



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS NO BRASIL E NOS EUA

**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

COLABORADORES

Antônio C. V. Saraiva (ELAT/DGE/INPE)
Dr. Osmar Pinto Jr. (ELAT/DGE/INPE)
Dr. Kenneth L. Cummins (IAP/University of Arizona)
Dr. E. Philip Krider (IAP/University of Arizona)

Julho de 2008

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.....	13
2.1 Lista de Materiais Utilizados.....	13
2.2 Instrumentação Observacional.....	13
2.3 Locais de Observação.....	19
3 RESULTADOS.....	23
3.1 Multiplicidade.....	23
3.2 Intervalo entre Descargas de Retorno.....	24
3.3 Duração Total do Relâmpago.....	26
3.4 Forma de Onda de Correntes Contínuas.....	29
4 CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
ANEXO A – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH, PIBIC 2005/2006.....	35
ANEXO B – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH, PIBIC 2007/2008.....	45

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
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).	8
Figura 2.1 – Fotografia da câmara <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC.	14
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).	16
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.....	17
Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmara.	17
Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).	18
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).....	18
Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel utilizado na campanha brasileira.....	19
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.....	20
Figura 2.9 – Módulo móvel da FASTCAM 512 PCI 2k utilizado durante a campanha no verão norte-americano em Tucson, Arizona.....	21
Figura 3.1 – Histograma do número de descargas de retorno por relâmpago obtido para Tucson, Arizona, EUA.	23
Figura 3.2 – Comparação do histograma do número de descargas de retorno por relâmpago obtido para Tucson, Arizona, EUA, com os dados obtidos para São José dos Campos, SP, Brasil reportados em Saba et al., 2006a.	24
Figura 3.3 – Distribuição do intervalo entre descargas de retorno obtida para Tucson, Arizona, EUA.	25
Figura 3.4 – Comparação entre as distribuições do intervalo entre descargas de retorno obtidas para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a).	25
Figura 3.5 – Distribuição da duração total do relâmpago obtida para Tucson.....	27
Figura 3.6 – Comparação entre as distribuições da duração total do relâmpago obtidas para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a).....	27
Figura 3.7 – Gráfico exibindo a relação entre duração total do raio e seu número de descargas de retorno para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a). ...	28

Figura 3.8 – Comparação entre os histogramas de tipos de forma de onda de corrente contínua para relâmpagos induzidos (Fisher et al., 1993), relâmpagos naturais em São José dos Campos (Campos et al., 2007b, 2008) e Tucson..... 30

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, 2008; 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** (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);

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).

