



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.05.12.42-TDI

ESTUDO DE SPRITES ATRAVÉS DE TRIANGULAÇÃO

André Arruda Rodrigues de Moraes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pela Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares, aprovada em 20 de agosto de 2013.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EPMD5B>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.05.12.42-TDI

ESTUDO DE SPRITES ATRAVÉS DE TRIANGULAÇÃO

André Arruda Rodrigues de Moraes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pela Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares, aprovada em 20 de agosto de 2013.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EPMD5B>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Morais, André Arruda Rodrigues.

M792e Estudo de Sprites através de triangulação / André Arruda Rodrigues de Moraes. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxiv + 83 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.05.12.42-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
Orientador : Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares.

1. sprite. 2. triangulação. 3. relâmpago. I.Título.

CDU 551.594



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

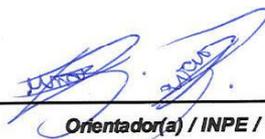
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Geofísica Espacial

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Hans Nielsen



Convidado(a) / UAF / Alasca - EUA

Dr. Ivan Soares Ferreira



Convidado(a) / UNB / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): **André Arruda Rodrigues de Moraes**

São José dos Campos, 20 de Agosto de 2013

*"Não se pode ensinar nada a um homem, só é possível ajudá-lo a encontrar a resposta dentro de si."
Galileu Galilei*

À minha família e à memória do meu avô.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Durval Antônio Rodrigues de Moraes e Lúcia Helena Arruda Rodrigues de Moraes e ao meu irmão Henrique Arruda Rodrigues de Moraes pelo apoio incondicional durante todas as etapas deste trabalho. Aos meus tios e primos que sempre estavam lá quando eu precisava e quando eu não precisava.

A minha orientadora Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares pelas várias horas de discussão e auxílio em questões que envolvem não apenas este trabalho mas a minha vida. Sem a atenção e dedicação recebida, este trabalho não seria possível.

Aos professores do Curso de Geofísica Espacial do INPE pelas aulas ministradas que ajudaram em meu crescimento profissional assim como apoio fora das aulas.

Aos pesquisadores presentes nas campanhas de 1996 e 1999 no EUA, que nos forneceram os dados utilizados nesse trabalho, em especial Dr. Dave Sentman, Dr. Eugene Wescott, Dr. Michael Taylor, Dr. Stenbaek-Nielsen que forneceu o programa utilizado para análise e Dr. Earle Williams pelas discussões envolvendo resultados e metodologias do presente trabalho.

Aos colegas de trabalho que fazem ou fizeram parte do grupo ACATMOS, em especial Jeison Santiago, Rodrigo Azambuja e Ronald Winnkelman.

Ao INPE por providenciar uma estrutura de trabalho incomparável e à CAPES pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação do INPE que me deu a possibilidade de ir em conferências que ajudaram muito no meu crescimento profissional.

RESUMO

Neste trabalho várias características de 274 sprites foram estudadas utilizando a técnica de triangulação. A triangulação de 145 eventos foi realizada utilizando o programa StarStereo, desenvolvido com o propósito de estudar auroras e liberação química. Os sprites foram capturados na região central dos Estados Unidos da América nos dias 22 e 24 de Julho de 1996 e no dia 18 de Agosto de 1999, a partir de dois sítios de observação em cada ano. As características dos 121 relâmpagos geradores detectados pela National Lightning Detection Network dos Estados Unidos, NLDN foram estudadas. Foram analisadas as seguintes características dos sprites em relação à morfologia: altitude do topo e da base, tipo de sprite, extensão vertical, bem como duração, número de sprites por evento e a distribuição da ocorrência dos sprites ao longo do período de observação. Também foi analisada a relação entre os sprites e os relâmpago que os geraram, por meio de atraso do sprite em relação ao relâmpago gerador, distância entre eles e o pico de corrente dos relâmpagos geradores. A maioria dos sprites, $90\pm 3\%$ ocorreu com menos de $100,0\pm 16,7$ ms de atraso em relação ao relâmpago gerador, onde 16,7 ms é a duração de um campo desentrelaçado da imagem do vídeo. Eles apresentaram um atraso médio de 50 ± 11 ms sendo o menor atraso de $1,0\pm 16,7$, e o maior de $242\pm 16,7$ ms. A distância média entre eles foi de 37 ± 1 km sendo a mínima de 2 ± 36 km, e a máxima de 150 ± 11 km; $95\pm 9\%$ dos sprites ocorreu a menos de 100 km dos relâmpagos geradores. A média do pico de corrente dos relâmpagos geradores foi de 50 ± 3 kA, com valores mínimo e máximo de $13,97\pm 0,9$ kA e 155 ± 5 kA, respectivamente. Em relação a morfologia, os sprites cenoura foram o tipo dominante, seguidos dos coluna e finalmente dos medusa. Os sprites cenoura foram os que apresentaram maior atraso e variedade de tamanho, de $15,0\pm 0,4$ km a $59,0\pm 0,5$ km, seguidos dos medusa, de $22,0\pm 0,4$ km a $58,0\pm 0,4$ km. Os coluna foram os menores, com extensão vertical de $8,0\pm 0,4$ km a 40 ± 3 km. O atraso dos sprites do tipo coluna e cenoura foi de 40 ± 2 ms e 62 ± 5 ms respectivamente. Neste trabalho foram obtidos três resultados inéditos: (1) o atraso dos sprites aumentou em função da distância entre os sprites e os relâmpagos geradores, com uma correlação de 34%; (2) a extensão vertical dos sprites aumentou com o atraso; (3) a extensão vertical dos sprites diminuiu ao longo do período de observação, indo de xx km a xx km num período de 5h.

