos os seus arredores (exceto

em um pequeno trecho ocupado por uma floresta de eucaliptos). Para a campanha dos verões de 2006/2007 e 2007/2008, criamos uma “teia” ao redor da torre no software NetRaios (desenvolvido pelo ELAT, exibe dados da BrasilDAT, Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas, em tempo real), onde marcamos pontos facilmente identificáveis visualmente ao longo do campo acessível por ela. A Figura 2.8 mostra uma fotografia da torre (a) e a “teia” com alguns relâmpagos ocorridos na região de São José dos Campos (b).

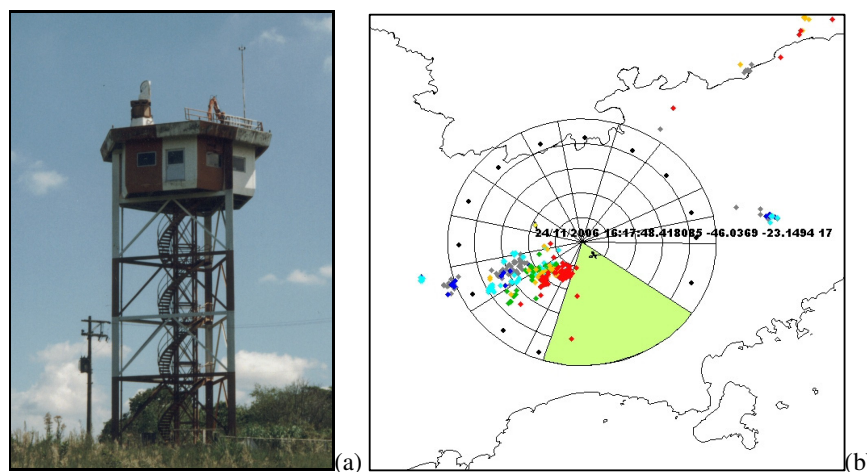


Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre.

2.3.2 Physics-Atmospheric Sciences Building – Tucson, Arizona, EUA

O segundo local de observação utilizado foi o Physics-Atmospheric Sciences Building do campus da University of Arizona, localizada na cidade de Tucson no estado do Arizona, EUA. Durante o período de 15 de julho a 20 de agosto de 2007, no verão norte-americano, o bolsista participou de uma campanha de coleta de dados do INPE em cooperação com professores e alunos do Institute of Atmospheric Physics inserido na University of Arizona. A câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k permaneceu montada em um módulo móvel (mostrado na Figura 2.9) no local de observação, permitindo a mudança de visada conforme a evolução da tempestade. Já a *MotionScope* 8000S encontrou-se transitando entre diferentes pontos de observação na cidade, conforme o posicionamento das nuvens de tempestade. Graças ao relevo extremamente plano da cidade e seus arredores foi possível obter uma boa visibilidade para ambas as câmeras.

A área possui uma excelente cobertura da rede de detecção de descargas atmosféricas dos EUA, NLDN (National Lightning Detection Network™), com eficiência de detecção de 93% para descargas de retorno individuais e 68% para relâmpagos (Biagi et al., 2007). Dados em tempo real fornecidos pela NLDN auxiliaram o apontamento e posicionamento de ambas as câmeras, ampliando consideravelmente a eficiência das observações.



Figura 2.9 – Módulo móvel da FASTCAM 512 PCI 2k utilizado durante a campanha no verão norte-americano em Tucson, Arizona.

3 RESULTADOS

O ELAT possui um banco de dados com mais de 1500 relâmpagos nuvem-solo negativos e 80 relâmpagos nuvem-solo positivos registrados com pelo menos uma das duas câmeras rápidas utilizadas neste trabalho. Em muitos destes eventos foi possível observar, graças à alta resolução temporal alcançada, detalhes da propagação dos líderes responsáveis por ionizar o canal de várias descargas de retorno registradas. A base de dados descrita e utilizada neste trabalho é composta por 62 líderes escalonados, 76 líderes contínuos, 4 líderes tipo β_2 , 21 líderes positivos e 2 líderes horizontais. Cada um deles é descrito em detalhes nas sessões seguintes.

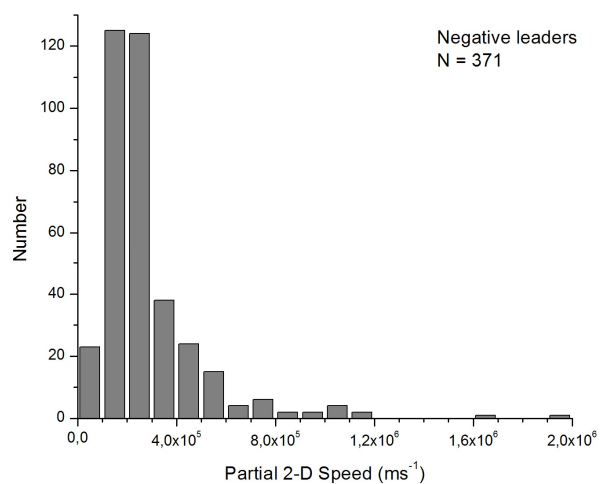
Neste trabalho utilizamos a terminologia definida por Saba et al. (2008) para a definição dos tipos de velocidade bidimensionais (2-D) utilizados neste trabalho: *velocidade parcial* é a descrita pelo líder ao longo de sua propagação, conforme ele se aproxima do solo (ou de um centro de carga na nuvem, no caso dos horizontais), enquanto *velocidade média*, assim como a definição usual em livros-texto de Física Básica, é obtida dividindo-se o comprimento total do canal pelo tempo gasto pelo líder para cobri-lo.