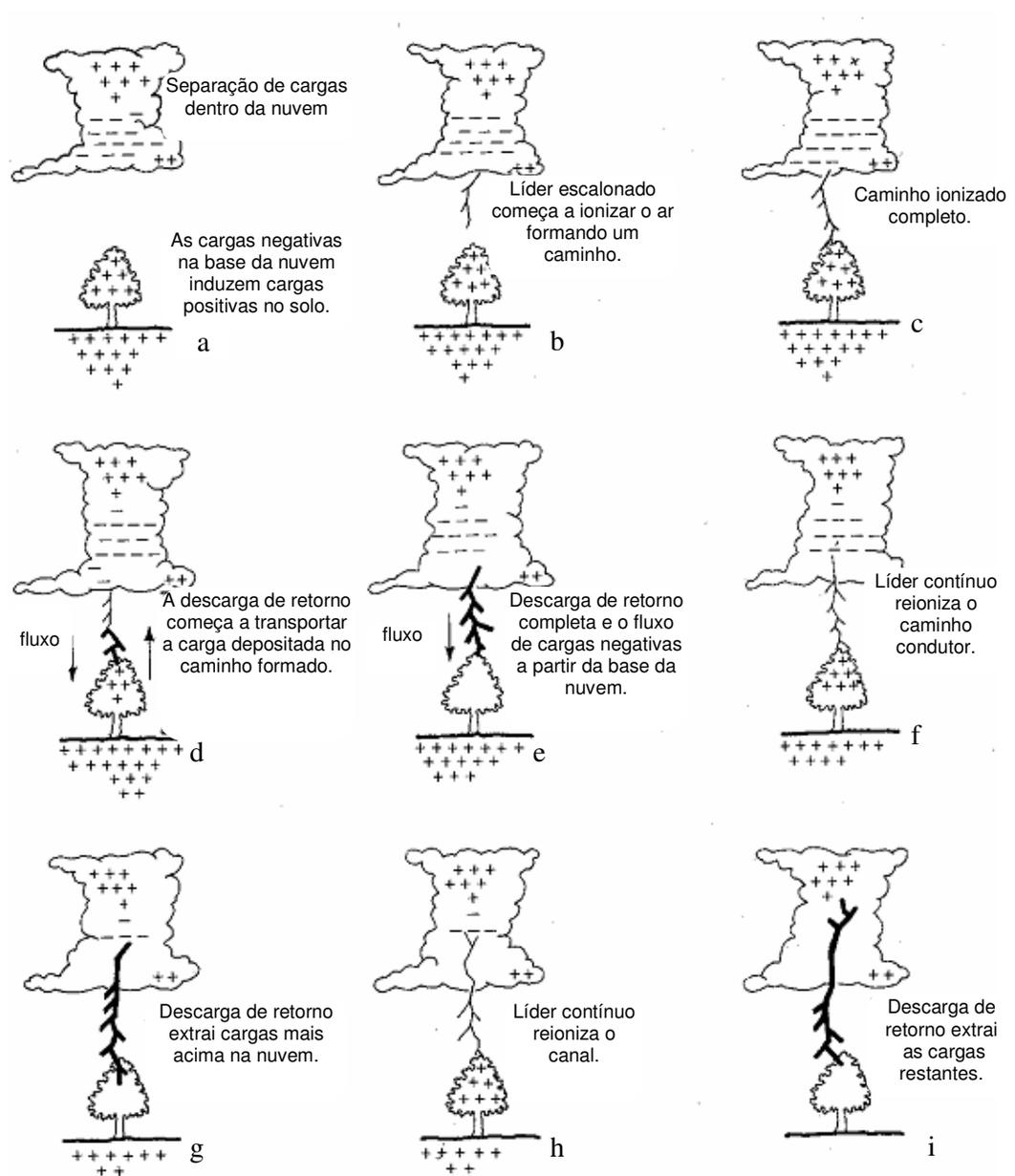


Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

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 contêm **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.

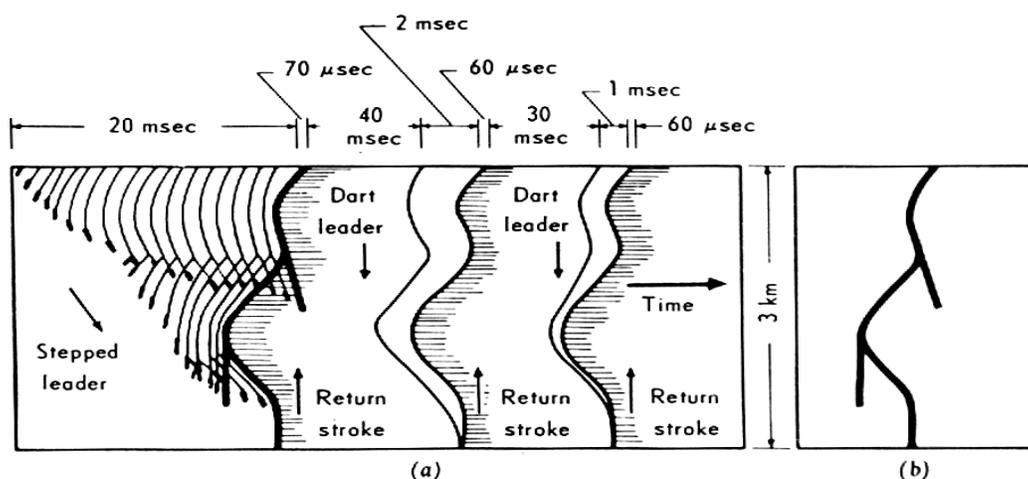


Figura 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado 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, 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	$(1-2).10^7$ m/s
Corrente	1 kA
Duração total	1 – 2 ms

Descarga Subseqüente

Corrente	10 – 15 kA
Velocidade de propagação	$(1-2).10^8$ 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, 2008). Os resultados mostraram-se bastante distintos quando comparados a trabalhos baseados em diversos instrumentos (por exemplo, câmeras convencionais de vídeo, como no trabalho de Rakov et al., 1994) realizados em outros países. Conforme já comentado na literatura (Rakov e Huffines, 2003), diferentes técnicas de observação podem gerar parâmetros bastante distintos se estes são sensíveis à eficiência do processo de identificação de descargas de retorno individuais. Esta discrepância motivou a realização de uma campanha conjunta com o Institute of Atmospheric Physics da University of Arizona, localizada em Tucson, Arizona, EUA, baseada em observações utilizando as câmeras rápidas pertencentes ao INPE e dados da NLDN (National Lightning Detection Network™), a rede norte-americana de detecção de descargas atmosféricas. Com isso, dois locais com características climáticas e geográficas bastante distintas puderam ter seus relâmpagos estudados com exatamente os mesmos instrumentos, tornando possível a constatação da influência ou não destes fatores.

1.4 Objetivos do Trabalho

Este trabalho visa, em dois locais distintos (São José dos Campos, SP, Brasil e Tucson, Arizona, EUA), obter, analisar e comparar parâmetros gerais dos relâmpagos, tais como:

- Multiplicidade;
- Intervalo entre descargas de retorno;

- Duração total do relâmpago; e
- Ocorrência de formas de onda de correntes contínuas negativas e positivas.

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 o ambiente de desenvolvimento para IDL (*Interactive Data Language*) e o software *Origin 7.0* 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 com as necessidades do trabalho. É possível notar tal diferença na Figura 2.5, que exhibe imagens registradas do líder escalonado para dois diferentes eventos, com e sem o filtro

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

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.