SPRITE STUDY USING TRIANGULATION

ABSTRACT

In this work, several features of 274 sprites were studied using the triangulation technique. The triangulation of 146 of these events was performed using the StarStereo program, developed with the objective of studying aurora and chemical release. The sprites were captured in the central United States on 22 and 24 July 1996, and on August 18, 1999, from two different observation sites in each year. The characteristics of 121 sprite parent lightning detected by the National Lightning Detection Network in the United States, NLDN, were studied. The following characteristics were examined with respect to sprite morphology: altitude of the top and the bottom of the sprite, type of sprite, their vertical extension, as well as duration, number of sprites per event, and the distribution of sprite occurrence during the observation period. We also analyzed the relationship between sprites and parent lightning by examining the sprite delay relative to the parent lightning, the distance between them and the parent lightning peak current. Most sprites, $90\pm 3\%$, had delays that were less than 100.0 ± 16.7 ms, where 16.7 ms is the duration of the field of the interlaced video image. Their average delay was 50 ± 11 ms, the smallest delay being of 1.0 ± 16.7 ms, and the largest of 242.0 ± 16.7 ms. The average distance between them was 37 ± 1 km, the minimum distance being 2 ± 36 km, and the maximum 150 ± 11 km; $95\pm 9\%$ of the sprites occurred within 100 km of the parent lightning. The average peak current of the sprite parent lightning was 50 ± 3 kA, with minimum and maximum of 13.97 ± 0.9 kA and 155 ± 5 kA, respectively. Regarding the morphology, carrot sprites were the dominant type, followed by column and finally jellyfish. The carrot sprites had the highest delays and the largest vertical extension range, from 15.0 ± 0.4 km to 59.0 ± 0.5 km, followed by the jellyfish, with 22.0 ± 0.4 km to 58.0 ± 0.4 km. Column sprites were the smallest, ranging from 8.0 ± 0.4 km to 40.0 ± 0.3 km. The average delay of column and carrot sprites was 40 ± 2 ms and 62 ± 5 ms, respectively. This work has three results that are new scientific contributions: (1) the sprite delays increased with the distance between sprites and parent lightning, with a correlation of 34%; (2) The vertical extent of sprites increased with the delay; (3) The vertical extent of the sprites decreased over the observation period, going from xx km to xx km over a period of 5h .

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Principais tipos de ELTs: Sprites, Halos, ELVES e Jatos.	1
2.1 Imagem colorida de um grupo de sprites.	5
2.2 Imagens dos dois tipos principais de sprites: À esquerda temos Sprites tipo Coluna e à direita temos os sprites clássicos, ou sprites cenoura (do inglês carrot).	6
2.3 Ilustração da morfologia de um sprite em relação à altura e temperatura da atmosfera.	7
2.4 Streamers positivos criados em laboratório em alta resolução temporal e espacial.	8
2.5 Mecanismo de penetração do campo elétrico da nuvem após uma descarga elétrica nuvem-solo.	9
2.6 Espectro de emissões de um sprite. Cabe observar que nessa imagem não temos a emissão da cor azul característica dos tentáculos do sprite	11
2.7 Sequência de imagens separadas por um tempo de 1ms. A imagem da esquerda mostra céu noturno, em seguida foi observado um ELVE e a terceira imagem mostra um halo abaixo do ELVE.	12
2.8 Sequência de imagens mostrando, da esquerda para a direita, um sprite, após quase 50 ms ocorre um sprite halo donde surgem streamers que iniciam os sprites das imagens seguintes.	13
2.9 Figura ilustrativa da onda de blindagem e ionização gerada pela deriva de cargas negativas em direção à ionosfera.	14
2.10 Captura de um ELVE pelo sistema ISUAL a bordo do satélite FORMOSAT -2.	15
2.11 Três imagens de jatos. A imagem 2.11(a) é a primeira imagem colorida de um jato azul e as imagens 2.11(b) e 2.11(c) são da evolução de um jato gigante no tempo e de um jato gigante respectivamente.	17
2.12 Ilustração do mecanismo de iniciação de um jato azul e de um jato gigante em relação à polaridade. Nos quadros (a) até (d) temos a nuvem de tempestade na configuração "clássica" e nos quadros (e) a (h) temos a polaridade da nuvem invertida, as linhas vermelhas mostram cargas positivas e as linhas azuis representam carga negativa.	18

4.1	Local onde estavam instaladas as câmeras para observação nos dias 22 e 24 de julho de 1996 e um esboço das tempestades quando o primeiro sprite da noite foi observado.	24
4.2	Local onde estavam instaladas as câmeras para observação no dia 18 de agosto de 1999 e um esboço da tempestade quando o primeiro sprite da noite foi observado. A área em vermelho é um esboço da nuvem do dia 24 de julho no horário que o primeiro sprite foi observado. A área em preto é para o dia 22 de julho.	25
4.3	Principais arquiteturas que governam os sensores de uma câmera CCD.	27
4.4	Esquema da multiplicação de fótons	29
5.1	Exemplo de um campo de estrelas e o mapa estelar correspondente após inserir corretamente os parâmetros de localização e campo de visada da câmera: latitude, longitude, altitude, azimute, elevação, data e horário UT.	33
5.2	Ajuste do mapa estelar com as estrelas da imagem. Note que a magnitude das estrelas é representadas pelo tamanho e que as as estrelas de menor magnitude não são visíveis na imagem da câmera devido a sua baixíssima luminosidade.	34
5.3	Exemplo da função stereo mostrando o ponto do sprite que será triangulado.	35
5.4	Exemplo da função stereo mostrando a posição do ponto de triangulação correspondente ao ponto de controle.	35
5.5	Alinhamento final do ponto de triangulação com o ponto de controle.	36
6.1	Relação entre Δt vs Distância entre o sprite e o relâmpago. As Figuras 6.1(f), 6.1(b) e 6.1(d) são o resultado de um fit linear dos dados considerando o intervalo até 100 ms.	40
6.2	Relação entre Atraso do sprite com a distância para todos os eventos analisados.	41
6.3	Relação entre Intervalo Δt vs Pico de corrente do relâmpago. A incerteza em determinar o intervalo de tempo entre relâmpago e sprite é de 17 ms para todos os eventos.	44
6.4	Relação entre Atraso do sprite e o pico de corrente para todos os eventos analisados.	45
6.5	Relação entre o tipo de sprite e a distância entre o sprite e o relâmpago gerador.	45
6.6	Figura com a relação entre o tipo de sprite e o intervalo de tempo entre o sprite e o relâmpago para todos os sprites estudados.	46
6.7	Distribuição dos tipos de sprite ao longo de todo o tempo de observação.	48