3.1 Líderes Negativos para o Solo

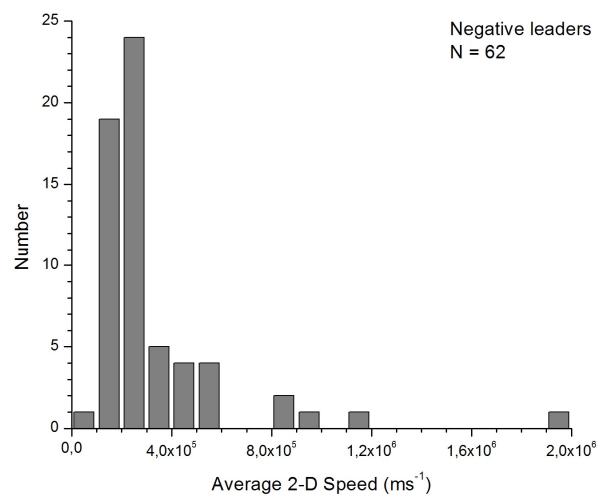
3.1.1 Líderes Escalonados

Selecionamos 62 líderes escalonados que tiveram sua propagação em direção ao solo registrada ao longo de mais de dois quadros por pelo menos uma das câmeras permitindo, assim, a estimativa de pelo menos uma velocidade parcial. Este conjunto de líderes nos forneceu 371 medidas de velocidade parcial, que foram obtidas e associadas à altura da ponta do líder naquele instante.

A Figura 3.1 exibe histogramas que mostra a distribuição de velocidades (a) parciais e (b) médias e a Tabela 3.1 mostra um sumário dos resultados estatísticos do conjunto de dados composto pelos 62 líderes escalonados estudados.



(a)



(b)

Figura 3.1 – Histogramas de velocidades (a) parcial e (b) média dos 62 líderes escalonados estudados.

Tabela 3.1 – Sumário de parâmetros estatísticos obtidos para os 62 líderes escalonados estudados.

Líderes Escalonados	Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)					
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Parcial	371	0,26	19,8	2,80	2,17	2,30
Média	62	0,90	19,8	3,30	2,24	2,68

Todos os resultados obtidos se encontram dentro da faixa de valores encontrados na literatura (Rakov e Uman, 2003). Para cada medida parcial de velocidade foi possível associar a altura em que se encontrava a ponta do líder relação ao solo. Várias análises foram feitas para verificar se há alguma relação entre os dois parâmetros. Não foi encontrada nenhuma tendência bem definida ao se analisar a progressão de cada um dos 62 líderes individualmente (e.g., aumento contínuo da velocidade conforme o líder se aproxima do solo, comportamento observado para líderes positivos, conforme será descrito na sessão 3.2, abaixo). Quando o conjunto de 371 medidas parciais foi dividido em dois grupos, um para as obtidas acima e outro para as obtidas abaixo de 500 m do solo, não existe qualquer diferença estatística apreciável entre eles, conforme ilustrado na Figura 3.2 e mostrado na Tabela 3.2. Pode-se, assim, afirmar que os líderes escalonados negativos não apresentam qualquer aceleração conforme se aproximam do solo, comportamento oposto ao observado para os líderes positivos (descritos na sessão 3.2, abaixo).

Tabela 3.2 – Comparação dos parâmetros estatísticos para as velocidades parciais de líderes escalonados obtidas acima e abaixo de 500 m do solo.

Líderes Escalonados	Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)					
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Acima de 500 m	302	0,26	19,8	2,82	2,17	2,29
Abaixo de 500 m	69	0,97	16,9	2,69	2,18	2,37

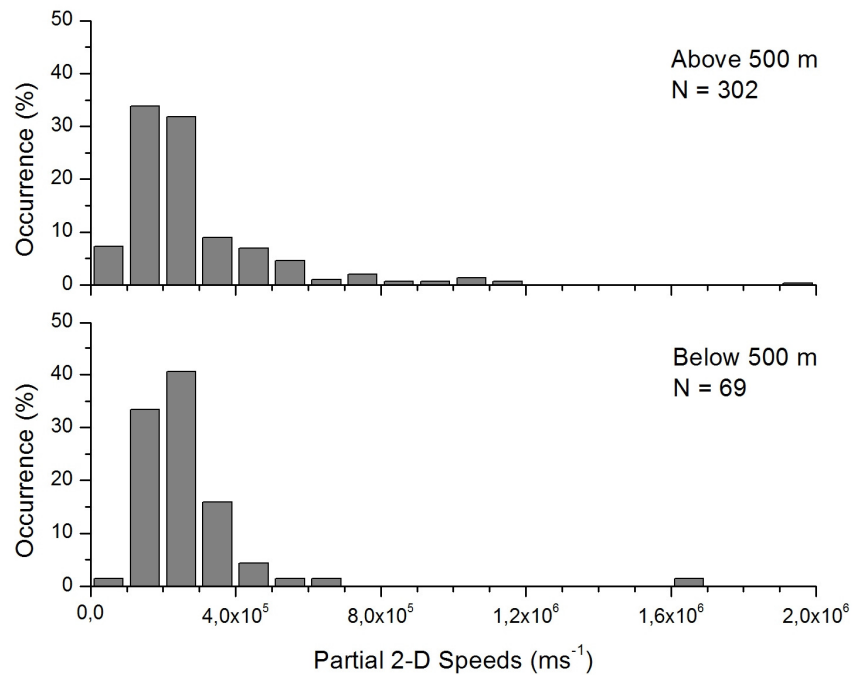
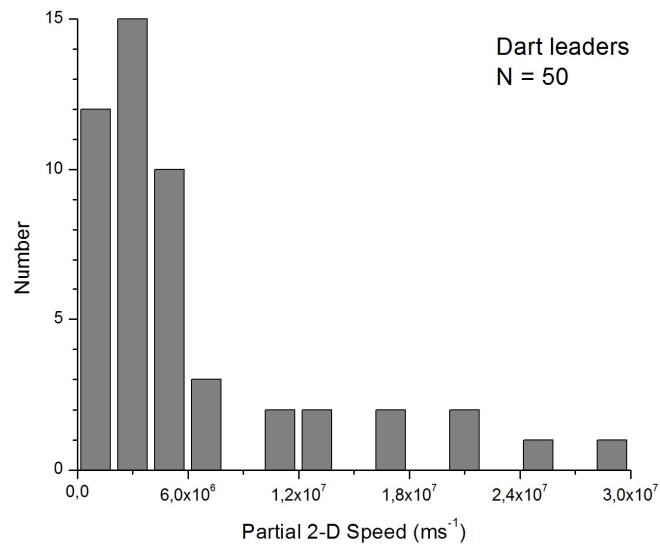