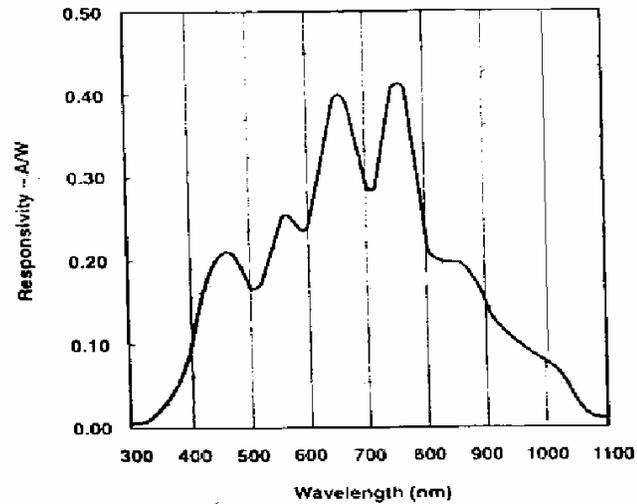


Figura 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

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

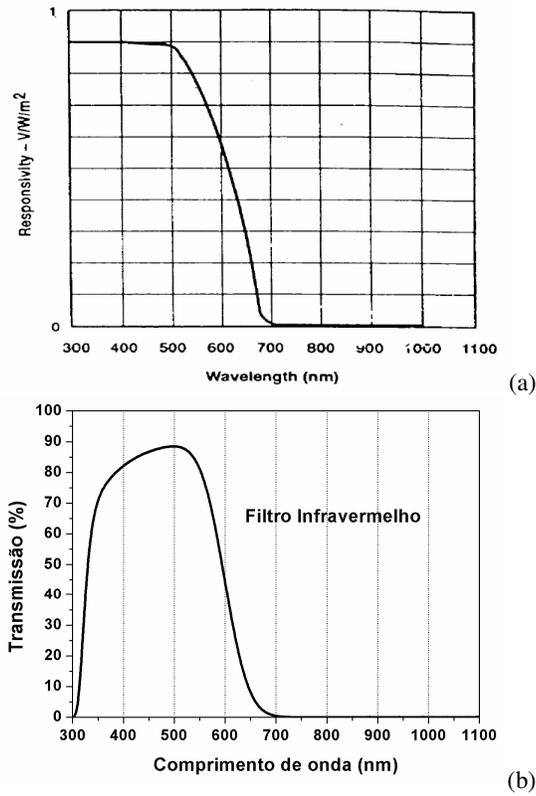


Figura 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o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

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

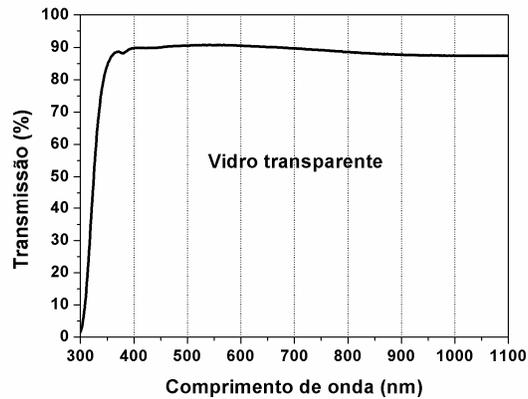


Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

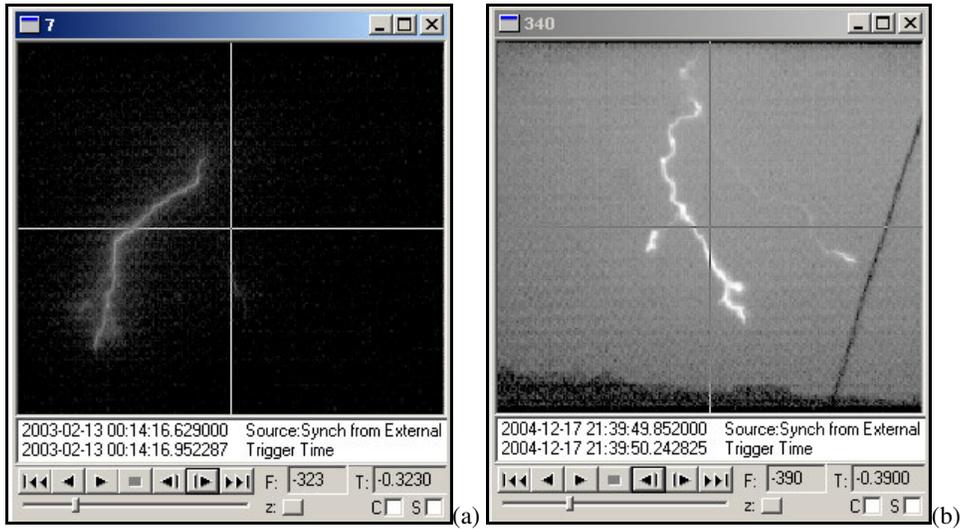


Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).

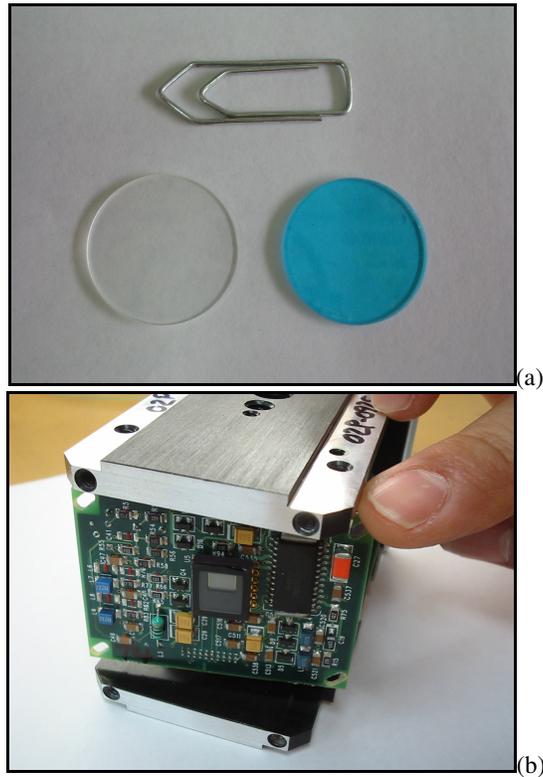


Figura 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

2.2.2 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).