6.8	Distribuição das altitudes do topo e da base dos sprites em relação com o horário das observações de ELTs. As figuras da direita são o valor médio das altitudes calculadas de meia em meia hora.	50
6.9	Distribuição da extensão dos sprites em relação ao horário de observação de ELTs. As figuras da direita são o valor médio das altitudes calculadas de meia em meia hora.	51
6.10	Relação entre a altitude dos sprites e do intervalo de tempo entre sprite e relâmpago. As figuras da direita mostram um ajuste linear dos dados até 100 ms.	52
6.11	Relação entre o atraso e altitude de todos os sprites analisados.	53
6.12	Relação entre o atraso e a extensão vertical dos sprites.	54
6.13	Relação entre o pico de corrente dos relâmpagos geradores e das altitudes finais do topo e da base dos sprites.	55
6.14	Relação entre a duração e a extensão vertical dos sprites.	57
6.15	Exemplo da persistência da tela de fósforo. O evento acima, foi estudado na Seção 7.2, onde tivemos vários sprites atravessando o horizonte, também chamados de “Sprites dançantes”. Enquanto que na câmera em WIRO temos apenas o último grupo de sprites, a câmera em Yucca Ridge ainda mostra quase todos os sprites que o precederam.	58
6.16	Relação entre o número de sprites por evento e o pico de corrente do relâmpago gerador para sprites dos tipos cenoura e coluna.	59
7.1	Ocorrência de um grupo de 4 sprites cenoura precedidos de um halo. . .	61
7.2	Na imagem da esquerda observa-se a fase inicial dos sprites capturada em Bear Mountain. Na direita, o quadro seguinte, mostrando o desenvolvimento total do evento.	62
7.3	Quinto sprite do evento, gerado após o desaparecimento do halo.	62
7.4	Sequência dos sprites capturados. Do início do primeiro sprite até o início do último sprite se passaram 749 ms.	65
7.5	Sequência dos sprites capturados. Do início do primeiro sprite até o início do último sprite passaram-se 300 ms.	67

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Conjunto de dados usados para fazer a triangulação	31
5.2 Conjunto de dados usados para fazer as tabelas para análise	38
6.1 Comparação dos sprites coluna em relação a hora.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACATMOS	–	Acoplamento Eletrodinâmico Atmosférico e Espacial
CCD	–	<i>Charge Couple Device</i>
EBI	–	<i>Equivalent Background Illumination</i>
ELF	–	<i>Extremely Low Frequency</i>
ELTs	–	Eventos Luminosos Transientes
FoV	–	<i>Field of View</i>
ISUAL	–	<i>Imager of Sprites and Upper Atmosphere Lightnings</i>
LEONA	–	A Rede Colaborativa na América Latina para a Investigação de Eventos Luminosos
MCP	–	<i>Micro Plate Channel</i>
NLDN	–	<i>National Lightning Detection Network</i>
PEM	–	Pulso Eletromagnético
QE	–	<i>Quantum Efficiency</i>
qps	–	quadros por segundo
VLF	–	<i>Very Low Frequency</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES	5
2.1 Sprites	5
2.2 Halos	12
2.3 ELVEs	14
2.4 Jatos	16
3 TRIANGULAÇÃO	19
4 INSTRUMENTAÇÃO	23
4.1 Equipamento usado em 1996	24
4.2 Equipamento usado em 1999	25
4.3 Câmeras CCD	26
4.3.1 Alcance Dinâmico	27
4.3.2 Resposta Espectral (QE)	27
4.3.3 Agrupamento	28
4.4 Intensificador	28
4.4.1 Componentes de um intensificador	29
5 DADOS E METODOLOGIA	31
5.1 Dados	31
5.2 Metodologia	32
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
7 ANÁLISE DE EVENTOS SEPARADOS	61
7.1 18 de Agosto de 1999, 4:19:27h	61
7.2 24 de Julho de 1996, 5:38:00h	63
7.3 24 de Julho de 1996, 8:14:47h	66
8 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

Eventos Luminosos Transientes, ELTs, são fenômenos ópticos de curta duração que ocorrem acima de nuvens de tempestade na região da mesosfera e baixa ionosfera. Foram descobertos, ao acaso, por Franz et al. (1990) quando realizavam testes com uma câmera de baixa luminosidade para observações astronômicas na noite de 5 de julho de 1989 no estado de Minnesota, EUA. Eles tinham uma câmera apontada numa direção tal que, em seu campo de visão, havia uma tempestade a cerca de 250 km de distância do local. O vídeo registrou “duas emissões gêmeas originadas no topo de nuvens distantes em direção à estratosfera”. Mais tarde essas emissões ficaram conhecidas como Sprites.

Em resposta à essa descoberta, iniciaram-se várias campanhas, por terra e por ar, de vários grupos de pesquisa, para realizar mais observações com o intuito de obter uma descrição física desse “novo” fenômeno e tentar compreender as suas conseqüências na atmosfera.