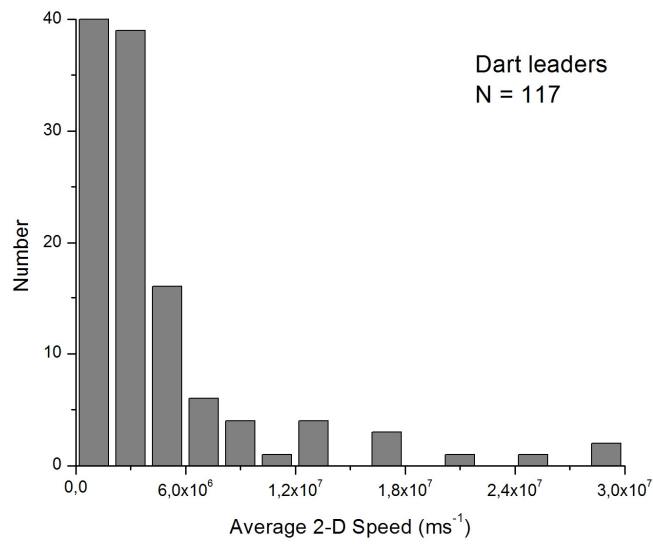
Figura 3.2 – Histogramas comparativos das velocidades parciais dos líderes escalonados obtidas acima (superior) e abaixo (inferior) de 500 m do solo.

3.1.2 Líderes Contínuos

Foram obtidos 76 casos de líderes contínuos cuja velocidade de propagação pôde ser observada, e destes eventos obtivemos 207 medidas parciais de velocidade. A Tabela 3.3 traz um sumário dos parâmetros estatísticos encontrados e a Figura 3.3 ilustra os histogramas das velocidades obtidas para a amostra estudada. Em muitos eventos a velocidade das câmeras utilizadas não foi suficiente para estimar a velocidade de propagação do líder, o que torna necessário ressaltar que os resultados aqui apresentados representam o limite inferior de velocidades possíveis de ser desenvolvidas por líderes contínuos. Apesar desta limitação, ao comparar este estudo com diversos trabalhos presentes na literatura, que apresenta valores entre $5,5 \times 10^6$ e 19×10^6 ms⁻¹ (Rakov e Uman, 2003), notamos que 2% de nossa amostra se encontra acima do limite superior reportado anteriormente.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Histogramas de velocidade (a) parcial e (b) média obtidos para os 76 líderes contínuos estudados.

Tabela 3.3 – Comparação dos parâmetros estatísticos para as velocidades parciais de líderes escalonados obtidas acima e abaixo de 500 m do solo.

Líderes Contínuos		Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)				
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Parcial	207	1,91	295	32,3	18,0	19,5
Média	76	3,33	295	46,1	28,5	27,6

3.1.3 Líderes Tipo β_2

Durante a campanha de coleta de dados em Tucson, Arizona, EUA, em julho/agosto de 2007, nós observamos quatro casos de líderes negativos que se encaixam na descrição do tipo β_2 descrito por Schonland et al. (1938). Este tipo de líder aparenta ser bastante raro por ter tido sua ocorrência reportada apenas no trabalho que o descreveu pela primeira vez. Segundo a descrição feita por Schonland et al. (1938), ele é caracterizado por, inicialmente, ter uma propagação idêntica a de um líder escalonado normal (período por nós denominado como “fase escalonada”). Porém, em alguns momentos sua propagação é interrompida e um líder contínuo muito veloz parte da nuvem e alcança a ponta do canal já ionizado pelo líder (período que denominamos “fase contínua”). Após cada fase contínua uma nova fase escalonada tem início até que o líder toca o solo e a descarga de retorno ocorre. Apresentamos abaixo o estudo detalhado de um dos casos e na sessão 3.1.3.2 descrevemos os parâmetros gerais obtidos a partir da análise de todos os quatro eventos.

3.1.3.1 Estudo de caso: descarga de retorno inicial com líder tipo β_2 (Caso 1)

O Caso 1 ocorreu no dia 25 de julho de 2007 às 20h37min53s (UT). Ele apresentou 8 descargas de retorno, todas elas utilizando o mesmo canal. A descarga de retorno inicial

foi detectada pela NLDN (com pico de corrente estimado $I_p = -13$ kA, e tendo atingido o solo a uma distância $D = 12,3$ km) e foi iniciada por um líder tipo β_2 . O tempo médio entre descargas de retorno para este relâmpago foi de 47 ms.