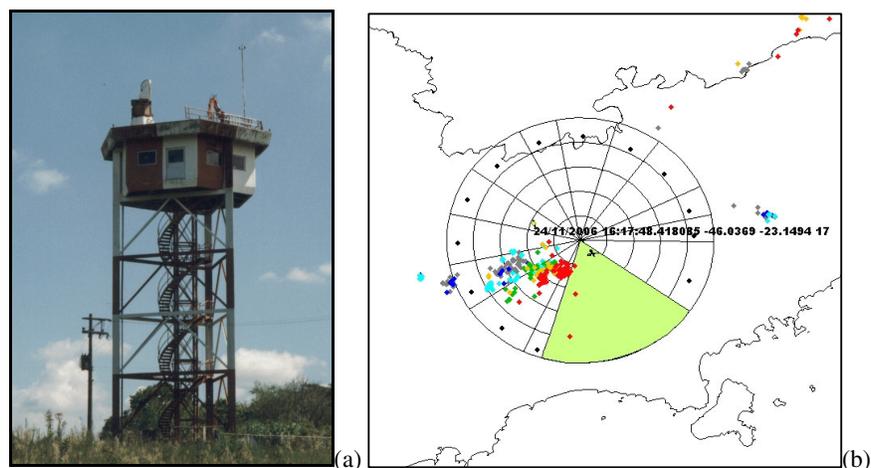


Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre.

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

Durante a campanha em Tucson, Arizona, um total de 242 relâmpagos negativos foram observados por pelo menos uma das câmeras rápidas, todos ocorridos entre 1 e 100 km do local de observação. Cada parâmetro foi comparado a estudos realizados anteriormente pelo ELAT para a região de São José dos Campos, SP (Saba et al., 2006a; Campos et al., 2007b, 2008).

3.1 Multiplicidade

A Figura 3.1 traz o histograma de número de descargas de retorno por relâmpago para todos os 242 relâmpagos observados. Destes, 47 (19%) apresentaram apenas uma descarga de retorno. Um total de 950 descargas de retorno foi observado, sendo que a multiplicidade mais freqüente obtida foi 2 e o número médio de descargas de retorno por relâmpago foi igual a 3,9.

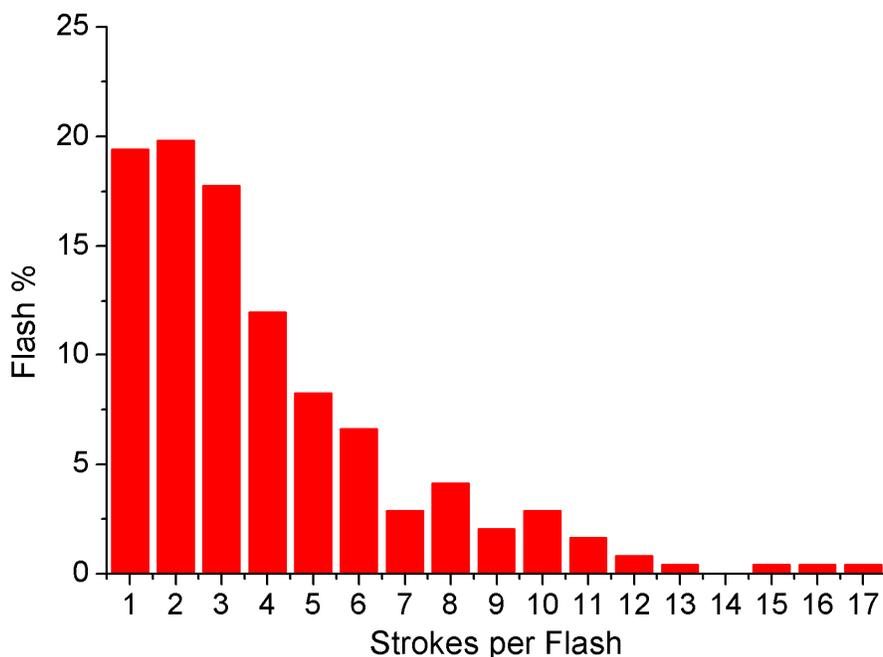


Figura 3.1 – Histograma do número de descargas de retorno por relâmpago obtido para Tucson, Arizona, EUA.

A Figura 3.2 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para Tucson, Arizona, EUA, e os estudos anteriores reportados Saba et al., 2006a, para São José dos Campos, SP, Brasil.