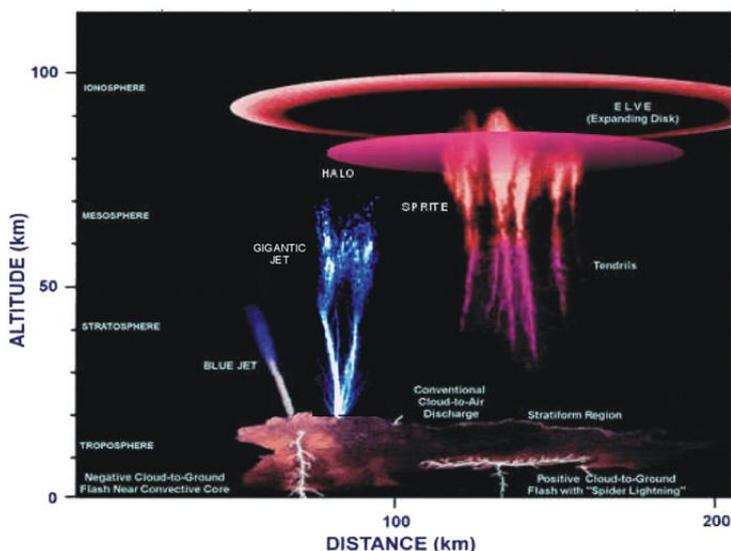


Figura 1.1 - Principais tipos de ELTs: Sprites, Halos, ELVES e Jatós.
Fonte: Stenbaek-Nielsen e McHarg (2008).

Embora a primeira observação científica de um ELT só tenha ocorrido no final da década de 1980, a possível existência deles já havia sido prevista há quase 65 anos antes da primeira captura científica do evento. No ano de 1924, o ganhador do prêmio Nobel C. T. R. Wilson publicou um trabalho em que realizava uma modelagem

para estimar a ionização na alta atmosfera causada pela atividade elétrica na nuvem. Ao comparar o decaimento da densidade de partículas com a força elétrica devido ao momento de carga da nuvem, ele chegou à conclusão que o momento de carga da nuvem acima de um certo valor gerava um campo elétrico tal que superava a rigidez dielétrica do ar entre 60 - 80 km de altitude, podendo iniciar assim uma descarga elétrica na alta atmosfera (WILSON, 1924). Esse foi o primeiro cálculo teórico que previa uma resposta da mesosfera e ionosfera a processos físicos ocorridos na troposfera.

Sabe-se, hoje, que o momento de carga é principal parâmetro na geração de sprites e os ELTs são efeitos de relâmpagos nuvem-solo, tanto positivos quanto negativos, na atmosfera superior. Os quatro principais são: Sprites, Halos, ELVEs e Jatos. Cada um deles é correlacionado com relâmpagos de uma maneira diferente. Detalharemos as características principais dos ELTs na próxima seção. A existência dos ELTs e os relâmpagos evidencia um fato muito importante no entendimento da atmosfera terrestre: o acoplamento entre as camadas atmosféricas, pois um fenômeno que ocorre na troposfera, a aproximadamente 0 - 15 km de altitude, afeta a estratosfera, mesosfera e a baixa ionosfera, ou seja, toda a região acima da nuvem de ~ 15 a ~ 100 km de altitude.

Observações de ELTs a partir do solo vêm sendo realizadas em lugares diferentes no mundo há cerca de 20 anos, resultando numa vasta coleção de vídeos, num rápido crescimento do nível de conhecimento que temos sobre esses fenômenos, e, entre outras coisas, numa vasta base para trabalhos de modelagem. No entanto, até hoje há poucos os trabalhos publicados na literatura nos quais os ELTs foram observados de mais de um sítio e tiveram suas características morfológicas estudadas, entre eles temos: Wescott et al. (2001), São Sabbas et al. (2003), Stenbaek-Nielsen et al. (2010). No Brasil, as campanhas de observação de Sprites tem sido realizadas pelo grupo de Acoplamento Eletrodinâmico Atmosférico e Espacial - ACATMOS - do INPE. Os objetivos desse trabalho são:

- Estudar sprites usando triangulação.
- Estudar as relações entre o atraso entre relâmpago e sprite com a altitude da base e do topo deles.
- Estudar a influência do pico de corrente nas altitudes finais dos sprites.
- Analisar a distribuição dos tipos de sprites durante a evolução da tempestade.

A triangulação nos dá informação da geolocalização de um evento, isto é, latitude, longitude e altitude, bem como dimensões físicas como a altitude. É fundamental obtermos essas informações com exatidão para conhecer as características morfológicas e estudar sua relação com os relâmpagos, a atividade elétrica da nuvem em geral bem como sua relação com a estrutura da nuvem de tempestade geradora de cada ELT. Além disso, um conjunto de dados triangulados com precisão permite a formulação de modelos cada vez mais realistas com base nos princípios físicos que estão por trás dos fenômenos.

2 EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES

2.1 Sprites

Sprites vermelhos, ou sprites, são os principais ELTs. São observados como emissões ópticas de curta duração geradas por uma descarga elétrica na mesosfera e/ou baixa ionosfera. Essa descarga, por sua vez, só é possível quando há uma rápida retirada de carga da nuvem causada por um relâmpago nuvem-solo. O termo sprite foi idealizado por D. D. Sentman devido a natureza efêmera do fenômeno, com o intuito de não criar um conceito físico para algo que ainda não era entendido.