Este caso apresentou duas fases contínuas e o líder apresentou um descréscimo de velocidade após cada uma delas. A Figura 3.4 mostra uma seqüência de quadros selecionados ilustrando cada uma das fases do Caso 1. Uma descrição detalhada de cada fase deste líder (correlacionando tempo, altura e velocidade) pode ser encontrada na Tabela 3.4, enquanto a Figura 3.5 correlaciona a variação temporal de velocidade e luminosidade conforme o líder propaga em direção ao solo. O gráfico de luminosidade *versus* tempo foi obtido através da análise dos valores dos pixels de cada quadro do vídeo em que o líder foi registrado utilizando-se o mesmo algoritmo computacional desenvolvido para o projeto de pesquisa do período 2005/2006 de bolsa PIBIC (publicado em Campos et al., 2007b, 2009).

Tabela 3.4 – Velocidade (para cada fase) e altura da ponta do líder (em relação ao solo) para o Caso 1. O tempo $t = 0$ foi definido como o instante do primeiro quadro em que o líder se tornou visível dentro do campo de visada da câmera. A primeira fase contínua pôde ter apenas sua velocidade mínima estimada (conforme indicado).

Tempo (ms)	Fase	Altura (m)	Velocidade ($\times 10^5$ ms⁻¹)
0 – 3,25	Escalonada	3580 – 2230	7,10
3,25 – 3,50	Contínua (1)	1690	92,3 (<i>min.</i>)
3,75 – 6,00	Escalonada	1630 – 1410	1,72
6,00 – 6,25	Contínua (2)	1260	116
6,25 – 11,00	Escalonada	1240 – 570	1,67
13,75	<i>Descarga de Retorno</i>		

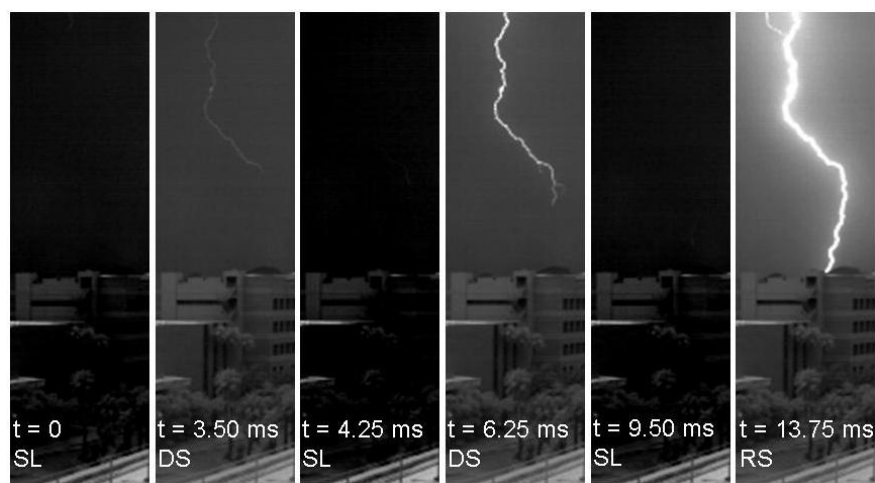


Figura 3.4 – Sequência de quadros selecionados do desenvolvimento do Caso 1. SL representa a fase escalonada, DS a fase contínua e RS a descarga de retorno. Os quadros identificados como SL tiveram seu contraste alterado de forma a facilitar a visualização da ponta do líder em cada fase escalonada.

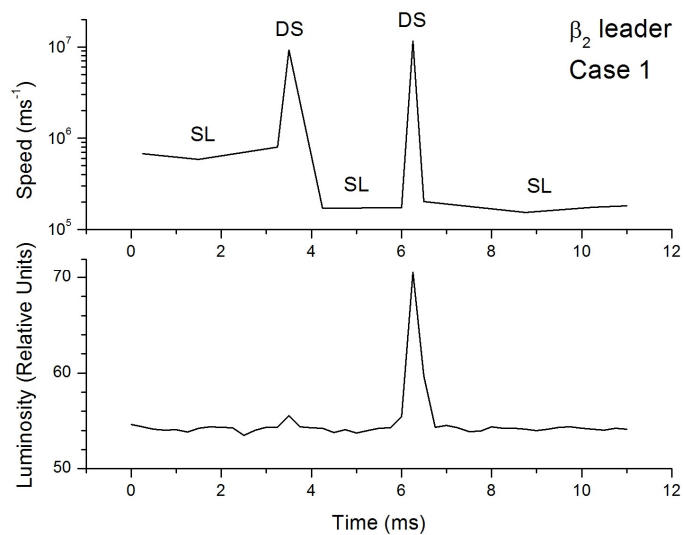


Figura 3.5 – Evolução temporal da velocidade (acima) e luminosidade (abaixo) do Caso 1. O tempo $t = 0$ foi tomado no instante do primeiro quadro em que o líder é visível e a descarga de retorno ocorre em $t = 13,75$ ms. SL indica as fases escalonadas e DS indica as fases contínuas. Ver Tabela 3.4 para maiores detalhes.

3.1.3.2 Características Gerais dos Líderes β_2

Para obter as características gerais de cada um dos quatro líderes tipo β_2 estudados nós organizamos os parâmetros estatísticos e os histogramas das medidas obtidas na Tabela 3.5 e Figura 3.6 (para a fase escalonada), e na Tabela 3.6 e Figura 3.7 (para a fase contínua). Se compararmos os dados obtidos para a fase escalonada com os dados já apresentados para os líderes escalonados comuns (Figura 3.1 e Tabela 3.1), podemos notar que, apesar de apresentarem uma tendência a ser um pouco mais lentos, as velocidades desenvolvidas pelos líderes β_2 encontram-se dentro da faixa esperada para um líder escalonado. Da mesma forma, a fase contínua, se comparada aos líderes contínuos comuns (Figura 3.3 e Tabela 3.3), se encaixam da mesma forma nas faixas de velocidades esperadas, apesar de, em média, ser mais veloz.