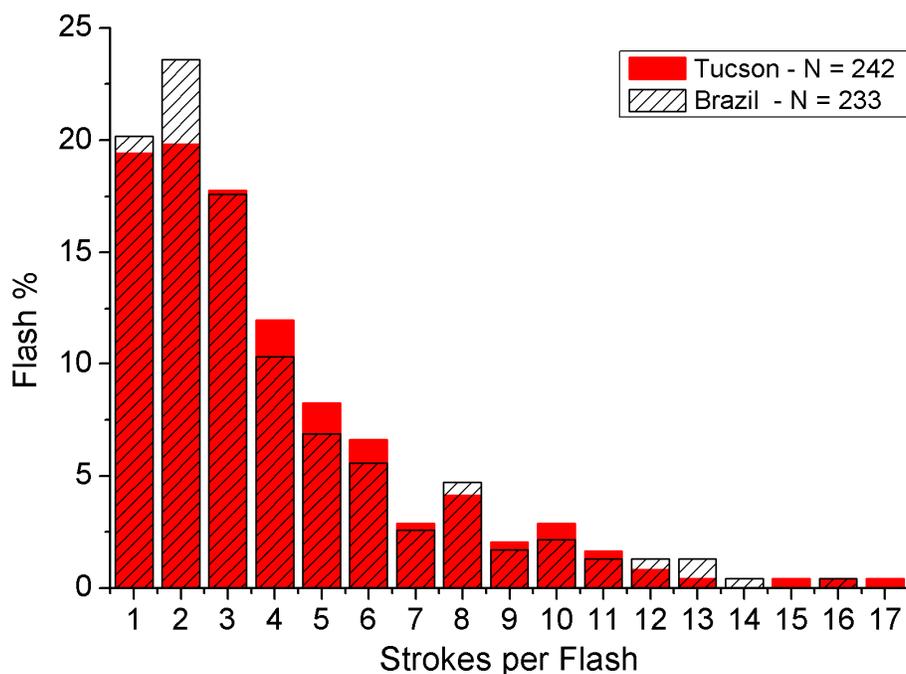


Figura 3.2 – Comparação do histograma do número de descargas de retorno por relâmpago obtido para Tucson, Arizona, EUA, com os dados obtidos para São José dos Campos, SP, Brasil reportados em Saba et al., 2006a.

Nota-se da Figura 3.2 que a distribuição do número de descargas de retorno é bastante semelhante para ambas as localidades. A multiplicidade mais freqüente foi a mesma (2), da mesma forma que o número médio de descargas de retorno foi praticamente o mesmo, 3,9 para Tucson e 3,8 para São José dos Campos.

3.2 Intervalo entre Descargas de Retorno

Para os 242 relâmpagos observados em Tucson, 719 intervalos entre descargas de retorno foram obtidos. Sua distribuição é mostrada no histograma da Figura 3.3.

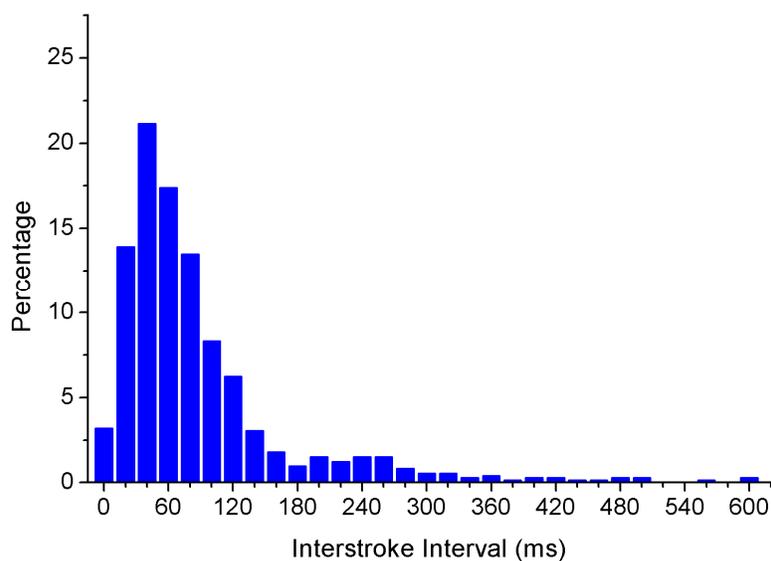


Figura 3.3 – Distribuição do intervalo entre descargas de retorno obtida para Tucson, Arizona, EUA.

A Figura 3.4 traz uma comparação dos dados obtidos para Tucson com os resultados para São José dos Campos reportados por Saba et al., 2006a.

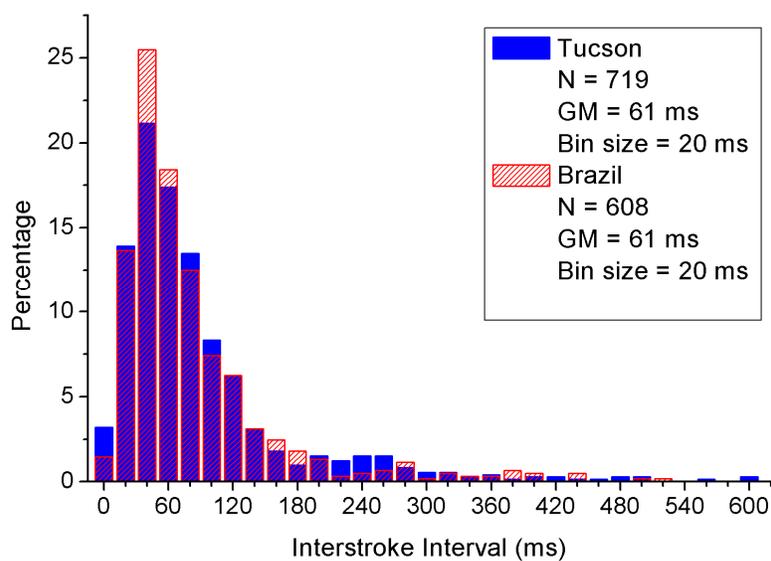


Figura 3.4 – Comparação entre as distribuições do intervalo entre descargas de retorno obtidas para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a).