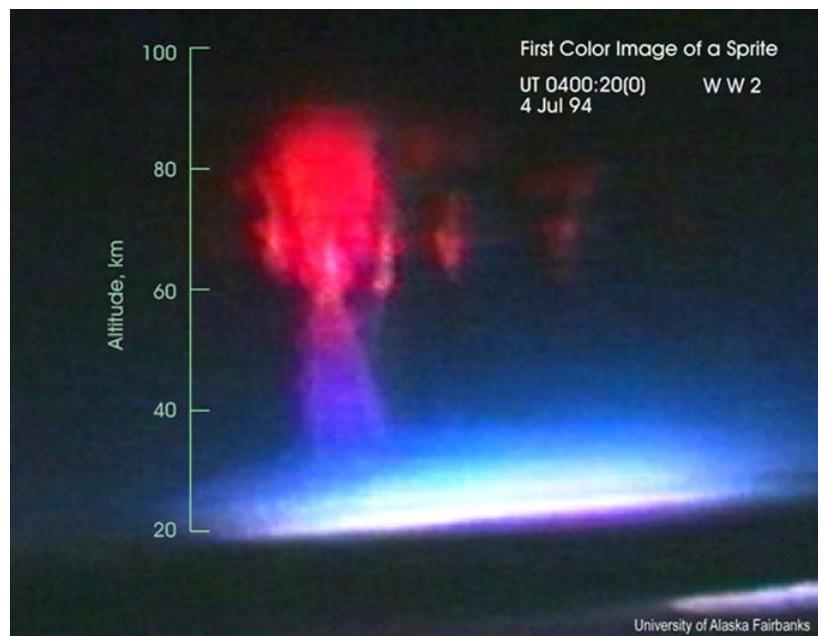


Figura 2.1 - Imagem colorida de um grupo de sprites.
Fonte: Sentman et al. (1995).

Sprites ocorrem na mesosfera e se estendem até a base da ionosfera noturna. São observados, em sua extensão total, em altitudes que variam de 40 - 95 km. Em relação à aparência dos sprites, foram observados vários tipos. Nesse trabalho serão estudados os seguintes tipos: Sprites tipo Coluna ou tipo C, Cenoura e Medusa (tradução literal do termo Jellyfish). Os sprites medusa são, em geral, sprite cenoura que ocorrem em grupo conforme mostrado na Figura 2.2.

O valor da intensidade luminosa dos sprites ainda não é um consenso entre os pesquisadores da área, Sentman et al. (1995) estimou 50 kR ao comparar com luminosidade

de estrelas, Liu e Pasko (2004) estimaram $10^8 R$ através de modelos, Stenbaek-Nielsen et al. (2007) estimaram valores na faixa de $9 \times 10^8 - 5 \times 10^{11} R$, através de observação. Existem vários fatores que dificultam a obtenção exata desse parâmetro: as câmeras para observação que, em geral, não são calibradas, a distância do observador ao fenômeno, a absorção da luz pela atmosfera, entre outros. Uma vez que a maioria das campanhas de estudo dos sprites são feitas a partir do solo, a luz do evento que chega ao observador é parcialmente absorvida pela atmosfera no caminho. Nos limitaremos a dizer aqui que o observador deve se situar a uma distância tal que seja possível observar a atmosfera acima da nuvem, essa distância varia entre 100 e 1000 km. Isso torna a absorção da luz pela atmosfera um fator ainda mais decisivo para fazer esse tipo de análise. Campanhas por avião podem obter resultados melhores pois se encontram mais perto do fenômeno e estão acima de grande parte da atmosfera de forma que a absorção é atenuada. Observações de satélite evitam esse problema, por estarem acima da atmosfera, o que favorece o uso do Imager of Sprites and Upper Atmosphere Lightnings, ISUAL, um sistema de observação de ELTs a bordo do satélite FORMOSAT-2.

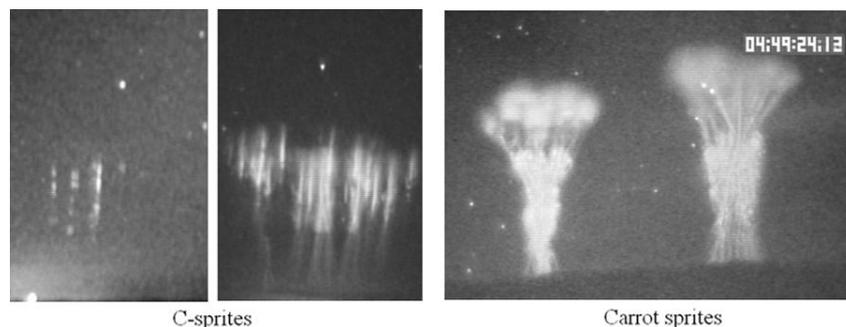


Figura 2.2 - Imagens dos dois tipos principais de sprites: À esquerda temos Sprites tipo Coluna e à direita temos os sprites clássicos, ou sprites cenoura (do inglês carrot).

Fonte: Stenbaek-Nielsen e McHarg (2008).

A primeira análise morfológica dos Sprites foi realizada por Sentman et al. (1995). As diferentes regiões dos sprites foram nomeadas da seguinte maneira: cabeça - do inglês head - região entre 62-78 de altitude onde se observa a parte mais luminosa do sprite, possuindo coloração vermelha. Cabeleira - do inglês hair - podendo se estender até 95 ± 5 km com brilho avermelhado fraco composto de uma estrutura fina e, por fim, tentáculos - do inglês tendrils - estruturas filamentosas que se vão da cabeça até cerca de 40 km de altitude sendo que próximo à cabeça, sua coloração é

vermelha e ao diminuir de altitude essa cor muda para o azul - [Figura 2.3](#). Entre a cabeça e as outras duas componentes, tentáculos e cabeleira, existem áreas escuras que separam as 3 partes principais. Com a ajuda de observação com câmeras rápidas, o detalhamento dos vídeos nos permitiu uma análise morfológica mais precisa do que a apresentada por [Sentman et al. \(1995\)](#).