Tabela 3.5 – Sumário dos resultados das medidas de velocidade da fase escalonada dos quatro líderes β_2 estudados.

β_2 – Fase Escalonada		Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)				
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Parcial	21	0,22	9,00	2,78	1,73	2,19
Média	4	0,31	5,95	2,79	2,46	1,74

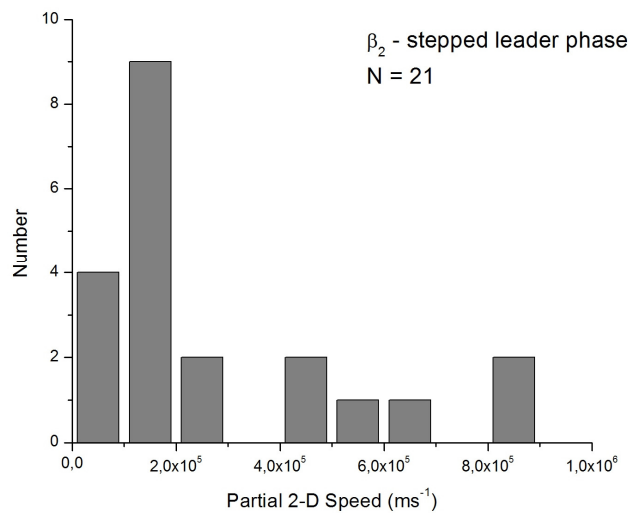


Figura 3.6 – Histograma das velocidades parciais da fase escalonada dos quatro líderes tipo β_2 estudados.

Tabela 3.6 – Sumário dos resultados das medidas de velocidade da fase contínua dos quatro líderes β_2 estudados.

β_2 – Fase Contínua		Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)				
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Parcial	10	17.3	116	60.1	60.4	48.6
Médiae	9	18.3	116	61.4	47.9	51.6

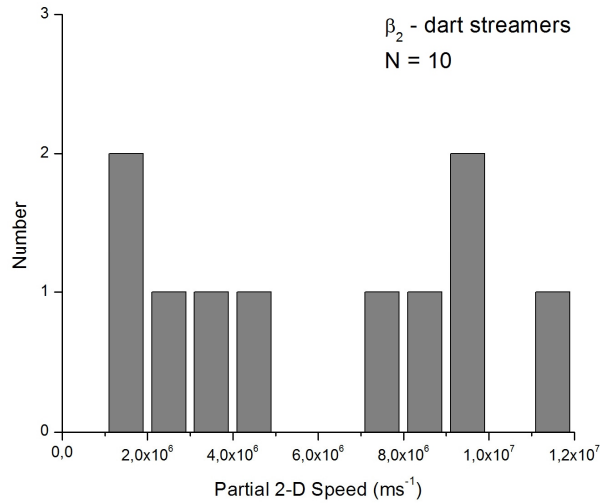


Figura 3.7 – Histograma das velocidades parciais da fase contínua dos quatro líderes tipo β_2 estudados.

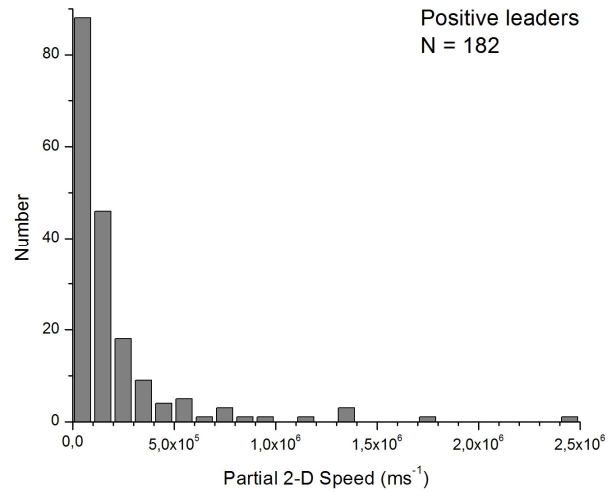
3.2 Líderes Positivos para o Solo

Análises detalhadas de líderes de relâmpagos positivos foram feitas a partir dos dados obtidos em Tucson e somadas a observações realizadas no Brasil e em Rapid City, South Dakota, EUA (dados cedidos através da cooperação com ZT Research), possibilitou a obtenção de resultados até então inéditos na literatura. Berger e Vogelsanger, 1966, apresentaram apenas uma estimativa de velocidade de líder positivo ($1,2 \times 10^6 \text{ ms}^{-1}$); e, mais recentemente, nós publicamos resultados iniciais para 9 líderes em Saba et al., 2008 (ver Anexo A). A base de dados já foi ampliada em relação à primeira publicação, e apresentamos aqui dados estatísticos de velocidades de 21 líderes

observados (com 179 medidas parciais), resultando em uma distribuição de velocidades entre $0,20$ e $13,7 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$ (média de $1,84 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$). A Tabela 3.7 apresenta um sumário destes resultados e a Figura 3.8 exibe o histograma de velocidade para os 21 líderes positivos observados juntamente com o caso apresentado por Berger e Vogelsanger, 1966.