Analisando a Figura 3.4 nota-se uma semelhança bastante grande entre as distribuições do intervalo entre descargas de retorno obtidas para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a). O conjunto de dados de Tucson apresentou uma média geométrica (GM) de 61 ms e uma média aritmética de 89 ms, muito próximas dos valores para São José dos Campos reportados em Saba et al., 2006a (média geométrica de 61 ms e média geométrica de 83 ms).

Cerca de 20% dos casos (145 dos 719 intervalos medidos) encontrou-se abaixo de 33 ms (bastante semelhante aos 19% obtidos por Saba et al., 2006a, para São José dos Campos). Este parâmetro é bastante importante, pois permite determinar qual parcela dos casos não teria sido observada se uma câmera convencional de vídeo (capaz de obter 30 quadros por segundo) tivesse sido utilizada.

3.3 Duração Total do Relâmpago

Nós definimos duração total do relâmpago como sendo o tempo transcorrido entre a primeira descarga de retorno e o final da última (ou de sua corrente contínua, se a possuir). A Figura 3.5 mostra a distribuição da duração dos 242 relâmpagos observados em Tucson, Arizona, EUA. A média geométrica obtida foi de 94 ms para o conjunto de dados total e de 289 ms com a exclusão dos casos com apenas uma descarga de retorno.

Através da Figura 3.6, que traz uma comparação das distribuições obtidas em Tucson e em São José dos Campos (Saba et al., 2006a), é possível notar uma diferença significativa para os casos com duração inferior a 50 ms, que teve uma ocorrência 10% maior em São José dos Campos comparada a Tucson. Conseqüentemente, as médias geométricas (excluindo casos com apenas uma descarga de retorno) foram bastante distintas: 289 ms para Tucson e 114 ms para São José dos Campos (Saba et al., 2006a).

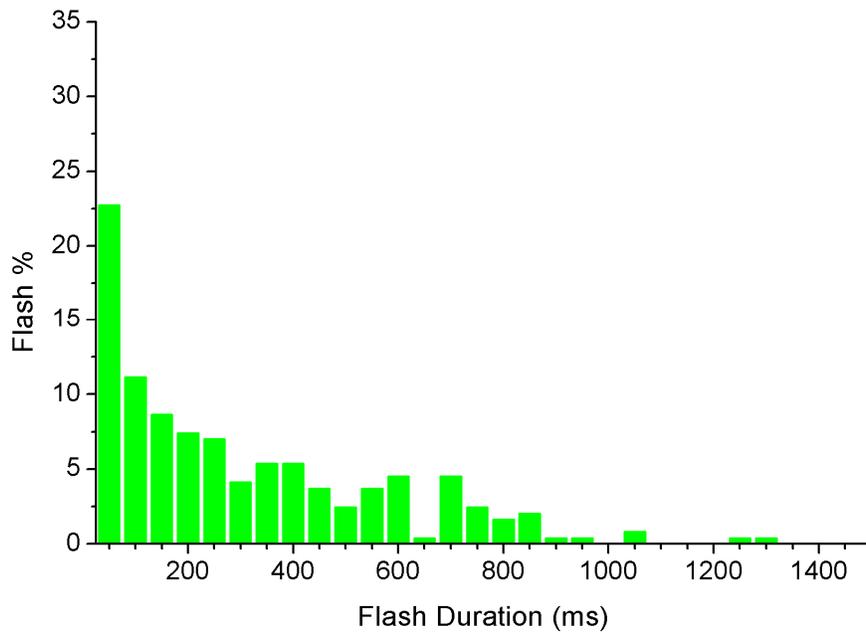


Figura 3.5 – Distribuição da duração total do relâmpago obtida para Tucson.

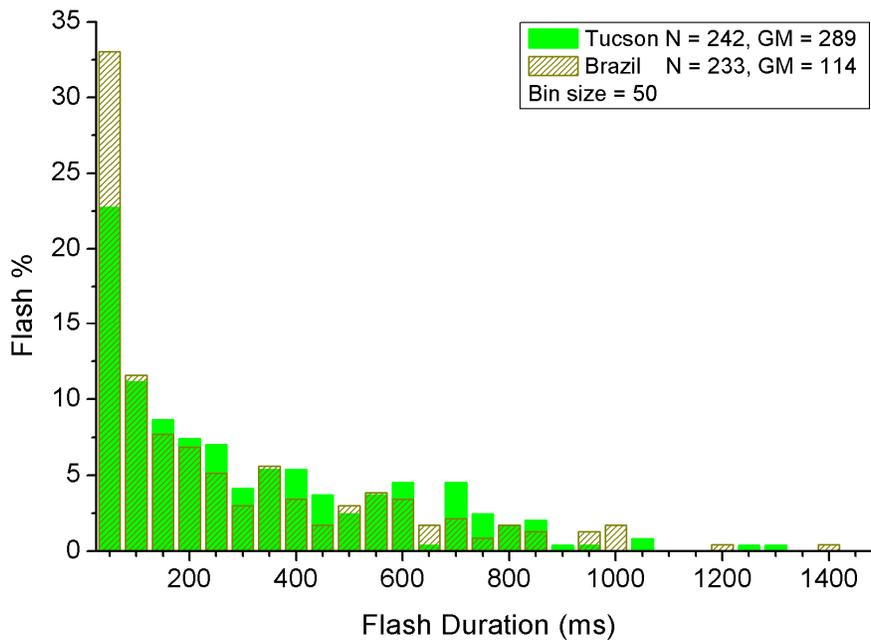


Figura 3.6 – Comparação entre as distribuições da duração total do relâmpago obtidas para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a)