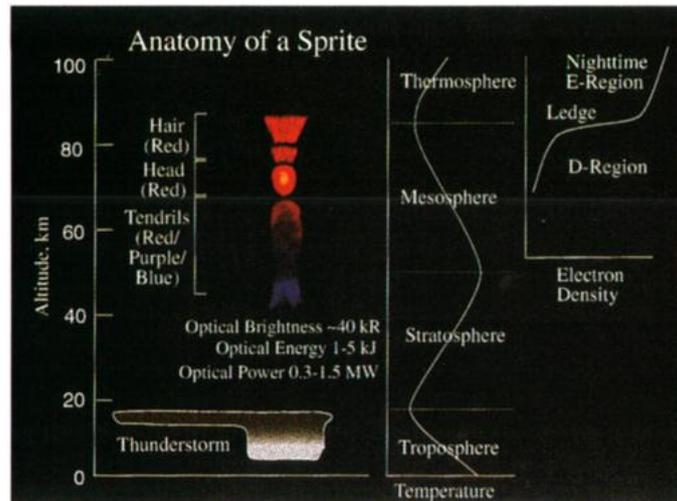


Figura 2.3 - Ilustração da morfologia de um sprite em relação à altura e temperatura da atmosfera.

Fonte: [Sentman et al. \(1995\)](#).

Foi observado por [Stenbaek-Nielsen e McHarg \(2008\)](#) e [Gerken et al. \(2000\)](#), que sprites são compostos de filamentos de plasma conhecidos como streamers, como previsto nas modelagens de [Pasko et al. \(1998\)](#). Ao fazer observações com câmeras que chegam a 10.000 quadros por segundo (qps), [Stenbaek-Nielsen e McHarg \(2008\)](#) perceberam que os streamers se propagam tanto para cima quanto para baixo, sendo que os streamers começam com propagação para baixo e depois iniciam-se os streamers para cima.

Streamers são estruturas filamentosas de plasma fracamente ionizado à temperatura ambiente, com diâmetro de algumas dezenas a algumas centenas de metros que podem apresentar duas polaridades, positiva ou negativa. Sua formação é dada quando ocorre a quebra da rigidez dielétrica do ar. Essa quebra ioniza o ar de tal forma que as moléculas liberam elétrons energéticos que por sua vez colidem com outras moléculas liberando cada vez mais elétrons e assim por diante, esse processo é conhecido como avalanche eletrônica e é o estágio inicial dos streamers. Eventualmente, o pro-

cesso de avalanche levará ao streamer e isso se dá quando o número de partículas carregadas na ponta do streamer atinge $N_c \sim 10^8$ (COORAY, 2003).

O ar normalmente é um isolante elétrico, ou seja, na presença de um campo elétrico, ele não conduz corrente elétrica. No entanto, essa propriedade possui um limite. Caso o campo elétrico aplicado seja alto o suficiente, qualquer material isolante passa a ser um condutor e com o ar isso também se aplica. Esse limite no qual um material passa de isolante para condutor chama-se rigidez dielétrica. Quando temos a quebra de rigidez dielétrica no ar acontece uma descarga elétrica. Na troposfera ocorre um relâmpago, na mesosfera/baixa ionosfera a quebra de rigidez promove a geração de uma avalanche de elétrons que pode levar à iniciação de streamers e a formação de sprites.

Existem streamers negativos e positivos sendo que cada um deles é determinado pela polaridade da carga que se situa em sua ponta - Figura 2.4. Sua propagação no ar se dá de maneira diferente, de acordo com a polaridade. Streamers positivos se propagam na mesma direção do campo elétrico, isso requer uma avalanche eletrônica em direção ao streamer, na frente da cabeça do streamer, de modo que o streamer positivo absorve essa avalanche para se propagar. O streamer negativo é capaz de se propagar sem essa avalanche eletrônica na sua frente, uma vez que as avalanches são criadas pelo próprio streamer, que ioniza a ar logo à sua frente, liberando elétrons (PASKO, 2007).

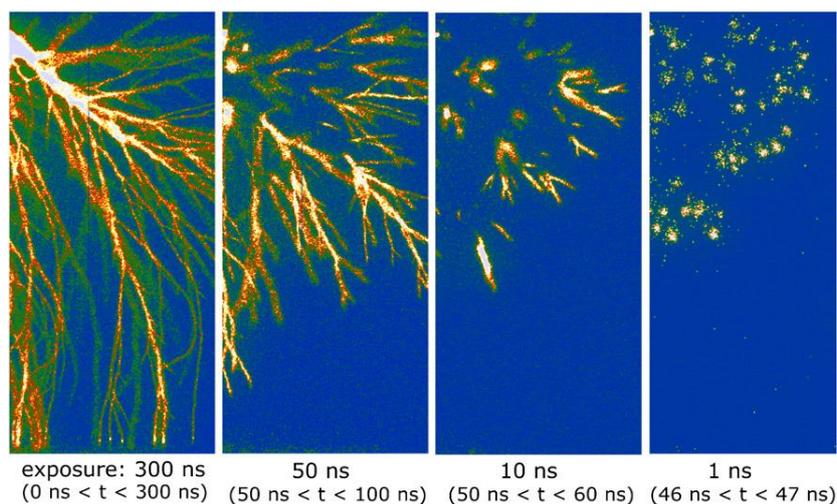


Figura 2.4 - Streamers positivos criados em laboratório em alta resolução temporal e espacial.

Fonte: Briels et al. (2008).

Como dito na seção anterior, o trabalho de Wilson (1924) prevê que uma rápida retirada de carga da nuvem de tempestade é capaz de gerar um campo elétrico na alta atmosfera que pode ser alto o suficiente para quebrar a rigidez dielétrica local, gerando então uma descarga elétrica.