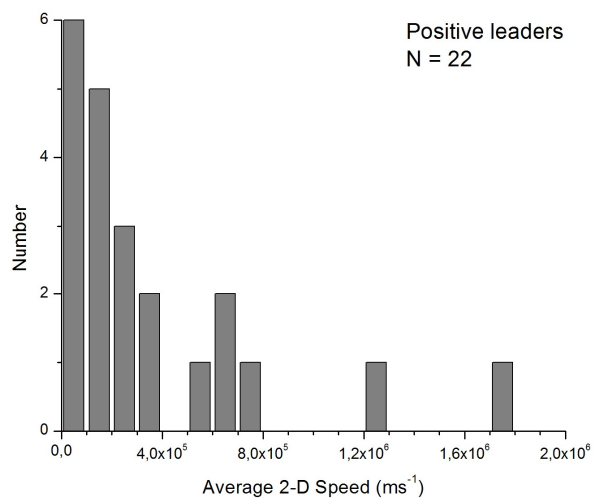
Tabela 3.7 – Sumário dos resultados das medidas de velocidade da fase contínua dos quatro líderes β_2 estudados.

Líderes Positivos	Velocidades 2-D ($\times 10^5 \text{ ms}^{-1}$)					
	Amostra	Min.	Max.	Média	Mediana	Média Geométrica
Partial	182	0,20	24,0	2,05	1,08	1,16
Average	22	0,30	17,3	3,64	1,97	2,03



(a)

Figura 3.8 – Histograma das velocidades (a) parcial e (b) média dos 22 líderes positivos analisados.



(b)

Figura 3.8 (continuação)

Conforme descrito em Saba et al. (2008), foi possível observar que, ao contrário dos líderes negativos (ver sessão 3.1.1), os líderes positivos apresentam um aumento em suas velocidades conforme se aproximam do solo. Este aumento ocorre em fatores que variam de 1.1 a 6.5 e são observados quando cada líder é analisado individualmente. A Figura 3.9 ilustra este comportamento em 8 casos selecionados.

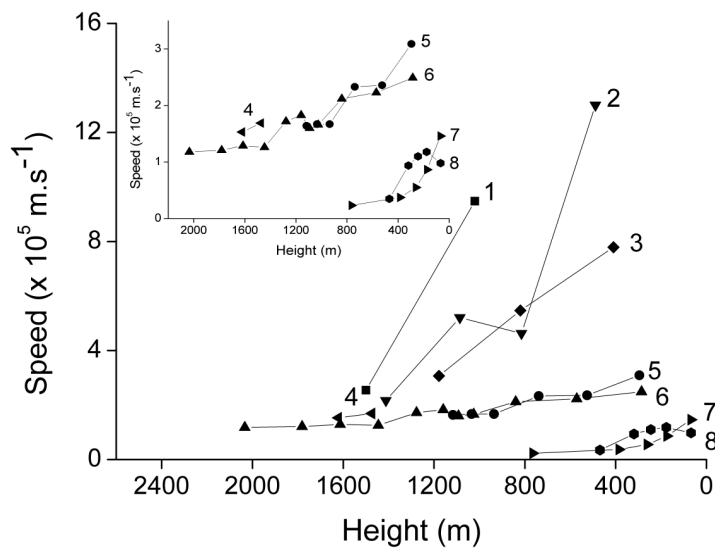


Figura 3.8 – Aumento da velocidade dos líderes positivos conforme eles se aproximam do solo.

Esta assimetria observada na propagação dos líderes positivos em relação aos negativos é uma evidência das diferenças entre os mecanismos físicos envolvidos na propagação de cada tipo de líder (Gallimberti et al, 2002; Lalande et al., 2002)

A observação óptica dos líderes positivos com a câmera mais veloz (4000 quadros por segundo) nos permitiu identificar a ocorrência de um fenômeno conhecido como “líder de recuo”, até então identificado apenas em estudos baseados em medidas de VHF (Mazur, 2002). Foi possível constatar que os líderes de recuo se propagam através de trechos de canal previamente ionizados pelo líder positivo (Figura 3.9b,c) e em direção ao ponto de origem da descarga (Figura 3.9d,e,f) ainda durante a formação do canal do relâmpago. Eles possuem uma grande velocidade (da ordem de 10^7 ms^{-1}) e emitem uma luminosidade bastante intensa, mas duram um tempo extremamente curto (em sua maioria inferior ao tempo de exposição da câmera, $250 \mu\text{s}$). Os líderes de recuo também tornaram possível a constatação de que, ao contrário do que se acreditava, os relâmpagos positivos possuem um grande número de ramificações (Figura 3.9g). Este fato não havia sido observado através de registros fotográficos (e.g., Figura 3.9a), porém, quando os quadros obtidos do processo de propagação do líder são integrados no tempo (Figura 3.9g), estruturas bastante complexas e ramificadas são reveladas.

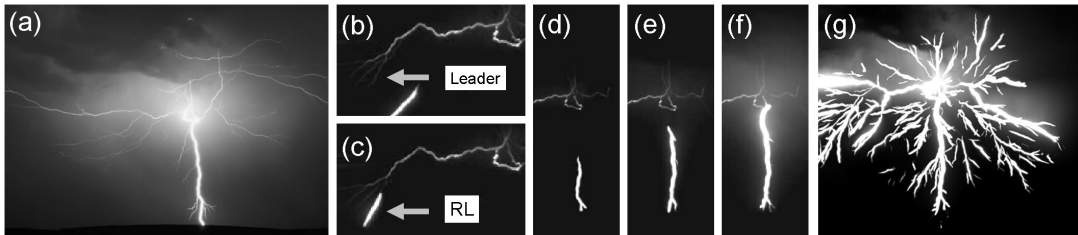


Figura 3.8 – (a) fotografia convencional de um relâmpago nuvem-solo positivo; (b) e (c) ilustram um líder de recuo se propagando por um trecho de canal previamente ionizado pelo líder positivo; (d) a (f) demonstram que os líderes de recuo se propagam em direção ao ponto de origem do relâmpago; e (g) é a integração temporal dos vários quadros registrados durante a propagação do líder positivo, antes da ocorrência da descarga de retorno, demonstrando como os líderes de recuo revelam a grande quantidade de ramificações produzidas.