A Figura 3.7 mostra a relação entre a duração total do raio e seu número total de descargas de retorno para Tucson e São José dos Campos. Nota-se uma grande semelhança entre os dados dos dois locais, reforçando a idéia de que deve haver um tempo mínimo para que haja uma reorganização das cargas no interior da nuvem de tal forma a gerar campos elétricos suficientemente intensos para a ocorrência de mais uma descarga de retorno. A duração mínima observada para cada número de descargas de retorno por raio apresentou um ótimo ajuste linear, com um coeficiente de correlação de 0,93. A Figura 3.7 também traz um ajuste exponencial para as durações máximas que intercepta a reta traçada para as durações mínimas aproximadamente no ponto para 19 descargas de retorno e duração total de 1 segundo. Este pode ser tomado como limite superior para os relâmpagos negativos, haja visto que, para ambas as localidades, apenas 5% dos relâmpagos possuíam duração superior a 1 segundo e que nenhum apresentou multiplicidade superior a 18.

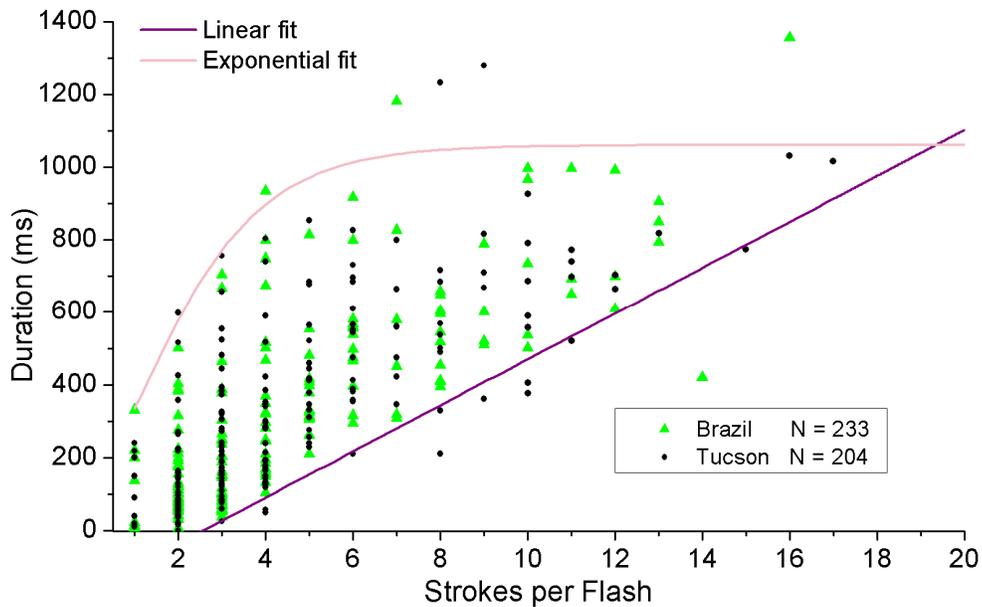


Figura 3.7 – Gráfico exibindo a relação entre duração total do raio e seu número de descargas de retorno para Tucson e São José dos Campos (Saba et al., 2006a).

3.4 Forma de Onda de Correntes Contínuas

Desde o período de bolsa de 2005/2006 o bolsista vem desenvolvendo uma extensa análise da forma de onda de correntes contínuas de relâmpagos naturais, já tendo publicado resultados para relâmpagos negativos (Campos et al., 2007b; Anexo A) e, posteriormente, também para positivos (Campos et al., 2008; Anexo B). O primeiro trabalho sobre o tema foi publicado por Fisher et al., 1993, baseado em dados de relâmpagos induzidos nos EUA. Eles classificaram as formas de onda das correntes contínuas em quatro tipos conforme suas características gerais (tipos I a IV). Ao estudar relâmpagos naturais negativos na região de São José dos Campos, Campos et al., 2007b, observou a ocorrência de dois novos tipos (V e VI). No estudo subsequente para relâmpagos positivos, dois entre os seis tipos reportados em relâmpagos negativos não foram observados (tipos III e V). A descrição detalhada e exemplos gráficos de cada um dos seis tipos podem ser consultados nos Anexos A e B.

O conjunto de dados obtidos na campanha em Tucson tornou possível não só uma ampliação da base de dados de formas de onda de correntes contínuas mas também a comparação de ocorrência para os dois locais. A Figura 3.8 traz os histogramas de ocorrência para relâmpagos induzidos (Fisher et al., 1993) e relâmpagos naturais negativos e positivos para São José dos Campos (Campos et al., 2007a, 2007b, 2008), Tucson e a combinação da base de dados das duas cidades. É possível notar a diferença bastante grande entre os relâmpagos induzidos e os naturais de ambas as polaridades. Para os relâmpagos positivos observados em Tucson os tipos III e V permaneceram não-observados, apesar do número de casos bastante reduzido, o que gerou uma distribuição bastante distinta da reportada para São José dos Campos (Campos et al., 2008).