A teoria mais aceita para o mecanismo de iniciação de sprites é a de ionização por impacto eletrônico (PASKO et al., 1997; RAIZER et al., 1998; LIU E PASKO, 2004; SILVA e SÃO SABBAS, 2013). Em linhas gerais, funciona da seguinte maneira: A nuvem se carrega lentamente durante sua formação de forma que ocorre uma separação de cargas dentro dela como na Figura 2.5. Isso induz cargas elétricas com módulo aproximadamente igual mas de sinal oposto ao longo da atmosfera acima da nuvem, essas cargas criam uma blindagem dos campos elétricos da nuvem de tempestade. Quando ocorre um relâmpago, há uma rápida remoção de carga da nuvem para o solo, isso gera então um intenso campo quase-eletrostático que aparece em todas as altitudes e permanece por um tempo da ordem da relaxação dielétrica local - $\tau = \epsilon_0/\sigma$ onde ϵ_0 é a permissividade do ar e σ é a condutividade local. Esse aumento súbito no campo elétrico local pode ser intenso o suficiente para quebrar a rigidez dielétrica do ar acelerando os elétrons do ambiente, que podem adquirir energia suficiente para gerar ionização (PASKO, 2007).

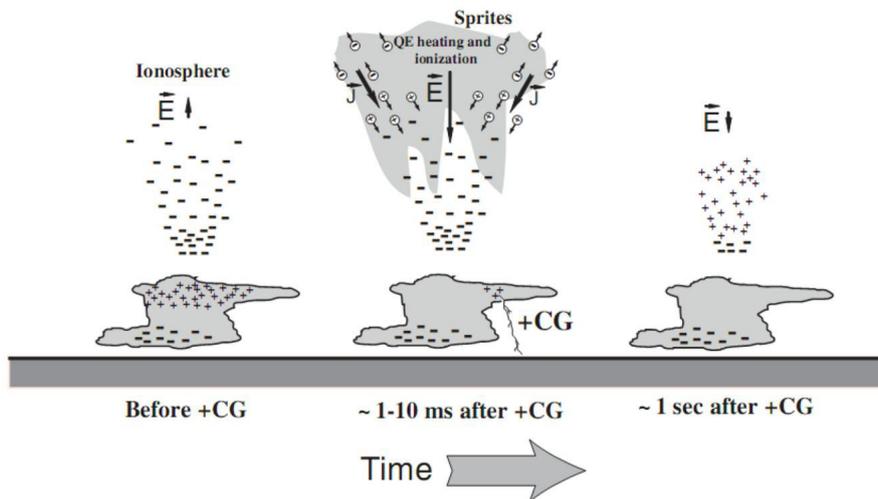


Figura 2.5 - Mecanismo de penetração do campo elétrico da nuvem após uma descarga elétrica nuvem-solo.

Fonte: Pasko et al. (1997).

É possível quantificar a rápida remoção de carga da nuvem pelo relâmpago. Com o

conceito que C. T. R. Wilson utilizou para estudar a ionização na alta atmosfera, que hoje chamamos de momento de carga. A importância física desse conceito no estudo de ELTs é sua variação, ou seja, a variação do momento de carga e é expressa da seguinte maneira (LANG et al., 2010):

$$\Delta M_q(t) = Z_q(t)Q(t) \quad (CKm) \quad (2.1)$$

onde $Z_q(t)$ é a altura acima do nível do solo da carga $Q(t)$ antes de ser removida pelo relâmpago e ambos os parâmetros são funções do tempo t . Através de estudos utilizando essa simples expressão, é possível calcular a quantidade de carga que deve ser transferida para o solo para gerar a quebra de rigidez dielétrica na alta atmosfera e conseqüentemente um sprite. Vários estudos sugerem que, para ocorrer a quebra, seriam necessários valores que excedem $\Delta M_q = 500 \text{ C Km}$ (PASKO et al., 1997; HUANG et al., 1999; WILLIAMS, 2001; LYONS et al., 2003). Alguns sprites são gerados por momentos de carga aparentemente pequenos ($\sim 100 - 200 \text{ C km}$) (HU et al., 2002). No entanto, mesmo tais valores pequenos de carga são altos quando comparamos com a média típica de variação de momento de carga para relâmpagos positivos de $\sim 50 \text{ C Km}$ (CUMMER E LYONS, 2004)

Ao analisar os relâmpagos que geram os sprites, observa-se uma assimetria na polaridade. Dos relâmpagos que geram sprites, mais de 90% deles são positivos (BOCCIPPIO et al., 1995; SÃO SABBAS et al., 2003). Já é conhecido que relâmpagos positivos possuem, em média, maior pico de corrente e maior valor na variação do momento de carga que os relâmpagos negativos (WILLIAMS, 2006; RAKOV E UMAN, 2003; SABA et al., 2010), assim, o número de observações de sprites gerados por relâmpagos negativos é muito pequena em relação à dos positivos. Uma explicação para essa assimetria foi sugerida por (WILLIAMS, 2006; WILLIAMS et al., 2012), dizendo que quando é gerado um sprite, um halo também está presente, apenas com um brilho muito fraco para ser detectado pelas câmeras que faziam as observações na época. Outras soluções foram sugeridas mas, hoje, a que é mais aceita é a apresentada acima. Na seção 2.2 voltamos a falar sobre o problema da polaridade e sobre o mecanismo de iniciação.

