

[Imprimir](#)[Fechar](#)*Referência Completa*

Tipo da Referência	Conference Proceedings
Chave Secundária	INPE-11557-PRE/6945
Chave de Citação	Cabral:2004:EsCaRa
Autor(es)	Cabral, Gustavo Francisco
Título	Estudo das Características dos Raios Através de Imagens de Alta Resolução
Nome do Evento	Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)
Data	03 e 04 de ago. 2004
Localização do Evento	São José dos Campos
Editora (Publisher)	INPE
Ano	2004
Páginas	1-45
Título do Livro	Anais
Endereço da Editora	São José dos Campos
Organização	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Repositório do Metadado	sid.inpe.br/marciana/2004/11.19.10.17.00
Resumo	<p>O relâmpago está entre os fenômenos naturais que causam maior número de mortes, constituindo também uma grande ameaça a linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações. São responsáveis por um prejuízo da ordem de centenas de milhões todos os anos no Brasil. No entanto, são importantes para a manutenção do equilíbrio químico da atmosfera e de todo o planeta, sendo essencial que o homem adquira uma grande compreensão do fenômeno. O seu estudo ainda é incipiente no Brasil, sendo até então baseado em parâmetros fornecidos por um sistema de detecção de relâmpagos instalado na região Sudeste brasileira e em seus arredores, e também no estudo de raios induzidos por foguetes. Estes parâmetros possuem uma acurácia limitada, no que diz respeito à localização, intensidade de corrente e ao número de descargas em um mesmo raio, fazendo-se necessária técnicas adicionais no seu estudo. Neste trabalho, foi proposta e aperfeiçoada uma nova técnica de se determinar, com precisão, características importantes desse fenômeno. Utilizou-se uma câmera rápida Red Lake 8000S Motion Scope, capaz de registrar até 8000 quadros por segundo que possui sincronização de tempo por GPS. Registrou-se um total de 314 raios nas cidades de São José dos Campos e Cachoeira paulista, ambas localizadas no Vale do Paraíba, sendo possível observar detalhes de sua estrutura jamais observados no Brasil. Através das imagens, foi possível analisar características importantes, como duração total, número de descargas em um mesmo raio (multiplicidade), tempo entre descargas, corrente contínua, porcentagem de raios bifurcados e estudo do líder escalonado. Relacionando as imagens, sincronizadas por GPS e com precisão temporal da ordem de milissegundos, com os dados fornecidos pela rede de detecção, foi possível também estabelecer uma medida da eficiência do sistema, em termos de precisão de localização</p>

	e de número de descargas detectadas, estudo também inédito no Brasil.
Última Atualização do Metadado	2004:11.19.12.17.01 sid.inpe.br/banon/2003/08.15.17.40 sergio
Site	<iris.sid.inpe.br:1916>
Idioma	Portuguese
Detentor da Cópia	SID/SCD
Divulgação	
Formato	Papel
Area	CEA
Grupo(s)	DGE
Afiliação	ITA, Bolsista PIBIC/CNPq
Usuário Avançado	sergio
Grupo de Usuários	sergio
Visibilidade	shown
Data de Acesso	19 nov. 2004
atualizar	

[Fechar](#)

Estudo das Características dos Raios Através de Imagens de Alta Resolução

Gustavo Francisco Cabral (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: gustavo06@redecasd.ita.br

Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE/INPE, Orientador)

E-mail: msaba@dge.inpe.br

RESUMO

O relâmpago está entre os fenômenos naturais que causam maior número de mortes, constituindo também uma grande ameaça a linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações. São responsáveis por um prejuízo da ordem de centenas de milhões todos os anos no Brasil. No entanto, são importantes para a manutenção do equilíbrio químico da atmosfera e de todo o planeta, sendo essencial que o homem adquira uma grande compreensão do fenômeno.

O seu estudo ainda é incipiente no Brasil, sendo até então baseado em parâmetros fornecidos por um sistema de detecção de relâmpagos instalado na região Sudeste brasileira e em seus arredores, e também no estudo de raios induzidos por foguetes. Estes parâmetros possuem uma acurácia limitada, no que diz respeito à localização, intensidade de corrente e ao número de descargas em um mesmo raio, fazendo-se necessária técnicas adicionais no seu estudo.

Neste trabalho, foi proposta e aperfeiçoada uma nova técnica de se determinar, com precisão, características importantes desse fenômeno. Utilizou-se uma câmera rápida Red Lake 8000S Motion Scope, capaz de registrar até 8000 quadros por segundo que possui sincronização de tempo por GPS. Registrou-se um total de 314 raios nas cidades de São José dos Campos e Cachoeira paulista, ambas localizadas no Vale do Paraíba, sendo possível observar detalhes de sua estrutura jamais observados no Brasil. Através das imagens, foi possível analisar características importantes, como duração total, número de descargas em um mesmo raio (multiplicidade), tempo entre descargas, corrente contínua, porcentagem de raios bifurcados e estudo do líder escalonado. Relacionando as imagens, sincronizadas por GPS e com precisão temporal da ordem de milissegundos, com os dados fornecidos pela rede de detecção, foi possível também estabelecer uma medida da eficiência do sistema, em termos de precisão de localização e de número de descargas detectadas, estudo também inédito no Brasil.

[1] BALDERAS-LÓPEZ, J. A. et al. Rev. Sci. Instrum. **70**, 2069-2071 (1999)

[2] BALDERAS-LÓPEZ, J. A. et al. Meas. Sci. Technol. **6**, 1163-1168 (1995)



MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

Número

PIBIC-028/04

Título

Estudo das Características dos Raios Através de Imagens de Alta Resolução

Autor

Gustavo Francisco Cabral

Tradutor

Não há

Editor

Empty field for Editor name.

Origem	Projeto	Série	No. de Páginas	No. de Fotos	No. de Mapas
			45	0	0

Tipo

RPQ PRE NTC PRP MAN PUD TAE

Divulgação

Externa Interna Reservada Lista de Distribuição Anexa

Periódico / Evento

Seminário de Iniciação Científica do INPE - SICINPE 2004

Convênio

Empty field for Convênio.

Autorização Preliminar

____/____/____
Data

[Signature]
Coordenador do PIBIC
Programa Institucional de P...

Revisão Técnica

Solicitada Dispensada

Recebida ____/____/____ Devolvida ____/____/____

Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

Revisão de Linguagem

Solicitada Dispensada

Recebida ____/____/____ Devolvida ____/____/____

Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

Autorização Final

____/____/____
Data

[Signature]
Marcos Dias da Silva
Coordenador de Ensino, Documentação
e Projetos da Unidade de...

Palavras Chave

Raios - Imagens - Alta Resolução

(continua na folha 2/2)

INPE - 106.2



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

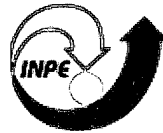
INPE-11557-PRE/6945

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS ATRAVÉS DE
IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO**

Gustavo Francisco Cabral

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica
(PIBIC/CNPq/INPE)

INPE
São José dos Campos
2004



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA – PIBIC/CNPq**

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

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS
ATRAVÉS DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO**

Gustavo Francisco Cabral (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: gustavo06@redecasd.ita.br

Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE/INPE, Orientador)
E-mail: msaba@dge.inpe.br

Maio de 2004

RESUMO

O relâmpago está entre os fenômenos naturais que causam maior número de mortes, constituindo também uma grande ameaça a linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações. São responsáveis por um prejuízo da ordem de centenas de milhões todos os anos no Brasil. No entanto, são importantes para a manutenção do equilíbrio químico da atmosfera e de todo o planeta, sendo essencial que o homem adquira uma grande compreensão do fenômeno.

O seu estudo ainda é incipiente no Brasil, sendo até então baseado em parâmetros fornecidos por um sistema de detecção de relâmpagos instalado na região Sudeste brasileira e em seus arredores, e também no estudo de raios induzidos por foguetes. Estes parâmetros possuem uma acurácia limitada, no que diz respeito à localização, intensidade de corrente e ao número de descargas em um mesmo raio, fazendo-se necessária técnicas adicionais no seu estudo.

Neste trabalho, foi proposta e aperfeiçoada uma nova técnica de se determinar, com precisão, características importantes desse fenômeno. Utilizou-se uma câmera rápida Red Lake 8000S Motion Scope, capaz de registrar até 8000 quadros por segundo que possui sincronização de tempo por GPS. Registrou-se um total de 314 raios nas cidades de São José dos Campos e Cachoeira paulista, ambas localizadas no Vale do Paraíba, sendo possível observar detalhes de sua estrutura jamais observados no Brasil. Através das imagens, foi possível analisar características importantes, como duração total, número de descargas em um mesmo raio (multiplicidade), tempo entre descargas, corrente contínua, porcentagem de raios bifurcados e estudo do líder escalonado. Relacionando as imagens, sincronizadas por GPS e com precisão temporal da ordem de milissegundos, com os dados fornecidos pela rede de detecção, foi possível também estabelecer uma medida da eficiência do sistema, em termos de precisão de localização e de número de descargas detectadas, estudo também inédito no Brasil.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO2
1.1	Relevância e histórico2
1.2	Objetivos do Trabalho.....4
1.3	Metodologia4
1.3.1	Instrumentação utilizada4
1.3.2	Sistema de aquisição de imagens4
1.3.3	Locais de observação6
1.3.4	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas – RINDAT7
CAPÍTULO 2	O RELÂMPAGO14
2.1	Eletrificação de uma Nuvem de Tempestade.....14
2.2	Tipos de Relâmpagos15
2.3	Relâmpago Nuvem-Solo16
2.3.1	Relâmpagos NS Negativos: etapas e características16
2.3.2	Relâmpagos NS Positivos: etapas e características21
2.3.3	Canais Múltiplos21
CAPÍTULO 3	RESULTADOS E DISCUSSÃO23
3.1	Alterações no equipamento23
3.2	Dados Adquiridos26
3.3	Polaridade27
3.4	Multiplicidade27
3.5	Intervalo entre descargas sucessivas29
3.6	Duração total dos raios negativos32
3.7	Eficiência do sistema de detecção.....32
3.8	Precisão de localização34
3.9	Velocidade do líder escalonado36
3.10	Raios bifurcados.....38
3.11	Corrente contínua.....39
3.12	Vídeo 237: estudo de caso40
CAPÍTULO 4	CONCLUSÃO41
AGRADECIMENTOS42	
TRABALHOS PUBLICADOS43	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....44	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e histórico

O estudo de relâmpagos no Brasil começou há aproximadamente 20 anos. Durante esse período, pôde-se observar algumas características diferentes às comumente relatadas na literatura internacional, o que enfatiza a importância de sua continuidade para um entendimento mais completo do assunto em nossa região.

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 e um prejuízo anual em torno de 500 milhões de dólares (Pinto et Pinto, 2000).

Os raios constituem uma ameaça constante às redes de transmissão de energia e de telecomunicações. Constituem também um perigo às indústrias, edifícios, e também à integridade das pessoas. Para que haja um progresso nos atuais sistemas de proteção, construídos a partir de dados de raios internacionais (obtidos fora da região tropical), é preciso um conhecimento mais acurado das características dos raios em nossa região. Pouco sabemos ainda a esse respeito e o conjunto de dados que temos sobre os parâmetros dos raios em nossa região é ainda incipiente.

Os estudos já realizados no Brasil baseiam-se em:

1- Parâmetros obtidos através de uma rede de detecção de relâmpagos, pertencente a um consórcio de empresas do qual o INPE participa ativamente e, portanto, com acesso direto aos dados gerados. Estes parâmetros são gerados por 24 sensores instalados na região sudeste e em torno dela. Eles possuem uma acurácia limitada no que se refere à multiplicidade dos relâmpagos (número de descargas), a intensidade de corrente e localização destas descargas.