3.3 Líderes Horizontais

Com o auxílio das duas câmeras rápidas foi possível observar dois casos de líderes horizontais que, depois de originar uma descarga intranuvem, foram capazes de produzir descargas positivas para o solo. Através de medidas de campo elétrico já era bem estabelecido na literatura que muitos relâmpagos positivos eram precedidos por uma atividade intranuvem significativa que dura, em média, mais de 100 ms (Fuquay, 1981) ou até mesmo 200 ms (Rust et al., 1981). Porém, este é o primeiro trabalho que mostra observações ópticas diretas exibindo relâmpagos positivos cujos líderes foram formados a partir de descargas intranuvem. Uma descrição detalhada dos dois casos pode ser vista em Saba et al., 2009 (ver Anexo B).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo detalhado sobre os diversos tipos de líderes responsáveis pela iniciação dos relâmpagos. É a primeira vez que câmeras de alta resolução temporal são utilizadas em um estudo deste tipo para um grande número de casos (em oposição, por exemplo, ao trabalho realizado por Mazur et al., 1998). Os histogramas mostrando a distribuição de velocidades parciais e médias dos líderes constituem, por si só, uma contribuição inédita à literatura de eletricidade atmosférica e física de relâmpagos.

Para os líderes escalonados, os resultados aqui obtidos estão coerentes com os trabalhos baseados em outros métodos e instrumentos (Rakov e Uman, 2003). Uma constatação não apresentada em estudos anteriores é a não aceleração do líder escalonado conforme ele se aproxima do solo, contrariando o comportamento esperado por alguns pesquisadores (V. Mazur, comunicação pessoal, 2008). Em contrapartida, observamos que os 21 casos de líderes positivos que analisamos apresentaram um aumento em sua velocidade de propagação conforme se aproximaram do solo (resultados preliminares para 9 casos são descritos por Saba et al., 2008, encontrado no Anexo A deste trabalho). Sabendo que o processo físico envolvido em cada tipo de líder é bastante distinto (discutida em detalhes por Gallimberti et al., 2002; Lalande et al., 2002; e Williams, 2006) acreditamos que este resultado esteja refletindo, em nível macroscópico, uma assimetria existente na microfísica da formação de relâmpagos positivos e negativos.

A primeira observação óptica dos líderes de recuo (Saba et al., 2008, ver Anexo A) revelou grandes detalhes sobre a estrutura bastante ramificada dos líderes positivos para o solo. Este estudo complementa os trabalhos anteriores baseados em redes de VHF e reforça as evidências físicas a favor da teoria bidirecional da formação de relâmpagos (Mazur, 2002; Williams, 2006). O uso das câmeras rápidas também possibilitou demonstrar que relâmpagos nuvem-solo positivos podem ter origem em canais produzidos por descargas intranuvem, uma hipótese levantada em diversos trabalhos baseados em medidas de campo elétrico e que reportaram uma aparente relação entre os

dois fenômenos (Rust et al., 1981; Fuquay, 1982). Esta análise é detalhada no trabalho de Saba et al., 2009 (ver Anexo B).

Apesar da limitação na resolução temporal das câmeras utilizadas, 2% dos eventos de líderes contínuos apresentaram velocidades maiores do que o limite superior obtido pelos estudos anteriores presentes na literatura (Rakov e Uman, 2003). Trabalhos futuros irão focar a correlação entre a velocidade de propagação do líder contínuo e diversos outros fatores, como o tempo desde a descarga de retorno anterior e a duração da corrente contínua subsequente. Resultados preliminares são apresentados em Campos e Saba, 2009 (Anexo C).

Desde sua primeira observação por Schonland et al. (1938), este é o primeiro trabalho que reporta a ocorrência dos líderes tipo β_2 . Cada um dos quatro casos observados são detalhados em um artigo que se encontra atualmente em preparação (Campos et al., 2009) e abrangerá todos os resultados gerais sobre líderes apresentados neste relatório.

Outros dois trabalhos desenvolvidos pelo aluno também foram incluídos nos Anexos D e E, sendo um desenvolvido no período de bolsa 2007/2008 e publicado em fevereiro de 2009 (Campos et al., 2009) e o outro que foi submetido e já foi revisado (Campos e Saba, 2009). Ambos são sobre correntes contínuas e componentes-M e estão diretamente ligados ao trabalho correspondente ao período de bolsa 2005/2006 (Campos et al., 2007b).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballarotti, M.G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida.** Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE: 2005.
- Ballarotti, M.G., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophys. Res. Lett.** v. 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889, 2005.
- Berger, K., Vogelsanger, E. Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955-1965 auf dem Monte San Salvatore. **Bull. Schweiz. Elektrotech. Ver.**, v. 57, 599-620.
- Biagi, C.J., Cummins, K.L., Kehoe, K.E., Krider, E.P. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma. **J. Geophys. Res.**, v. 112, D05208, doi.10.1029/2006JD007341, 2007.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F. The relation between continuing current duration and the characteristics of the dart leader that precedes it. **X International Symposium on Lightning Protection.** Inst. de Electrotéc. e Energia, Univ. de São Paulo, Curitiba, Brazil, 2009.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F. Comment on “Computer simulations on sprite initiation for realistic lightning models with higher-frequency surges”, by T. Asano, T. Suzuki, Y. Hiraki, E. Mareev, M. G. Sho, and M. Hayakawa. **J. Geophys. Res.**, *in press*, 2009.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Study on waveshapes of continuing currents and properties of M-components observed in natural negative and positive cloud-to-ground flashes using a high-speed camera. **Proc. of the 13th Int. Conf. on Atmospheric Electricity.** Internacional Commission on Atmospheric Electricity, 1, 497-500, Beijing, China, 2007a.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-componentes in negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmos. Res.** v. 84, p. 302-310, 2007b.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-componentes in positive cloud-to-ground lightning. **Atmos. Res.**, v. 91, 416-424, 2009.
- Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Warner, T.A., Krider, E.P., Pinto Jr., O. Lightning leader observations from high-speed video. **J. Geophys. Res.**, *in press*, 2009.
- Fisher, R.J., Schnetzer, G.H.; Thottappillil, R.; Rakov, V.A.; Uman, M.A.; Goldberg, J.D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. **J. Geophys. Res.**, v. 98, n. D12, 22887-22902, 1993.