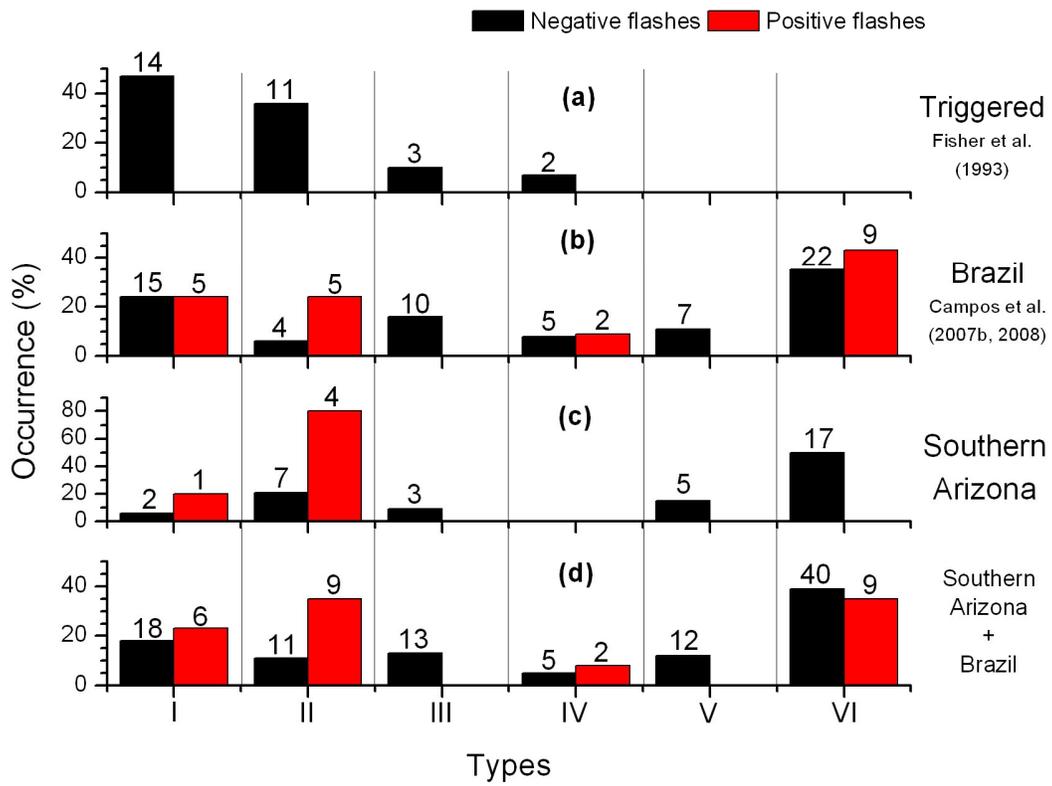


Figura 3.8 – Comparação entre os histogramas de tipos de forma de onda de corrente contínua para relâmpagos induzidos (Fisher et al., 1993), relâmpagos naturais em São José dos Campos (Campos et al., 2007b, 2008) e Tucson.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre os parâmetros gerais dos relâmpagos em Tucson, Arizona, EUA, utilizando a mesma instrumentação já utilizada em trabalhos anteriores baseados em observações realizadas em São José dos Campos, São Paulo, Brasil (Saba et al., 2006a, 2006b; Campos et al 2007a 2007b, 2008)

Apesar da diferença entre os locais de observação, nenhum dos parâmetros analisados apresentou diferenças significativas: a multiplicidade média para os Tucson foi de 3,9 descargas de retorno por raio (19% com apenas uma descarga), enquanto para São José dos Campos foi obtido 3,8 (20% com apenas uma descarga); o intervalo entre descargas de retorno apresentou uma média aritmética de 89 ms (Tucson) comparado a 83 ms (São José dos Campos) e a mesma média geométrica de 61 ms tanto para os Tucson quanto para São José dos Campos; e a duração total de cada raio apresentou uma média geométrica de 289 ms (Tucson) comparada a 114 ms (São José dos Campos), diferença provavelmente causada pela ocorrência muito maior de casos inferiores a 50 ms observada em São José dos Campos. As distribuições de todos esses parâmetros apresentaram grandes semelhanças para ambas as localidades.

As estatísticas de ocorrência das formas de onda de correntes contínuas foram bastante distintas se comparadas às de São José dos Campos, apesar de mantidas a maior tendência ao tipo VI para ambas as polaridades e a aparente não ocorrência dos tipos III e V para os relâmpagos positivos. Apesar dos diferentes hemisférios e latitudes, os parâmetros obtidos para Tucson e São José dos Campos foram essencialmente os mesmos, reforçando a hipótese de que as discrepâncias entre estudos anteriores eram causadas principalmente por diferenças de instrumentação e não geográficas (Rakov e Huffines, 2003).

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.

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., 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.**, *In press*, 2008.

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.

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E.J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.** v. 67, 637-647, 1962.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The atmosphere: an introduction to meteorology.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 434 p., 1982.

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-toground 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., 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.

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.

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.

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

ANEXO A – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH

PIBIC 2005/2006

ANEXO B – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH

PIBIC 2007/2008