2- Raios induzidos por foguetes. Esta pesquisa efetuada também no INPE possibilita medidas de corrente e de outros parâmetros dos raios ditos “artificiais” já que as suas

características são apenas equivalentes aos raios naturais. Para este estudo, utilizou-se uma câmara rápida Red Lake 8000S Motion Scope.

Esta câmara, já em funcionamento, é capaz de registrar até 8000 quadros por segundo, possui sincronização de tempo com GPS e sensibilidade suficiente para observar detalhes da estrutura do relâmpago jamais observados no Brasil.

Vários trabalhos, em diferentes lugares do mundo, já foram feitos neste sentido utilizando câmeras VHS e antenas de campo elétrico. A filmagem VHS convencional não é adequada para a contagem precisa das descargas, visto que o tempo entre quadros é de 33 ms (30 qps) (Rakov, 2003). Como será visto, o valor típico para o intervalo entre descargas é de 60 ms, porém pode ser de apenas alguns milissegundos. Assim, além da possibilidade de perder descargas de um raio, o sistema VHS convencional não registra o líder escalonado, correntes contínuas menores que 33 ms e não possibilita o sincronismo com alguma base de tempo (GPS, por exemplo) utilizada em outros instrumentos.

Antenas de campo elétrico, com as devidas taxas de amostragem, são capazes de registrar todas as descargas, porém podem acumular registros de diferentes eventos como, por exemplo, relâmpagos intranuvem (IN) ou raios da mesma tempestade. A discriminação entre relâmpagos nuvem-solo (NS) e IN fica, por vezes, impossibilitada. Uma técnica empregada atualmente reúne VHS e sinal de campo elétrico, resolvendo parcialmente os problemas descritos anteriormente, porém, mesmo assim, esta técnica não permite a visualização de algumas etapas, principalmente a posição e o formato do canal de cada descarga.

A utilização de uma câmara rápida, registrando 1.000 quadros por segundo, possibilitou o estudo da multiplicidade dos raios, bem como a visualização de mais etapas do mesmo. Este trabalho é um dos primeiros a fazer um levantamento estatístico, para o Brasil, de várias características precisas do fenômeno através de imagens de alta resolução temporal.

1.2 Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos deste trabalho são o levantamento estatístico de várias características dos raios para o Vale do Paraíba (São Paulo), a saber:

Duração total do evento;

Número de descargas (Multiplicidade);

Intervalo entre descargas;

Multiplicidade do canal;

Corrente Contínua;

Velocidade do líder escalonado;

Porcentagem de bifurcados

E também avaliar o desempenho da RINDAT, em termos de:

Eficiência de Detecção;

Precisão de Localização;

1.3 Metodologia

1.3.1 Instrumentação utilizada

Os dados estudados neste trabalho serão provenientes de dois instrumentos: um sistema de aquisição de imagens e a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT).

1.3.2 Sistema de aquisição de imagens

Utilizaremos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (High Speed Digital Imaging System) “MotionScope PCI” do fabricante Red Lake, modelo 8000S (FIGURA). Este sistema utiliza um sensor CCD para a captura das imagens. Ele é capaz de gravar uma

seqüência de imagens digitais de um evento a uma taxa ajustável de 60 a 8.000 quadros por segundo, sendo que os arquivos de saída, com extensão avi, podem ser visualizados em um PC. Possui sincronização de tempo via GPS, possibilitando comparação com outros instrumentos em análises de um mesmo evento.

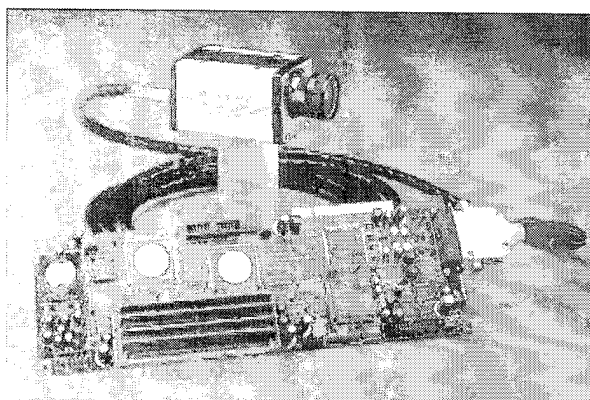


FIGURA 1 – Fotografias da câmera 8000S MotionScope com sua placa de interface com o PC FONTE: Red Lake (2002).

Uma câmera comercial Sony DC-TRV330 Digital 8 foi usada em conjunto com a câmera rápida, de forma que um maior campo de visão pudesse ser observado. Através da comparação das imagens das duas câmeras, foi possível descartar a possibilidade de se perder descargas de um relâmpago com múltiplos canais, que poderiam ocorrer fora do campo de visão da câmera de alta velocidade. Essa comparação foi também uma oportunidade de verificar a confiança da uma câmera convencional em estudos que dependem de grande resolução temporal, como a determinação da porcentagem de relâmpagos com uma única descarga, multiplicidade e eficiência de redes de detecção com relação ao número de descargas detectadas.

A taxa de aquisição utilizada foi de 1.000 quadros por segundo (qps). Não foi usada a máxima (8.000 qps) devido à solução de compromisso existente entre a taxa de aquisição e o ângulo de abertura (ou, equivalentemente, área utilizável do CCD). Uma alta taxa de aquisição implica numa alta resolução temporal, entretanto numa baixa resolução gráfica, pois o tempo de exposição do CCD é insuficiente para sensibilizá-lo e gerar uma boa

imagem. Assim, a 1.000 qps, a resolução é de 240 x 210 pixels (a total do sensor CCD é de 656 x 496 pixels), onde cada pixel possui $7,4 \mu\text{m}^2$. Para esta taxa, os ângulos de abertura são $23,72^\circ$ na vertical e $26,99^\circ$ na horizontal; o tempo total de gravação é de 2,0 segundos; o número total de quadros de cada filme é 2.000; e o tempo de exposição de cada quadro é aproximadamente 1,0 ms (é aproximado devido ao tempo de *refresh* do CCD entre dois quadros, não fornecido pelo fabricante por ser desprezível). Ou seja, em termos práticos, o sistema funciona ininterruptamente. Tal configuração se mostrou adequada 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 dada região de memória programada e, quando o ponteiro 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 de seu acionamento. Como o tempo de resposta típico dos operadores (intervalo de tempo entre os momentos do evento e o do acionamento manual) está em torno de 300 ms, geralmente registramos 0,7 s antes do início do raio e 1,3 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.

1.3.3 Locais de observação

Os dois locais de observação estão nos municípios de São José dos Campos e de Cachoeira Paulista (ambos no Estado de São Paulo). O local, em São José dos Campos, é a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Já, em Cachoeira Paulista, a observação é feita no CIPRIN (Centro Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais) localizado no INPE. Ambos

são pontos elevados em comparação com o relevo local, possibilitando boa visibilidade. A FIGURA exhibe fotos dos locais.

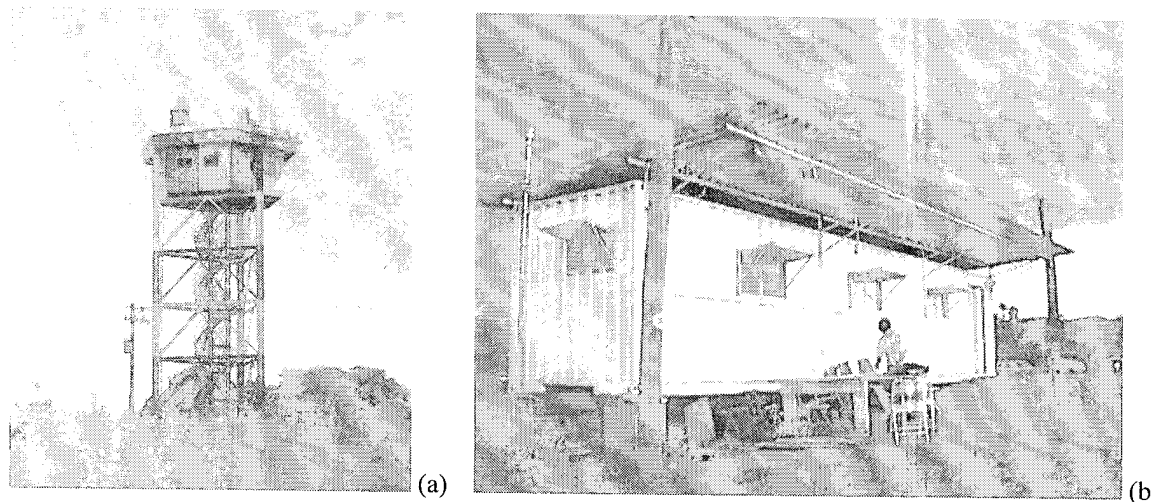


FIGURA 2 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL (raios naturais) e (b) Estande de observação do CIPRIN (raios artificiais e naturais também).

1.3.4 Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas - RINDAT

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) é um Sistema de Detecção de Relâmpagos de Larga Escala (ou Sistema de Localização de Tempestades) implantado no Brasil (RINDAT, 2004), que consiste num complexo instrumento de medida utilizado para detectar relâmpagos que envolvem o solo (raios: NS ou SN), e identificar com precisão os locais onde os raios tocam a superfície. Isto é feito por uma rede de sensores remotos que detectam a radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos, analisam os sinais recebidos, por intermédio de algoritmos específicos, e eliminam aqueles cujas fontes não sejam descargas atmosféricas. Cada sensor que tenha detectado um evento válido envia os dados obtidos (os quais consistem basicamente do horário do evento, a intensidade do sinal, seu tempo de subida e sua largura de pulso) para uma Central de Processamento. Esta, por sua vez, compara os horários informados a fim de assegurar que os dados sejam de um mesmo evento e, em seguida, calcula a localização ótima do ponto de impacto daquele raio. Além da localização, o sistema pode determinar várias outras grandezas do evento: pico de corrente da descarga de retorno, multiplicidade, polaridade da corrente de descarga, dentre outras. Algumas destas grandezas serão

correlacionadas com outras provenientes das imagens obtidas. Na TABELA I constam algumas características desse sistema.

TABELA I – Características da rede de detecção

Eficiência de detecção* de relâmpagos nuvem-solo	80-90% (>5 kA)
Eficiência de detecção** de relâmpagos intranuvem flashes	10-30%
Eficiência de detecção de descargas	~50%(>5 kA)
Discriminante	>90% (+ >10 kA)
Precisão da localização	0.5 km
Pico de corrente estimado***	~20-30%

* Considerando a distribuição uniforme dos sensores

** Somente LPATS IV/Impact - ESP

*** Dependente do valor da corrente

Sistemas de Localização de Tempestades (como o RINDAT) estão atualmente baseados em duas tecnologias de detecção (Naccarato, 2002):

Método da Direção Magnética (MDF, *Magnetic Direction Finding*): emprega duas **bobinas magnéticas** ortogonais entre si, capazes de medir a direção de uma descarga (mais precisamente o azimute, que é o ângulo em relação ao norte geográfico). Neste método, quando dois ou mais sensores detectam uma descarga, a intersecção das retas definidas pelos azimutes determina o ponto de impacto (FIGURA). Quando três ou mais sensores detectam uma descarga, pode ser empregado um procedimento de otimização, chamado triangulação, que minimiza o erro no cálculo dos azimutes.

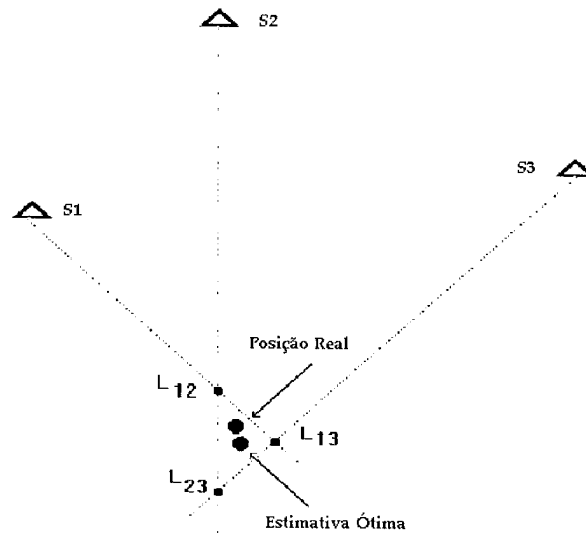


FIGURA 3 – Ilustração do método MDF. S_n representa o sensor n e L_{ij} a intersecção das retas geradas pelos azimutes.