- Fuquay, M.D. Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorms. **J. Geophys. Res.**, v. 87, 7131-7140, 1982.
- Gallimberti, I., Bacchiega, G., Bondiou-Clergerie, A., Lalande, P. Fundamental processes in long air gap discharges. **C. R. Physique**, 3, 1335-1359, 2002.
- Kitagawa, N., Brook, M.; Workman, E.J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.** v. 67, 637-647, 1962.
- Lalande, P., Bondiou-Clergerie, A., Bacchiega, G., Gallimberti, I. Observations and modeling of lightning leaders. **C. R. Physique**, 3, 1375-1392, 2002.
- Lutgens, F.K.; Tarbuck, J.E. **The atmosphere: an introduction to meteorology**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 434 p., 1982.
- Mazur, V. Physical processes during the development of lightning flashes. **C. R. Physique**, v. 3, 1393-1409, 2002.
- Mazur, V., Krehbiel, P.R., Shao, X.M. Correlated, high-speed video and radio interferometric observations of a cloud-to-ground lightning flash. **J. Geophys. Res.**, v. 100, 25,731-25,753, 1998.
- Pinto Jr., O, 2003. The Brazilian Lightning Detection Network: a historical background and future perspectives. **VII International Symposium on Lightning Protection**. Inst. de Electrotéc. e Energia, Univ. de São Paulo, Curitiba, Brazil, 2003.
- Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000, 172 p.
- Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. Tese de doutorado. São José dos Campos: INPE, 1997.
- Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **J. Geophys. Res.**, v. 111, D03101. doi:10.1029/2005JD006415, 2006a.
- Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophys. Res. Lett.** v. 33, L23807, doi:10.1029/2006GL027455, 2006b.
- Saba, M. M. F., Pinto Jr., O., Solórzano, N. N., Eyebert-Berard, A. Lightning current observation of an altitude-triggered flash. **Atmos. Res.** v. 76, p. 402-411, 2005.
- Saba, M.M.F., Campos, L.Z.S., Krider, E.P., Pinto Jr., O. High-speed video observations of positive ground flashes produced by intracloud lightning. **Geophys. Res. Lett.** v. 36, L12811, doi:10.1029/2009GL038791, 2009.

Saba, M.M.F., Cummins, K.L., Warner, T.A., Krider, E.P., Campos, L.Z.S., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O., Fleenor, S.A. Positive leader characteristics from high-speed video observations. **Geophys. Res. Lett.** v. 35, L07802, doi:10.1029/2007GL033000, 2008.

Schonland, B. F. J., Malan, D. J., Collens, H. Progressive lightning, 6. **Proc. Roy. Soc. (London)**, v. A168, 455-469, 1938.

Rakov, V.A., Huffines, G.R. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. **J. Appl. Meteor.**, v. 42, 1455-1462, 2003.

Rakov, V.A., Uman, M.A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge Univ. Press, New York. 687 p, 2003.

Rakov, V.A., Uman, M.A., Thottappillil, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **J. Geophys. Res.**, v. 99, 10745-10750, 1994.

RedLake. **Instructions for Operating the MotionScope® PCI High Speed Digital Imaging System**. Manual No. 9400-0010 Revision S, 2002.

Rust, W. D., MacGorma, D. R., Arnold, T. R. Positive cloud to ground lightning flashes in severe storms. **Geophys. Res. Lett.**, v. 8, 791-794, 1981.

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

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

Williams, E. R. Problems in lightning physics-the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Sci. and Technol.**, v. 15, S91-S108, 2006.

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

ANEXO A – ARTIGO GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS (1)

OBSERVAÇÕES DE LÍDERES POSITIVOS

ANEXO B – ARTIGO GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS (2)

**OBSERVAÇÕES DE RELÂMPAGOS POSITIVOS INICIADOS POR
DESCARGAS INTRANUVEM**

**ANEXO C – ARTIGO PARA O X INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
LIGHTNING PROTECTION**

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A DURAÇÃO DA CORRENTE CONTÍNUA
E OS PARÂMETROS DO LÍDER CONTÍNUO QUE A ANTECEDE**

ANEXO D – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH

**ESTUDO SOBRE CORRENTES CONTÍNUAS E COMPONENTES-M EM
RELÂMPAGOS POSITIVOS CORRESPONDENTE AO PERÍODO DE BOLSA
PIBIC 2007/2008**

ANEXO E – ARTIGO JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH

**COMENTÁRIO SOBRE UM TRABALHO QUE UTILIZOU RESULTADOS
OBTIDOS NO PERÍODO DE BOLSA PIBIC 2005/2006 (JÁ PUBLICADOS)
COMPARANDO-O COM RESULTADOS MAIS RECENTES OBTIDOS NO
PERÍODO DE BOLSA 2007/2008 (ANEXO D)**