Método do Tempo de Chegada (TOA, *Time of Arrival*): define um lugar geométrico circular dos possíveis pontos de impacto ao redor de cada sensor baseado no **horário absoluto de chegada da radiação EM** nos mesmos. O raio de cada círculo é calculado a partir da diferença de tempo entre o momento da descarga e o momento em que o sensor recebe o sinal EM. A localização é determinada, portanto, seleccionando-se a posição e o horário correspondentes ao ponto de intersecção de todos os círculos (FIGURA). Este algoritmo iterativo é normalmente chamado de Método de Localização por Intersecções Circulares. Quando no mínimo 4 sensores informam a ocorrência de uma descarga, este método é capaz de produzir uma solução sem ambigüidade e ao mesmo tempo otimizada.

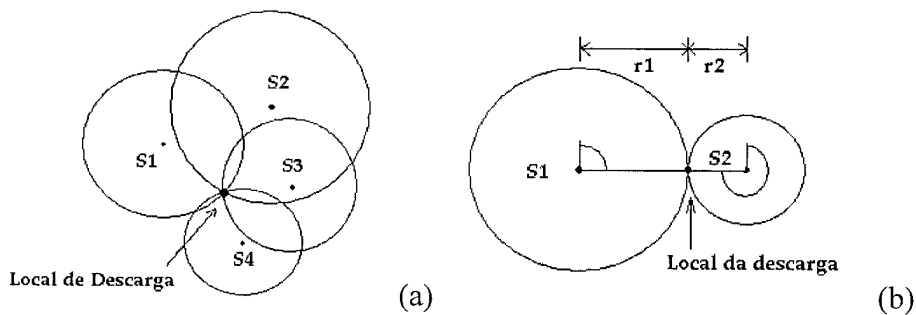


FIGURA 4 – S_n representa os sensores. Ilustrações dos métodos (a) TOA e (b) IMPACT.

A tecnologia IMPACT (*Improved Performance from Combined Technology*), desenvolvida na década de 90, combinou estes dois métodos, superando os desempenhos de cada um deles isoladamente. A FIGURA 4 ilustra tal método. Por possuir informação redundante, este método permite calcular uma localização ótima mesmo em uma condição de detecção mínima, isto é, quando uma descarga é registrada por apenas dois sensores. A FIGURA 5 exhibe uma fotografia deste sensor e a distribuição de todos os que formam a RINDAT, que utilizam tanto tecnologias IMPACT quanto TOA (LPATS III E IV).

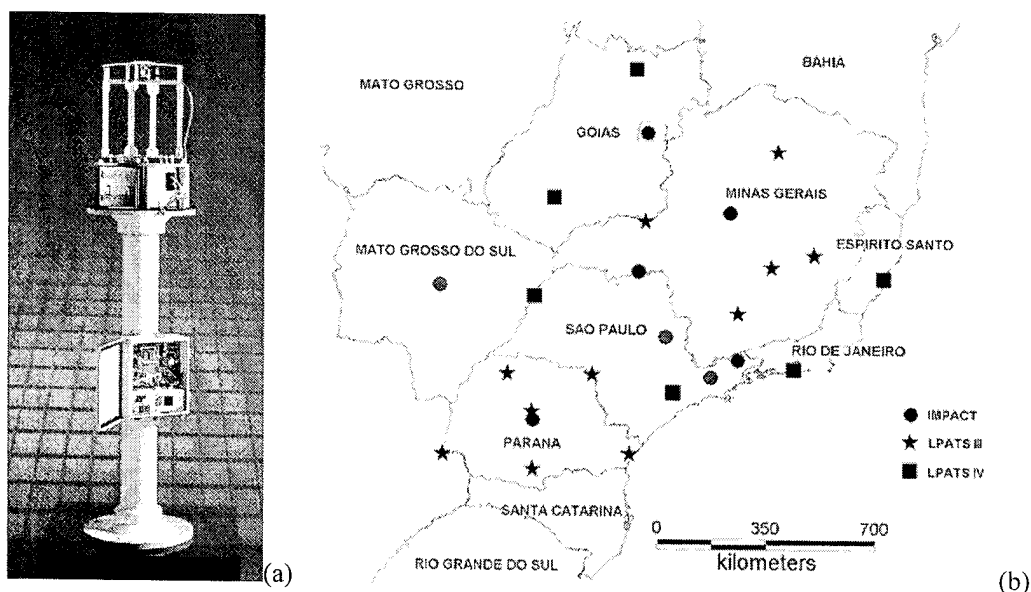


FIGURA 5 – (a) Fotografia de um sensor IMPACT. (b) Distribuição dos Sensores constituintes da RINDAT. LPATS (III e IV) são sensores que utilizam a técnica TOA.

A Central de Processamento, que recolhe, processa e armazena todas as informações oriundas dos sensores, apresenta os dados de saída em dois modos (Naccarato, 2002):

Tempo Real: as soluções são computadas à medida que os dados dos sensores são recebidos. Há uma limitação aqui: dados dos sensores que sofram atraso de comunicação maior que o limite de espera do sistema, não entram no cálculo das soluções – conseqüentemente, algumas descargas podem não ser registradas.

Reprocessamento: as soluções são computadas com base nas informações dos sensores gravadas em disco e ordenadas cronologicamente. Neste modo, elimina-se o problema da perda de informações por atraso de comunicação (haja vista que todos os dados informados

pelos sensores estão gravados nos arquivos em disco e serão reprocessados, aumentando a performance do sistema).

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

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

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
03/29/04	17:12:43.123100343	-23,2690	-45,7552	-12,5	-67,3	8,2	18,0	-0,0	0	0,4	0,2	2,0	127	AxT	8	8	G	0,7	
03/29/04	17:12:43.195145300	-23,2873	-45,7270	-15,9	-85,8	7,9	25,4	-2,6	0	1,1	0,2	5,5	157	xxT	5	2	G	1,9	
03/29/04	17:12:43.195151100	-23,3136	-45,6224	-11,1	-60,0	11,4	20,2	-0,0	0	8,3	1,8	4,6	42	AxT	3	1	G	0,8	
																			Valor de qui-quadrado
																			G (ground) ou C (cloud)
																			Número de graus de liberdade
																			Número de sensores participantes
																			Tipo de informação usada no cálculo
																			Ângulo da elipse de erro
																			Excentricidade da elipse de erro
																			Comprimento do menor semi-eixo
																			Comprimento do maior semi-eixo
																			Multiplicidade
																			Máxima taxa de subida da corrente (kA/μs)
																			Largura de pulso (μs)
																			Tempo de subida do sinal (μs)
																			Intensidade do sinal EM
																			Pico de corrente (kA) com polaridade
																			Latitude e Longitude no solo
																			Horário (com precisão de μs)
																			Data (Mês/Dia/Ano)

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

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

Desvios padrão das medidas angulares e temporais;

Número de sensores participantes;

Localização do sensor em relação à localização da descarga.

A maneira mais adequada de se representar a precisão da localização de um evento é definir uma região (denominada de região de segurança) que detenha uma probabilidade específica (chamada nível de segurança) de conter todas as possíveis soluções em seu interior (Naccarato, 2002). A FIGURA ilustra uma distribuição gaussiana de erros de localização a partir da qual a região de segurança é determinada. A localização ótima da descarga está no ponto de menor probabilidade, que corresponde ao pico da distribuição de erros, onde a elipse tem a área minimizada, que equivale ao erro minimizado.

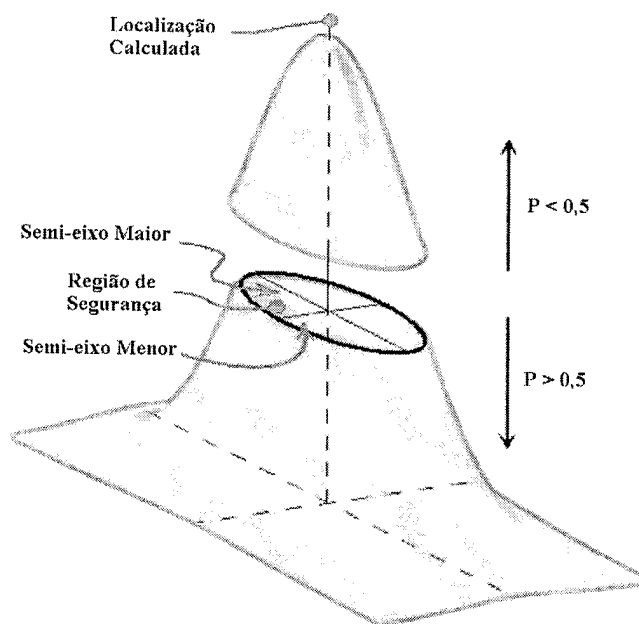


FIGURA 6 – Distribuição Gaussiana 3D dos Erros de Localização mostrando a localização estimada do evento no ponto de menor probabilidade (pico). O plano XY é o plano geográfico e o eixo Z a probabilidade/erro.

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

Eficiência de detecção individual de cada sensor da rede;

Número médio de sensores participantes nas soluções;

Linhas de base da rede (não deve ser maior que o alcance nominal de cada sensor);

Distribuição dos picos de correntes.

CAPÍTULO 2

O RELÂMPAGO

2.1 Eletrificação de uma Nuvem de Tempestade

Medidas de campo elétrico dentro das nuvens indicam a presença de várias regiões carregadas. No entanto, vistas a uma distância de alguns quilômetros, as nuvens de tempestades funcionam como um dipolo gigante, com um centro de cargas positivas situado de 1,0 a 1,5 km abaixo do topo, e um centro de cargas negativas entre as isotermas de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Há evidências também da existência de um pequeno centro de cargas positivas na base da nuvem (FIGURA), na isoterma com temperatura igual ou superior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Saba, 1997).

O início da eletrificação da nuvem é, usualmente, visto no solo pela reversão do campo elétrico vertical. Este chega a valores da ordem de 5000 V/m , enquanto o campo elétrico dentro da nuvem pode chegar a 400 kV/m , dando início a descargas elétricas dentro da mesma (Saba, 1997).

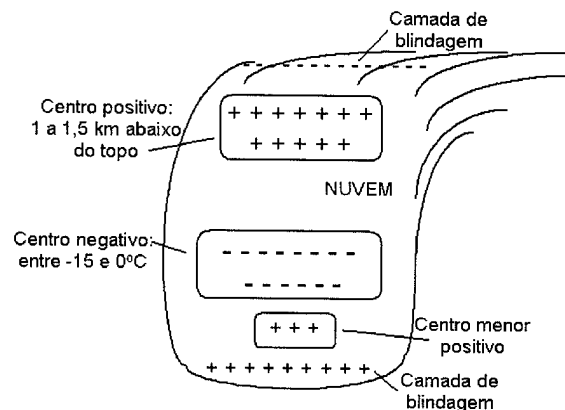


FIGURA 7 - Estrutura elétrica simplificada de uma nuvem Cumulonimbus. A distância média entre os centros positivo e negativo principais é de 2 a 3 km.

FONTE: adaptada de Saba (1997, p. 18).

A FIGURA 8 exibe uma fotografia aérea de uma Cumulonimbus. É possível observar seu topo aplainado com o formato de bigorna. O topo coincide com a tropopausa, perfazendo uma nuvem com grande extensão vertical (pode ultrapassar 10 km).



FIGURA 8 – Fotografia aérea de uma Nuvem de Tempestade (Cumulonimbus).

FONTE: Plymouth, 2004.

2.2 Tipos de Relâmpagos

Denominamos os tipos de relâmpagos em função de sua origem ou 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), (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 dentro da nuvem (intranuvem, IN) são mais extensos e frequentes (65% do total em latitudes médias e até 80% em baixas latitudes), 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. A sua maior frequência em baixas latitudes está associada com o perfil de temperatura típico destas regiões. As isotermas de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se encontram em altitudes maiores e, conseqüentemente, o centro de cargas negativo se encontra mais afastado do solo, propiciando uma maior porcentagem de descargas intranuvem.

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. São denominados normalmente 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 4 subtipos: NS negativo, NS positivo, SN negativo e SN positivo.

Os relâmpagos 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, equivalente à transferência de cargas positivas para o solo (Saba, 1997).

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

2.3 Relâmpago Nuvem-Solo

Como o presente trabalho visa filmar raios e os relâmpagos Solo-Nuvem são eventos raros, segue, nas próximas seções, uma introdução teórica para os Nuvem-Solo, objeto principal deste estudo.

2.3.1 Relâmpagos NS Negativos: etapas e características

Podemos dividir um relâmpago NS típico em 6 etapas: (a) descarga p-N, (b) líder escalonado, (c) descarga conectante, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno subsequente (FIGURA) (Saba, 1997):

a) Os relâmpagos negativos para o solo começam com uma **descarga entre o centro positivo menor na base da nuvem (p) e o centro negativo (N)** para a liberação dos elétrons ligados a partículas de água ou gelo.

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.

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 com picos de 40 kA (no caso de relâmpagos positivos, têm-se medido até 200 kA). A velocidade de propagação da frente de onda (e da luminosidade) é da ordem de 10^8 m/s. A duração de tal descarga é de aproximadamente 70 microssegundos. Em média, ocorrem três descargas por relâmpago (no caso dos positivos, apenas uma), mas há registros de casos com até 26 descargas.

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 10^7 m/s. Esta etapa ocorre somente quando, de alguma forma, existem cargas disponíveis próximas do canal feito anteriormente.

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.

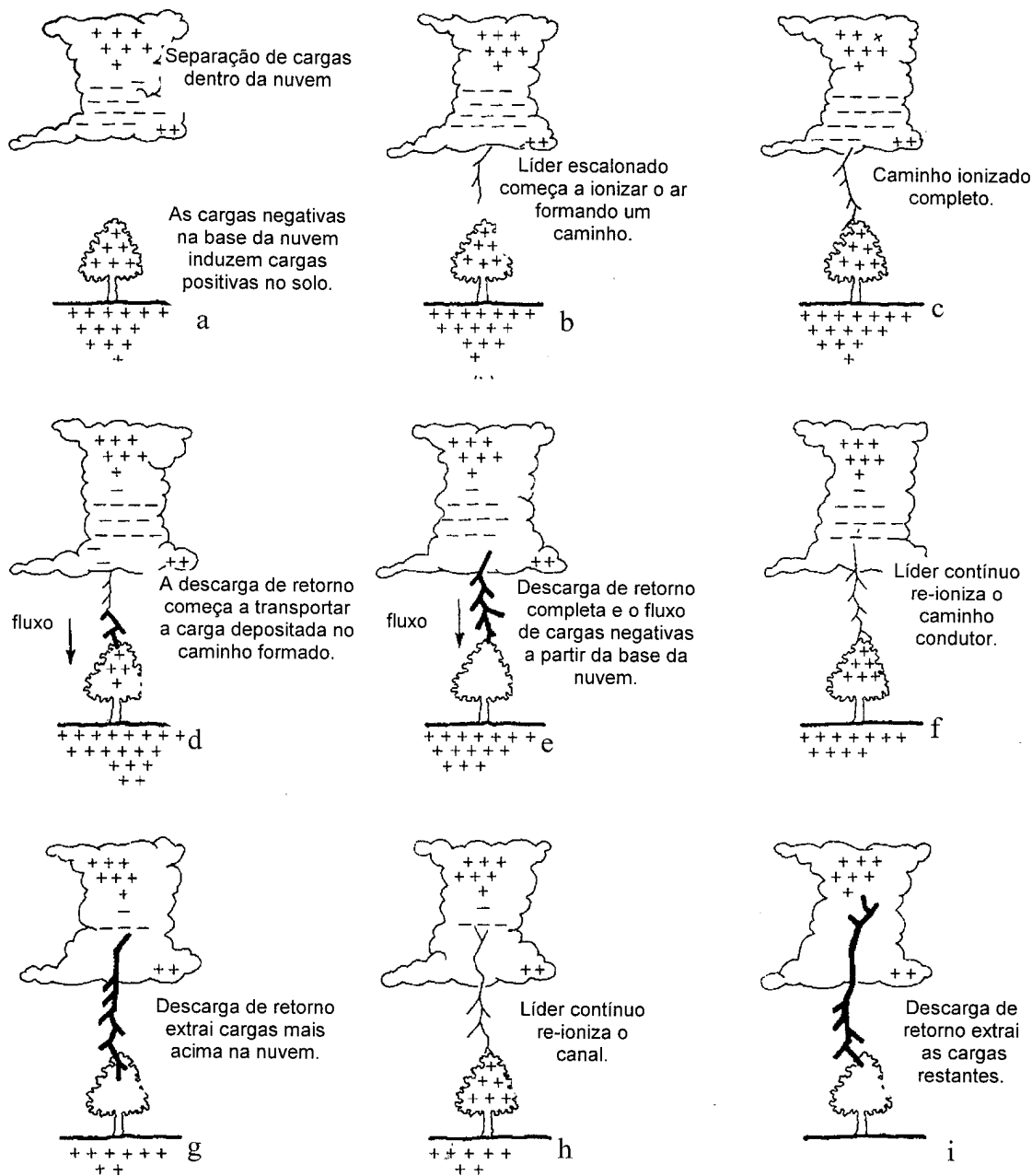


FIGURA 9 - Etapas de um relâmpago Nuvem-Solo negativo.

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

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

o limpador de pára-brisa de um automóvel. Em geral as descargas subseqüentes são menos ramificadas do que a primeira descarga de retorno.

Ainda, em cerca de 50% dos relâmpagos, a descarga de retorno é seguida por uma corrente contínua, de dezenas a centenas de ampères, durante um período maior que algumas centenas de milissegundos (Rakov et Uman, 2003). Há, no entanto, registros de correntes contínuas de até 70 kA durante 2,5 milissegundos. Relâmpagos que contém corrente contínua são chamados “relâmpagos quentes” e os que não a possuem, são chamados de “relâmpagos frios”. 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 10 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.

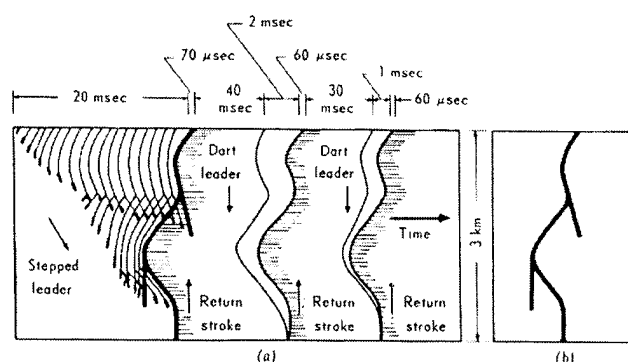


FIGURA 10 – (a) Ilustração das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está ilustrado o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).

FONTE: Uman (1984, p. 15).

A tabela abaixo exhibe as principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos NS negativos.

TABELA III - Principais características e correspondentes valores típicos apresentados na literatura internacional dos relâmpagos (Uman, 1987; Rakov et Uman, 2003).

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

Uman (1984), comentando uma coleção de 133 raios medidos, diz, com respeito ao intervalo de tempo entre descargas, que em 95% dos casos este tempo excedeu os 7 ms, 50% dos casos excederam os 33 ms e 5% dos casos excedeu os 150 ms.

2.3.2 Relâmpagos NS Positivos: etapas e características

“Os relâmpagos Nuvem-Solo Positivos seguem de um modo geral as mesmas etapas descritas para os negativos, porém com algumas diferenças” (Pinto et Pinto, 2000). Em geral, iniciam-se a partir de um líder com uma luminosidade mais fraca comparada ao líder escalonado de um N-S 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 N-S negativos, tornando-se mais destrutivos e sendo responsáveis pela maioria dos incêndios.

2.3.3 Canais Múltiplos

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

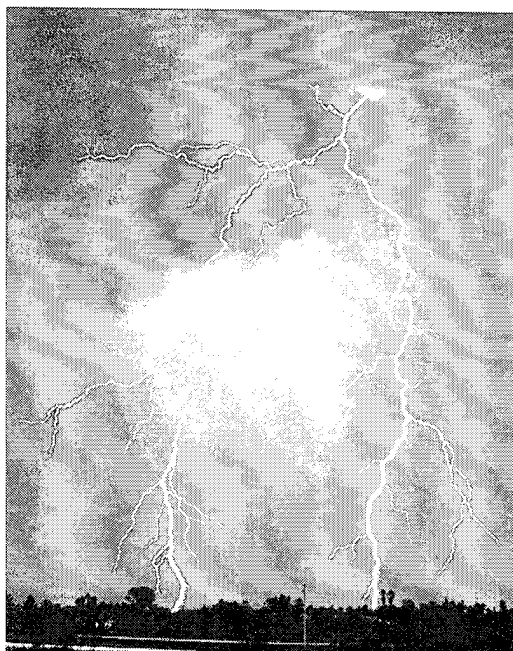


FIGURA 11 – Fotografia de raio com dois canais. É possível observar as ramificações do Líder Escalonado de cada um dos canais.

FONTE: fotografia de M. Garay.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Alterações no equipamento

A FIGURA mostra a fotografia uma do sistema de aquisição de imagens instalado num módulo móvel, projetado e construído durante este trabalho. Este módulo foi projetado para facilitar o posicionamento da câmera e dos equipamentos necessários ao seu funcionamento (computador, no-break, televisão, GPS, bateria automotiva e outros) durante as aquisições de imagens, possibilitando uma maior aquisição de raios durante uma mesma tempestade. Permitia também ser acomodado num porta-malas de um carro comum, facilitando o transporte da aparelhagem.



FIGURA 12 – Fotografia do sistema instalado no módulo móvel.

Um aspecto importante deste sistema está na sua sensibilidade para os diferentes comprimentos de onda. A FIGURA 13 mostra o gráfico fornecido pelo fabricante que relaciona responsividade e comprimento de onda do sinal de entrada.

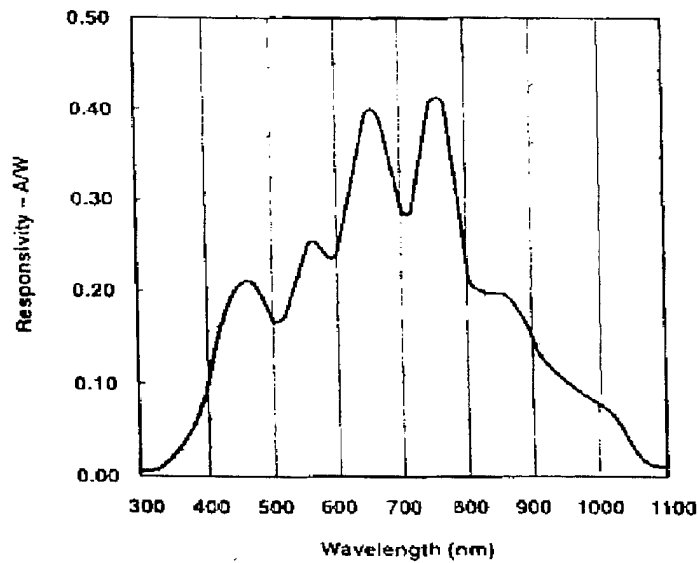
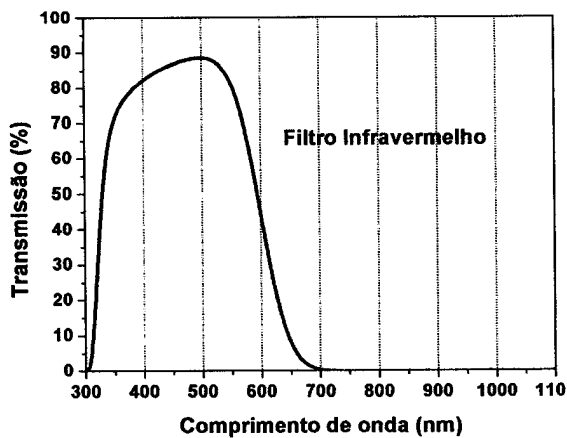


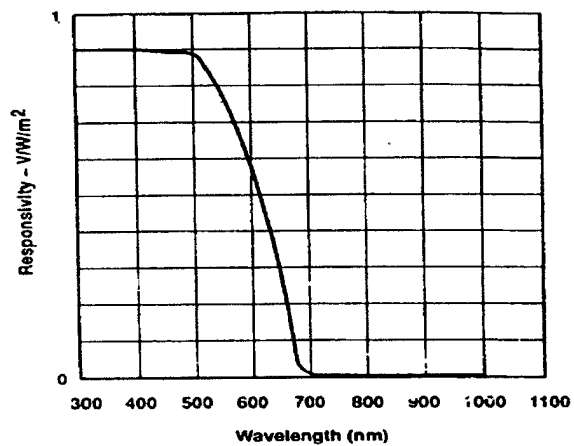
FIGURA 13 – Relação entre Responsividade do sensor CCD (A/W) e Comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas (acima de cerca de 700nm) em comparação com as componentes visíveis abaixo do vermelho (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 700 e 470 nm, respectivamente).

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

Originalmente, a câmera possuía um Filtro Infravermelho com curva característica exibida na FIGURA 14. Tal filtro foi substituído por uma lâmina de vidro, que tem sua Curva de Transmissão Ótica exposta na FIGURA 15. Nesta substituição, o registro do Líder Escalonado e da Descarga de Retorno (etapas do raio) foi amplificado na imagem por possuírem componentes infravermelhos nos seus espectros de emissão, possibilitando sua visualização e com isso determinar velocidade de propagação do canal, entre outras características. A FIGURA 16 mostra duas fotografias: uma da lâmina de vidro e do filtro e outra da câmera com seu sensor CCD exposto.



(a)



(b)

FIGURA 14 – Curvas Características de Responsividade e Transmissão do Filtro Infravermelho original da câmera (a) fornecida pelo fabricante e (b) ensaiada no INPE. Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o da câmera em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade (nitidez) da imagem.

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

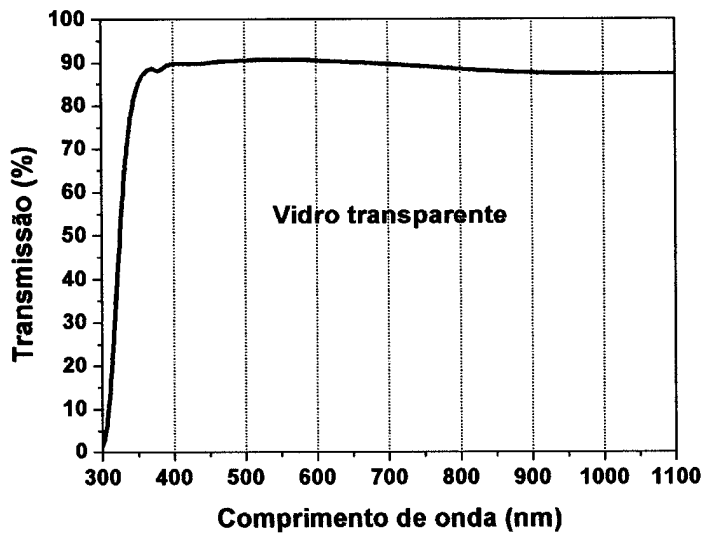


FIGURA 15 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera. Note que há passagem de praticamente todos os comprimentos de onda, ao contrário do que ocorria com o filtro infravermelho.

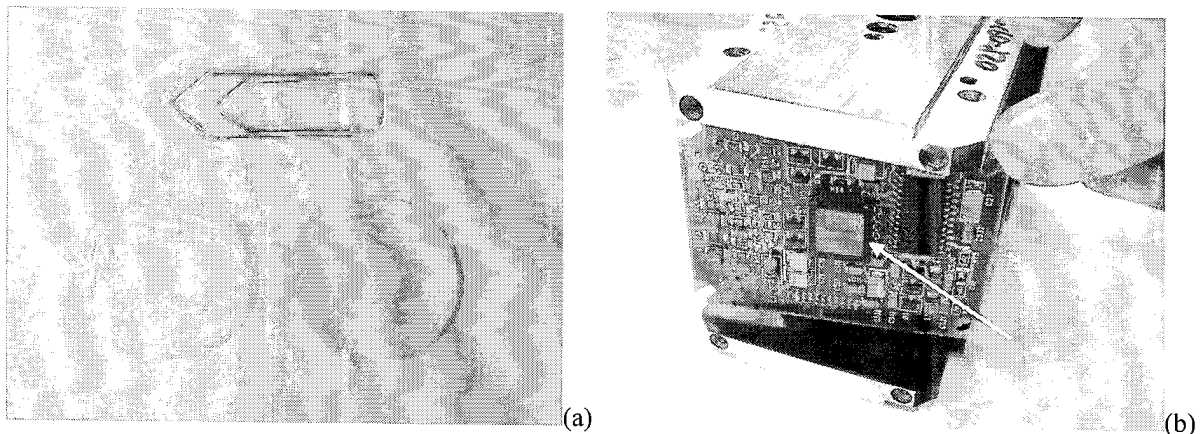


FIGURA 16 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

3.2 Dados Adquiridos

O banco de dados utilizado neste trabalho contém 314 vídeos referentes a 337 descargas atmosféricas, sendo que 39 vídeos foram obtidos no período de outubro de 2002 a março de 2004 e o restante foi obtido durante este trabalho. A distância entre o ponto de observação e o evento, para estes dados, varia de alguns poucos km até mais de 80 km, sendo que mais de 80% das amostras estão entre 10 e 40 km. A FIGURA mostra uma imagem de um dos raios filmados.

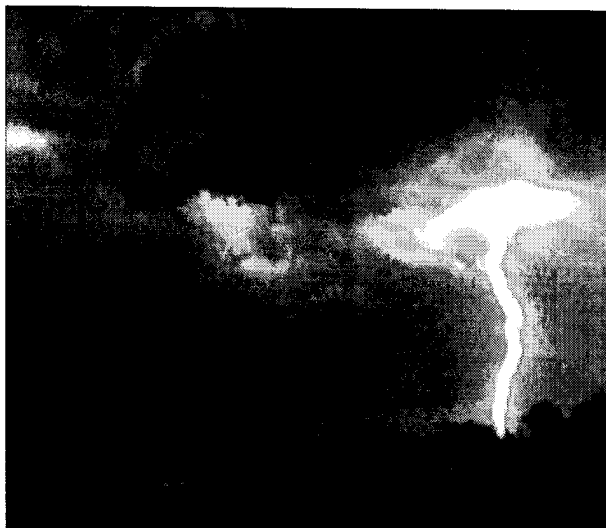


FIGURA 17 – Imagem de um relâmpago obtido com a câmera rápida (evento ocorrido em 07/nov/03 às 18:26:49,096 UT, observado da Torre-CTA). O relâmpago encontra-se a 8,96km do local de filmagem e apresentou uma corrente de -12,9kA.

3.3 Polaridade

A informação a respeito da polaridade dos relâmpagos registrados provém dos dados fornecidos pela rede de detecção. Esta informação é disponível mesmo não sendo computados os dados de localização pelo sistema. 245 relâmpagos tiveram sua polaridade determinada, sendo que cerca de 5% destes foram positivos. Este resultado está abaixo do esperado (cerca de 10%). Isto provavelmente se deve ao tamanho reduzido da amostra, da qual mais de 50% correspondem a apenas 4 tempestades. Os relâmpagos positivos normalmente ocorrem no final de uma tempestade, se houver sido filmado apenas os instantes iniciais de uma dessas, por exemplo, os resultados apresentar-se-iam distorcidos. Alguma anormalidade em uma dessas tempestades também poderia alterar significativamente os resultados.

3.4 Multiplicidade

O número médio de descargas por raio (multiplicidade média) foi calculado somente para os raios negativos, devido ao número limitado de dados referentes a relâmpagos positivos (12 relâmpagos totalizando 18 descargas). Os resultados estão representados na tabela.

Um cuidado especial foi tido em situações que poderiam reduzir a precisão da determinação da multiplicidade, como a ocorrência de raios muito próximos da câmera. Neste caso, os canais que ocorressem fora do campo de visão da câmera seriam perdidos. Este problema foi solucionado utilizando-se a câmera comercial Sony DC-TRV330 Digital 8, que possuía um maior ângulo de abertura, permitindo identificar descargas nuvem-solo que ocorressem fora do campo de visão da câmera rápida. Achou-se prudente descartar os casos em que o canal estava oculto devido ao relevo, difusos devido à chuva ou mesmo pouco nítidos para serem claramente identificados como nuvem-solo, considerando-se apenas aqueles cujo canal era visível, certificando-se assim que apenas descargas nuvem-solo seriam levadas em consideração.

TABELA IV– Número de descargas por raio e porcentagem de raios com uma única descarga

Estudo	Local e latitude	No. total de raios	Multiplicidade de média	Multiplicidade de máxima	% de raios com uma única descarga
Cooray and Perez (1993)	Uppsala, Suécia 60° N	137	3.4	10	18
Kitagawa et al. (1962)	Socorro, NM, EUA 34° N	193	6.4	26	14
Rakov et al. (1994)	Tampa, FL, USA 27.4° N	76	4.6	18	17
Cooray and Jayaratne (1994)	Colombo, Sri Lanka 12° N	81	4.5	12	21
Estudo presente	S. José dos Campos, SP, Brasil 23° S	144	3.6	13	25

Rakov e Huffines, 2003, relataram que se a possibilidade de se perder descargas é praticamente descartada, a maioria dos relâmpagos negativos nuvem-solo (80% ou mais) contém mais de uma descarga, independentemente da localização geográfica e do tipo de tempestade. Baseado no resultado obtido neste estudo, verificou-se que esta porcentagem talvez devesse ser abaixada para cerca de 75%, e que fosse dependente das características geográficas.

3.5 Intervalo entre descargas sucessivas

Assim como foi feito no cálculo da multiplicidade, utilizou-se apenas os raios cujo canal era visível para avaliar o intervalo entre descargas sucessivas, totalizando 339 intervalos de raios positivos e negativos. A distribuição destes intervalos consta no gráfico a seguir.

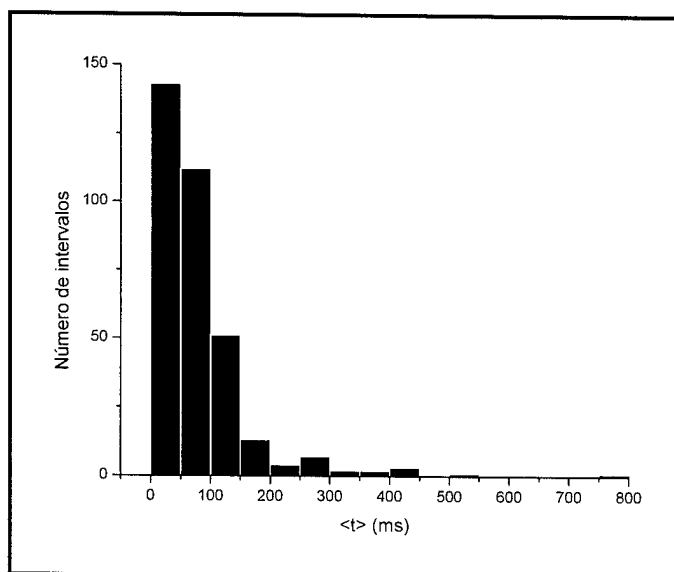


FIGURA 18 – Intervalo entre descargas sucessivas de um mesmo raio referente.

Analisando-se os dados, concluímos que o intervalo entre descargas segue uma distribuição lognormal com confiança de 5%. Esta tendência foi relatada em diversos outros estudos na literatura. Sendo assim, temos que o logaritmo natural do intervalo entre descargas sucessivas é descrito por uma distribuição normal, como se pode ver no gráfico ao lado:

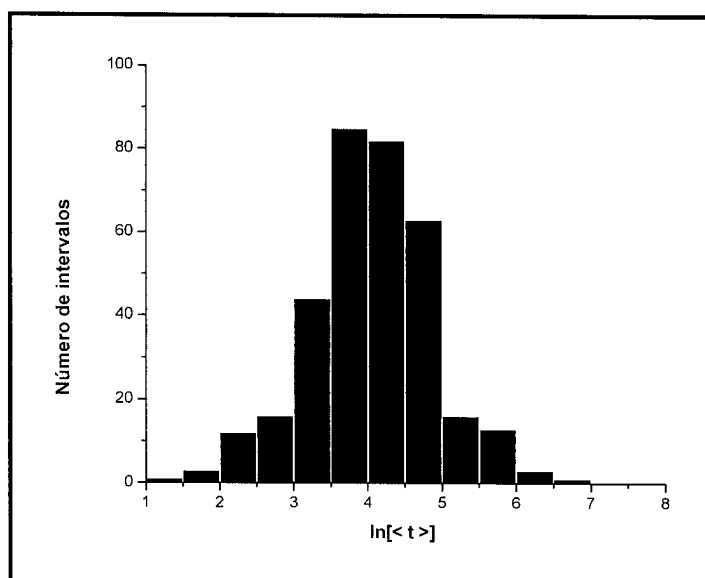


FIGURA 19 –Logaritmo natural do intervalo entre descargas sucessivas de um mesmo raio referente.

Fazendo-se esta consideração, foi possível determinar a função distribuição de probabilidade que descreve o intervalo entre descargas sucessivas. Isto foi feito através da determinação dos valores da média e da variância de $\ln t$, obtendo respectivamente 4,04 e 0,68, e em seguida substituindo estes valores na função distribuição de probabilidades lognormal, obtendo o seguinte, onde t é expresso em ms:

$$f(t) = \frac{0,48}{t} e^{-0,73(\ln t - 4,04)^2}$$

Desta forma, é possível calcular a probabilidade de que o intervalo entre duas descargas sucessivas assuma qualquer valor, bastando integrar a função acima nas proximidades do ponto. Para se calcular a probabilidade de se obter um intervalo de 50 ms entre duas descargas, por exemplo, é necessário integrar a função acima entre 49,5 ms e 50,5 ms, considerando-se uma distribuição discreta que varia a cada ms. Esta integração, no entanto, é de difícil obtenção, sendo mais útil utilizar a seguinte propriedade da distribuição lognormal:

$P(t \leq t_0) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)$, onde μ é a média e σ é o desvio padrão já determinados, e Φ é a função distribuição de probabilidades acumulada de uma distribuição normal padronizada ($\mu=0$ e $\sigma=1$). Essa equação nos diz que se quisermos saber a probabilidade de que o intervalo entre duas descargas sucessivas seja inferior a determinado t_0 , basta calcular o valor de $\Phi(t_0)$. Este valor é de fácil obtenção, pois pode ser obtido através de tabelas ou mesmo utilizando-se uma calculadora científica.

A tabela mostra outros parâmetros desta distribuição e de outra similar relatada por Thomson et al., 1984.

TABELA V – Resumo estatístico do intervalo entre descargas sucessivas

Dado base	N	Min	Max	<t>	σ	x_G	σ_{Log}
Este estudo	339	3 ms	782 ms	79,8 ms	82 ms	57 ms	0,36
Thomson et al., 1984	310	9 ms	495 ms	90 ms	77 ms	69 ms	0,32

N é o tamanho da amostra, <t> a média, σ o desvio padrão, x_G a média geométrica, e σ_{log} o desvio padrão para $\log_{10} x$.

Os valores estatísticos obtidos neste estudo são relativamente similares aos obtidos por Thomson et al., 1984. A maior diferença, em percentual, foi o intervalo máximo entre descargas (782 ms). Este valor elevado ocorreu entre a segunda e a terceira descarga de um raio negativo. Após a segunda descarga, seguiu-se uma corrente contínua de 542 ms, o que explica em parte porque este intervalo foi tão longo.

Praticamente todas as redes de detecção de relâmpagos consideram que as descargas que compõem um raio ocorrem em menos de 500 ms da descarga anterior. Se este critério for aplicado a este caso particular, com cinco descargas, este raio seria considerado como tendo apenas 2 descargas. A terceira seria considerada a primeira de um outro raio, que possuiria 3 descargas ao todo. Esta descarga foi também a mais intensa de todo o conjunto, detectada pela rede de detecção de relâmpagos. O pico de corrente foi -164 kA, aproximadamente o dobro da segunda mais intensa (-89 kA) em uma distribuição cujo valor médio foi -13 kA.

Uma outra característica importante desta distribuição é que 73 dos intervalos entre descargas (21,5%) apresentam valores menores que 33 ms. Este é justamente o tempo entre dois quadros consecutivos em uma câmera de vídeo convencional, com uma taxa de aquisição de 30 quadros por segundo. Utilizando uma dessas câmeras, não seria possível distinguir duas descargas ao longo do mesmo canal separadas por um pequeno intervalo de tempo, que compreendesse um ou dois quadros adjacentes. Ao mesmo tempo, se não houver um acréscimo evidente de luminosidade na filmagem, a segunda imagem pode ser interpretada como uma corrente contínua em seguimento à primeira descarga (Idone et al., 1998).

Isso significa que 21,5% do número total de descargas poderia ser perdido se fosse utilizada apenas uma câmera convencional com resolução temporal de 33ms. Um resultado similar (18%) foi obtido por Thomson et al., 1984, que utilizou um sistema de medição de campo elétrico como técnica auxiliar no processo de identificação de descargas registradas por uma camera convencional.

3.6 Duração total dos raios negativos

Para conhecer a duração total dos relâmpagos nuvem-solo, é necessário conhecer o tempo da primeira descarga, o tempo da última e também seu tempo de corrente contínua. Utilizando novamente apenas os raios com canal visível, foi possível determinar o tempo da primeira descarga com grande exatidão e precisão. As descargas subseqüentes tendem a ser menos intensas, e suas correntes contínuas menos intensas ainda. No caso destas últimas, é possível que não haja luminosidade suficiente para sensibilizar o CCD da câmera rápida, portanto há uma certa imprecisão no tempo do término do raio, referente à determinação do tempo de corrente contínua da última descarga. Este problema foi minimizado utilizando-se apenas os com mais de uma descarga, de forma que o tempo de corrente contínua da última descarga fosse muito menor que o intervalo entre duas descargas sucessivas, reduzindo sua relevância na duração da duração total do raio. Os resultados constam na tabela abaixo.

TABELA VI – Resumo estatístico da duração total dos raios negativos com canais múltiplos

N	Min	Max	Média	Mediana	σ
121	30 ms	1004 ms	315 ms	212 ms	246

N é o tamanho da amostra, σ o desvio padrão.

Como se pode ver na tabela, o valor esperado da duração de um raio negativo com canais múltiplos é 315 ms. Segundo Rakov e Uman, 2003, este valor encontra-se entre 200ms e 300 ms, compatível com o observado. Observando o desvio padrão, pode-se perceber que esta distribuição é bastante esparsa, sendo que 50% da amostra encontra-se abaixo de 212 ms e 61% abaixo de 315 ms, ou seja, abaixo da média.

3.7 Eficiência do sistema de detecção

Com os dados fornecidos pela RINDAT e as imagens da câmera rápida, ambos contendo o tempo das descargas com precisão de milissegundos, foi possível calcular a eficiência de detecção. Este valor corresponde à fração de raios filmados que foram detectados, sendo considerado novamente apenas os raios com canal visível, atribuindo assim maior confiança ao resultado obtido. Para a definição da eficiência de detecção, utilizou-se a premissa, também assumida por Idone et al., 1998, que se uma descarga foi detectada, o raio é considerado como tendo sido detectado.

A possibilidade de duas descargas acontecerem no mesmo milissegundos é muito rara, sendo por isso descartada. Entretanto, mesmo assim, foi verificado se a localização da descarga dada pela RINDAT estava dentro da área em estudo, definida pelo campo de visão da câmera.

A Tabela mostra a eficiência de detecção da rede em termos de descargas e raios para todos os relâmpagos nuvem-solo (negativos, positivos e de polaridade indefinida). Os dados providos pela rede foram apenas os de tempo real.

TABELA VII - Eficiência de detecção de raios e descargas

	Este estudo	Prevista pela RINDAT
Número de raios	144	-
<i>Porcentagem detectada</i>	68%	80-90%
Número de descargas	519	-
<i>Porcentagem detectada</i>	47%	~ 50%

A partir destes resultados, pode-se concluir que a eficiência de detecção de raios foi inferior à prevista pelo sistema de detecção. O valor previsto foi relatado por Cummins et al., 1998, e está entre 80% e 90% para raios cujo pico de corrente do primeiro stroke é superior a 5kA. É provável que parte dos raios filmados não tenha atingido este pico de corrente, reduzindo assim a eficiência encontrada. Este valor também se refere a uma distribuição homogênea das antenas de detecção, e não leva em consideração características geográficas, condições que se distanciam das reais. Outro motivo pelo qual a eficiência foi abaixo da esperada é o fato de haver algumas antenas de detecção inativas durante alguns períodos de aquisição de dados. Sabe-se também que as principais antenas que participam da detecção na região em que foi feita a aquisição de dados estão localizadas em São José dos Campos, Cachoeira Paulista e Pirassununga, onde estão instaladas antenas IMPACT, estando as duas primeiras bem próximas aos locais de observação. Estas antenas, no entanto, não detectam descargas num raio menor que 10km do ponto onde estão instaladas, portanto não contribuíram na detecção dos raios que ocorreram numa distância inferior à referida, sendo outro motivo pelo qual a detecção não atingiu a esperada.

Esta situação, no entanto, não se aplica à eficiência de detecção de descargas, a qual foi muito próxima do valor esperado.

3.8 Precisão de localização

Com as duas câmeras localizadas no mesmo local, não foi possível determinar a localização das descargas utilizando a intersecção dos azimutes, como fez Idone et al., 1998. No entanto, verificamos a localização (latitude e longitude) fornecida pela rede para 18 raios com múltiplas descargas detectadas, as quais possuem o mesmo ponto de contato no solo, o que pode ser verificado através das imagens. Através da distância de ocorrência desses raios, foi possível estimar que era possível diferenciar quaisquer dois canais que possuíssem pontos de contato separados por mais de 90m (a uma distância máxima de 45 km do local de observação) no plano da imagem filmada. A FIGURA mostra o modo utilizado para se determinar o erro máximo do sistema.

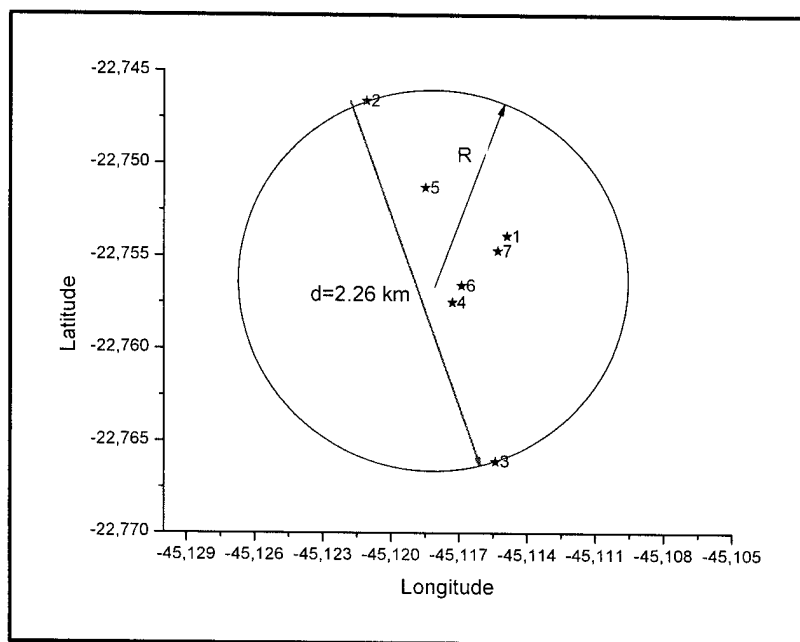


FIGURA 20 – Determinação do erro máximo do sistema. Os pontos numerados representam os pontos de ocorrência das descargas, d é a distância entre os dois pontos mais distantes e R é o raio da circunferência centrada que passa pelos dois pontos e possui seu centro no seguimento que os une.

Utilizou-se como parâmetro para representar o erro máximo do sistema a máxima distância entre dois pontos de ocorrência de descargas acusado pelo sistema, representado por d na

FIGURA 20. Isto foi feito por efeito de simplificação, tendo em vista a não linearidade dos parâmetros em questão (posição das descargas), resultante da região de incerteza da ocorrência de cada uma, descrita mais detalhadamente na seção 1.3.4. Pela figura, pode-se perceber que a distância entre uma descarga e o ponto de maior probabilidade de ter ocorrido o relâmpago é menor que d . Desta forma, o máximo erro do sistema é superestimado. Entretanto, pode-se perceber também que esse erro é superior ao valor de $R=d/2$, o que nos permite concluir que o erro máximo encontra-se no intervalo $[d/2, d]$.

A FIGURA 21 mostra a distribuição da estimativa feita para o máximo erro dado pela rede para descargas pertencentes a raios com um único canal.

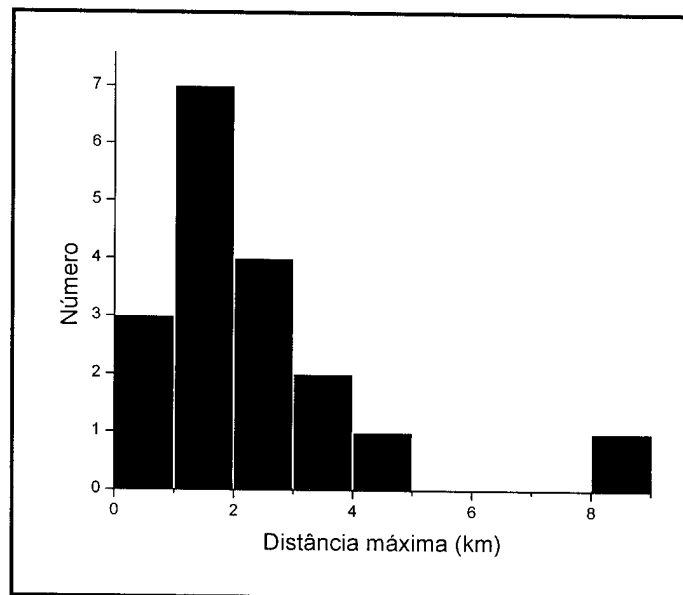


FIGURA 21 – Estimativa do erro máximo do sistema de detecção

Dos diagrama acima, obtém-se que o erro máximo médio do sistema é cerca de 2,4 km. Ou seja, $\bar{d} = 2,4km$ e $\bar{d}/2 = 1,2km$. Este valor é maior que o esperado para uma rede bem ajustada, 0,5 km. Uma possível causa deste erro, foi o fato dos dois sensores IMPACT mais próximos ao local de observação não terem operado no momento de ocorrência dos raios. Outra possível causa refere-se às condições geográficas, como, por exemplo, a existência de um obstáculo, como uma cadeia de montanhas, entre o ponto de ocorrência da descarga e o sensor de detecção, que é desconsiderada por este. Ao contornar o obstáculo, a onda eletromagnética percorreria um percurso mais longo até o sensor, aparentando estar “mais

longe” e causando um erro na determinação da localização. Ainda, 50% das 75 descargas que compunham os 18 raios analisados, tiveram um pico de corrente inferior a 9kA, o que de alguma forma comprometeu a eficiência da rede.

3.9 Velocidade do líder escalonado

Para os raios cujo canal era visível e que foram detectados pelo sistema, foi possível estimar a velocidade de propagação do líder escalonado, quando este também era visível e era registrado em mais de um quadro (FIGURA).

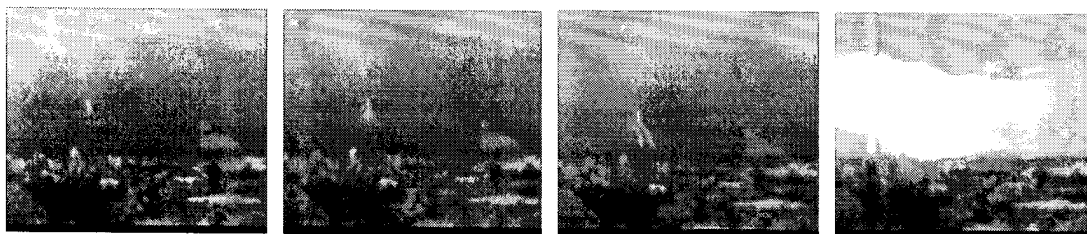


FIGURA 22- Alguns quadros da filmagem com a câmera rápida de um raio natural. Pode-se observar a presença do líder escalonado em vários quadros.

Através dos dados do sistema, foi possível estimar a distância até o ponto de contato com o solo (conhecendo-se a latitude e a longitude do local de observação e da descarga), determinando-se então o comprimento do campo visual da câmera e o comprimento de cada pixel. Sabendo-se o tempo entre as imagens calculou-se a velocidade média para 8 descargas. Esta velocidade foi calculada utilizando como referência apenas dois pontos: o ponto de surgimento do líder escalonado e o ponto em que toca o solo. Desta maneira, a velocidade encontrada, é sua velocidade em linha reta (no plano da imagem filmada).

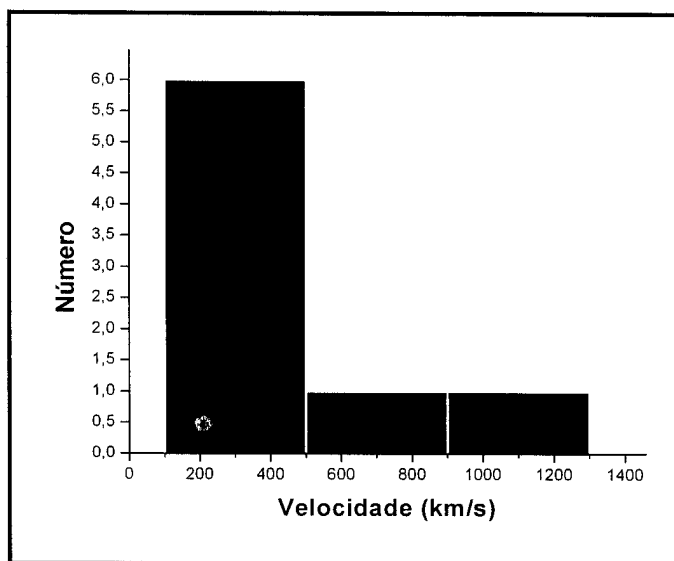


FIGURA 24 – Velocidade de propagação do líder escalonado (1D)

TABELA VIII – Resumo estatístico da velocidade do líder escalonado (1D)

N	Min	Max	Média	Mediana	σ
8	$1,2 \times 10^5$	$1,1 \times 10^6$	$3,9 \times 10^5$	$2,1 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$

N é o tamanho da amostra, σ o desvio padrão.

Sabe-se, no entanto, que o líder escalonado não se propaga em linha reta, e sim por um caminho bastante tortuoso. Para se determinar sua velocidade de propagação real, considerando todo o percurso até tocar o solo, utilizou-se um fator de correção $f = (H/h)^{0,27}$ (Wang et al. 1998), onde H é a altura da ponta do líder escalonado e h é seu passo (no caso, 50m). Para os raios filmados, estimou-se $H \sim 1,5$ km, resultando em $f = 2,5$. Os resultados constam no histograma da FIGURA 24.

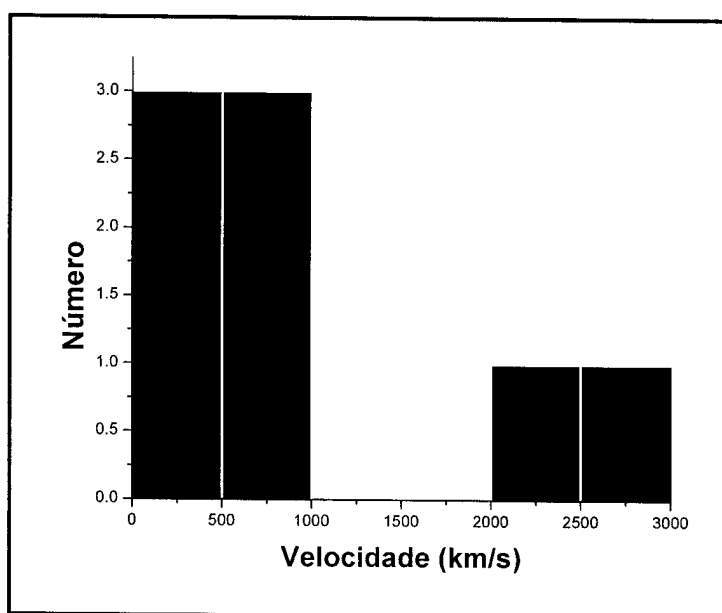


FIGURA 24 – Velocidade de propagação do líder escalonado corrigida (3D)

Mais detalhes desta distribuição constam na tabela.

TABELA IX – Resumo estatístico da velocidade do líder escalonado corrigida (3D)

N	Min	Max	Média	Mediana	σ
8	$3,0 \times 10^5 \text{ m/s}$	$2,7 \times 10^6 \text{ m/s}$	$9,7 \times 10^5 \text{ m/s}$	$5,3 \times 10^5 \text{ m/s}$	$9,4 \times 10^5 \text{ m/s}$

N é o tamanho da amostra, σ o desvio padrão.

Baseado em imagem 2D, Rakov et al., 2003, obteve uma velocidade de propagação do líder escalonado próxima a $2 \times 10^5 \text{ m/s}$, resultado próximo ao encontrado neste trabalho. Vale ressaltar também que 50% dos líderes escalonados tiveram velocidade de propagação em linha reta inferior a $2,1 \times 10^5 \text{ m/s}$, resultado mais próximo ainda do valor típico encontrado na literatura. Para o caso 3D, os resultados encontrados são muito superiores ao caso 1D, o que se deve à tortuosidade do caminho percorrido, que não pôde ser avaliada através das imagens devido à insuficiência de resolução temporal. Seria possível avaliar sua tortuosidade com uma maior resolução temporal, da ordem de microssegundos, muito superior à utilizada.

A amostra utilizada aqui é, entretanto, muito pequena, não podendo ser tomada como representativa de toda a realidade. Melhores resultados poderiam ser obtidos com a ampliação da amostra.

3.10 Raios bifurcados

Através das imagens, foi possível determinar também a porcentagem de raios bifurcados, ou seja, a fração de raios que possuem mais de um canal, tocando o solo em mais de um ponto (FIGURA).



FIGURA 25 – Imagem de um relâmpago nuvem-solo bifurcado obtido com a câmera rápida. Note que há dois canais distintos tocando o solo.

De toda a amostra, selecionou-se aquelas cujos canais eram visíveis, não havendo dúvidas de que o raio era bifurcado, obtendo um 46% de raios bifurcados em uma amostra de 101 raios.

3.11 Corrente contínua

Determinou-se também a porcentagem de raios com corrente contínua longa, definindo-se corrente contínua aquelas que possuem duração superior a 40 ms. De toda a amostra, selecionou-se aquelas cujo canal era visível, de forma a não haver dúvida quanto à ocorrência ou não de corrente contínua, obtendo-se a distribuição ao lado.

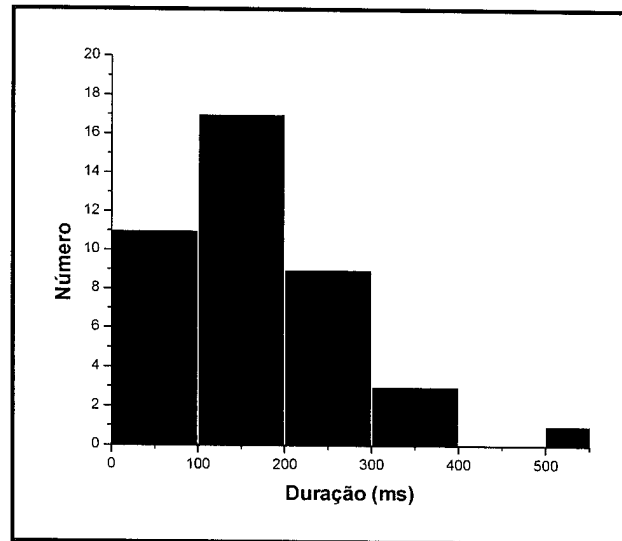


FIGURA 26 – Duração da corrente contínua

Foram analisados 135 raios, dos quais 27% possuíam corrente contínua. Com relação às descargas, apenas 8% das 444 analisadas possuíam corrente contínua. Este resultado é interessante, pois fornece a proporção com que ocorrem relâmpagos quentes, que são entre os relâmpagos, os principais responsáveis por danos a instalações residenciais, redes de distribuição e transmissão de energia elétrica, linhas telefônicas, sistemas eletrônicos de equipamentos, entre outros. Mais detalhes desta distribuição constam na tabela abaixo.

TABELA X – Resumo estatístico do tempo de duração da corrente contínua

N	Min	Max	Média	Mediana	σ	t < 250 ms
135	40 ms	542 ms	159 ms	150 ms	100 ms	90%

N é o tamanho da amostra, σ o desvio padrão.

Através deste dados pode se ver que na grande maioria dos raios com corrente contínua, esta assume valores inferiores a 250 ms de duração.

Segundo Rakov et al., 2003, o valor médio da duração da corrente contínua é de 100 ms. O que difere dos resultados encontrados neste trabalho (159ms).

3.12 Vídeo 237: estudo de caso

Apenas para efeito de exemplificação das análises feitas aqui, vamos estudar o caso do evento registrado no vídeo 237. Este raio possui 4 descargas, sendo que é possível também observar líder escalonado, corrente contínua de 200 ms e a ocorrência de canais múltiplos. As descargas tocaram o solo a uma distancia média do observador de 22 km. A FIGURA 2.11 mostra alguns quadros deste vídeo. A multiplicidade do raio medida pelo sistema foi 2, mas pelo vídeo rápido sabemos que é 4. Pode-se ver também pelas imagens que houve bifurcação do canal principal, sendo que nem todas as descargas possuíram o mesmo canal.

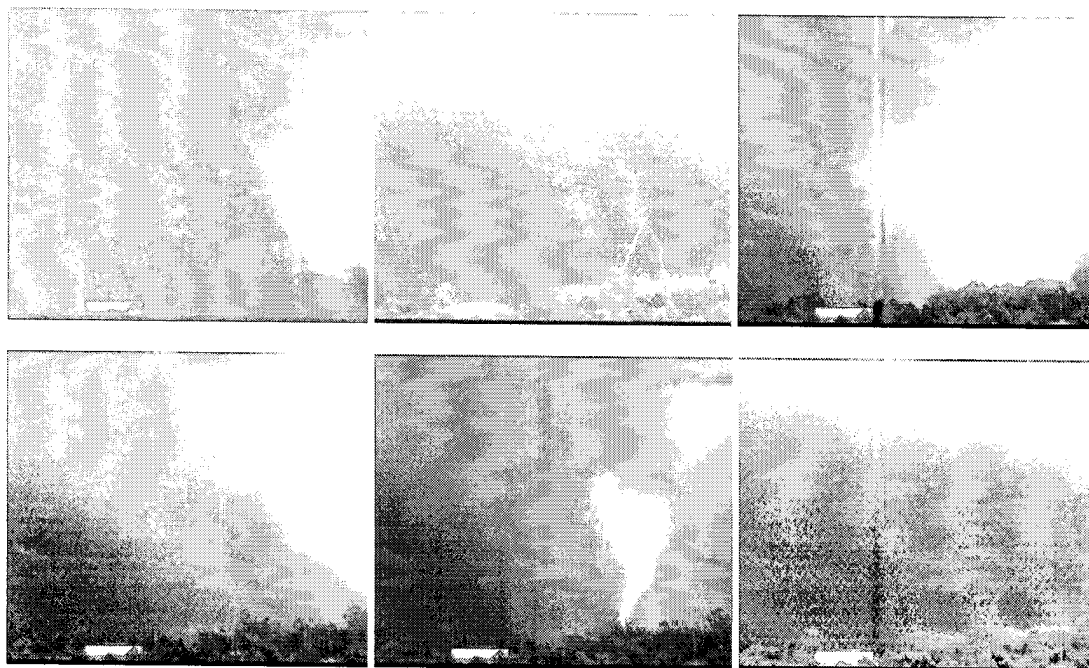


FIGURA 27 – Seqüência de quadros do vídeo 237 (evento ocorrido em 29/mar/04 às 17:12:43 UT, observado da Torre-CTA). Da esquerda para a direita: 1ª descarga de retorno (DR); líder escalonado da 2ª DR; 2ª DR; 3ª DR ocorrida fora; 4ª DR; corrente contínua da 4ª DR.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta e aperfeiçoada uma nova técnica de se determinar, com precisão, características importantes dos relâmpagos. Esta técnica, baseada na utilização de tempo sincronizado via GPS e filmagem com alta resolução temporal, foi também capaz de monitorar a performance da RINDAT em termos de eficiência de detecção e localização. Obteve-se uma massa de dados sete vezes maior que a massa de dados obtida no verão passado, aprimorando de sobremaneira os resultados obtidos.

A determinação de algumas características dos relâmpagos e a avaliação do desempenho do sistema de rede de detecção de relâmpagos brasileiro foram apresentadas pela primeira vez no Brasil. Esses resultados são de considerável importância, não só para se determinar a variação devido às diferenças geográficas relativa à pesquisa de relâmpagos, ampliando a compreensão do fenômeno, mas também para a indústria elétrica e outros usuários que se beneficiam dos dados fornecidos pela RINDAT.

Aprimorações nos resultados obtidos serão efetuadas com o aumento da massa de dados obtida, o que será possível com aquisição de mais dados nos próximos verões. Desta forma, será possível obter uma massa de dados suficientemente grande para se afirmar com maior precisão os parâmetros aqui discutidos. Também se espera determinar com maior clareza a existência ou não de peculiaridades regionais no Brasil do fenômeno em estudo, como acontece no Japão e em algumas regiões dos Estados Unidos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de demonstrar meu profundo agradecimento ao Prof. Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, orientador desta iniciação científica, bem como aos demais membros do ELAT, que tanto me apoiaram neste trabalho: Osmar Pinto Júnior, Fernando Júnio de Miranda, Mauricio Grade Ballarotti, Evandro de Carvalho Ferraz, Vítor Antonio Portezani e Kleber Pinheiro Naccarato. Destino meus agradecimentos também aos parceiros do INPE neste projeto, os quais tive a oportunidade de conhecer e trabalhar em conjunto durante o período de um mês no CIPRIN, em Cachoeira Paulista, aos membros da Coordenação Local do PIBIC e ao CNPq.

TRABALHOS PUBLICADOS

Obteve-se as seguintes publicações com a realização deste trabalho.

Saba, M.; Pinto Jr, O.; Cabral, G. F.; Ballarotti, M. G.; Naccarato, K. P. **Monitoring the performance of the Brazilian lightning detection network by means of a high-speed camera.** No prelo, 18th ILDC International Lightning Detection Conference, Junho, 2004.

Saba, M. M. F.; Naccarato, K. P.; Pinto Jr, O.; Cabral, G. F. **Imaging atmospheric discharges with high-speed cameras.** SIPDA, VII Simpósio Internacional de Proteção Contra Descargas Atmosféricas, 2003, Curitiba. Lene Gráfica & Editora, 2003, p. 14-16.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The Atmosphere**. 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982.
- Naccarato, K.P. **Tópicos em eletricidade atmosférica**. São José dos Campos. 155p. (INPE-9387-PUD/118). Exame de Qualificação (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- Plymouth State University Meteorology Program Cloud Boutique**. Disponível em HTTP://VORTEX.PLYMOUTH.EDU/PSC_CB_SCHMITZ.JPG no dia 5 de maio de 2004.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge, 2003.
- Rakov, V. A.; Huffines, G. R. **Return-Stroke Multiplicity of Negative Cloud-to-Ground Lightning Flashes**. Journal of Applied Meteorology: vol. 42, p. 1455-1462, oct 2003.
- Red Lake. **Instructions for Operating**. Manual no. 9400-0010. Revision S. San Diego: feb., 2002. www.redlake.com.
- RINDAT - **Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas**. Disponível em <HTTP://WWW.RINDAT.COM.BR> no dia 5 de maio de 2004.
- 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.
- Schulz, W. **Performance evaluation of lightning location systems**. Vienna, Austria: Technical University fo Vienna, Faculty of Electrical Engineering, 1997. Ph.D. Thesis, 136 p.

- Thompson, E. M.; Galib, M. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J. **Some Features of Strokes Occurrence in Florida Lightning Flashes.** Journal of Geophysical Research: vol. 89, n. D3, p. 4910-4916, jun 20, 1984.
- Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J.; Shelukhin, D. V. **Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations.** J. Geophysical Research, vol. 97, n. D7, p. 7503-7509, May 20, 1992.
- Uman, M. A. **Lightning.** New York: Dover, 1984.
- Wang, Y.; DeSilva, A. W.; Goldenbaum, G. C., Nitric oxide production by simulated lightning: dependence on current, energy, and pressure. J. Geophysical Research, vol. 103, n. D15, p. 19,149-19159, August 20, 1998.
- Wood, R. A. **When lightning strikes!** Weatherwise, vol. 41, n. 4: 206-210, 1988.
- Idone, V. P., D. A. Davis, P. K. Moore, Y. Wang, R. W. Henderson, M. Ries, and P. F. Jameson, **Performance evaluation of the U. S. National Lightning Detection Network in Eastern New York,** J. Geophys. Res., 103, 9045-9555, 1998.
- Devore, Jay L., **Probability and statistics for engineering and the sciences,** Hardcover, 1987.