As primeiras análises espectroscópicas dos sprites foram realizadas por Mende et al. (1995), Hampton et al. (1996) com equipamento sensível à comprimentos de onda 400 - 800 nm e 540 - 800 nm respectivamente. Como resultado, obtiveram que a cor vermelha do sprite era devido à emissão da primeira banda positiva do nitrogênio

molecular N_21P (Figura 2.6). As emissões responsáveis pela coloração azulada, na parte mais baixa do sprite se trata da segunda banda positiva do nitrogênio molecular N_22P e da primeira banda negativa do nitrogênio molecular ionizado N_2^+1N (ARMSTRONG et al., 1998; SUSZCZYNSKY et al., 1998). Como a espécie química mais abundante na região de ocorrência dos sprites é o nitrogênio, não é surpresa que ele seja responsável pelas emissões de luz. Sprites podem afetar a química da atmosfera

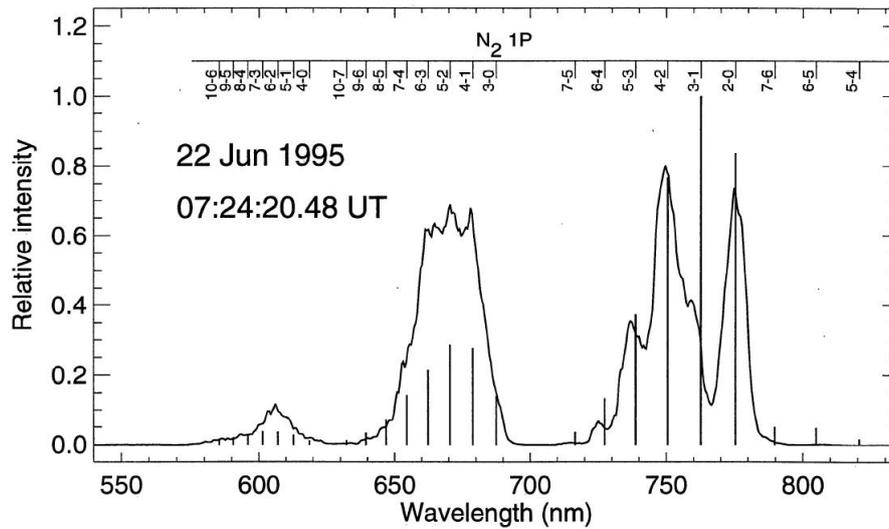


Figura 2.6 - Espectro de emissões de um sprite. Cabe observar que nessa imagem não temos a emissão da cor azul característica dos tentáculos do sprite
 Fonte: Hampton et al. (1996).

local. Sentman et al. (2008) quantificou o impacto de um sprite ao fazer um modelo com mais de 800 reações e 80 espécies químicas. Como resultado de todas essas reações, observou-se que a reação que mais acontece na faixa de altura 60 - 70 km, é a ionização do N_2 através de impacto de elétrons, que por sua vez oxida o nitrogênio atômico produzindo NO, conforme mostrado, respectivamente, nas reações a seguir.



Sprites emitem radiação na faixa do VLF e ELF - Very Low Frequency 3 Hz - 3 kHz e Extremely Low Frequency 3 - 30 kHz - e devido à propagação com grandes comprimentos de onda, é possível detectar sprites a longas distâncias devido à reflexões dessa onda na cavidade Terra/Ionosfera como feito por Cummer et al. (1998).

2.2 Halos

Halos são emissões ópticas que possuem forma de um disco com uma luminosidade difusa e ocorrem na mesma altitude, podem ocorrer junto com sprites ou independentemente. A [Figura 2.7](#) mostra um exemplo de um halo precedido de um ELVE ([MOUDRY et al., 2003](#)). Possuem duração em torno de 1ms, brilho em média de 0.3 MR ([KUO et al., 2008](#)), propagação para baixo a uma velocidade média de 3 a 6 x 10⁷m/s com início a aproximadamente 87 km e fim a 73 km ([MIYASATO et al., 2002](#)). Para fins de modelagem estima-se que os halos são centrados acima dos relâmpagos que os gerou, mas podem se encontrar a distâncias horizontais de dezenas de quilômetros deles.

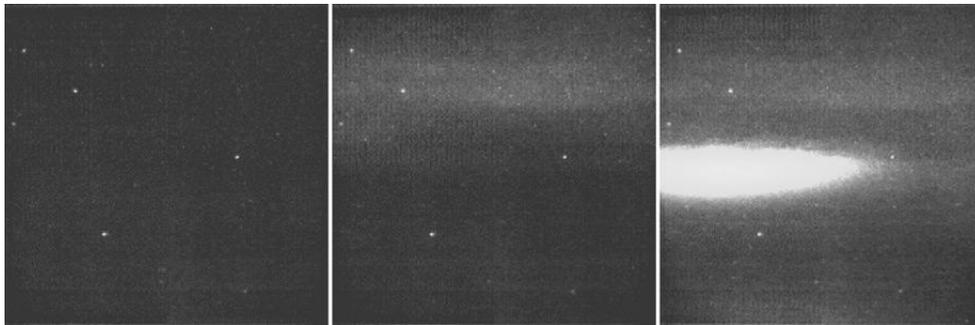


Figura 2.7 - Sequência de imagens separadas por um tempo de 1ms. A imagem da esquerda mostra céu noturno, em seguida foi observado um ELVE e a terceira imagem mostra um halo abaixo do ELVE.

Fonte: [Moudry et al. \(2003\)](#).

Durante vários anos após a descoberta dos ELTs, não havia distinção entre halos e ELVEs - considerava-se apenas a existência dos ELVEs - até que [Barrington-Leigh et al. \(2001\)](#) distinguiu as diferenças entre os dois fenômenos que desde então ficou conhecido por “sprite halo” ou apenas halo. Sprite halo é o nome dado pois, até então, apenas se observava os fenômenos acontecendo juntos: um halo e um sprite, de forma que quando ocorria os dois juntos, os streamers que formam o sprite tinham seu início no halo ([BARRINGTON-LEIGH et al., 2001](#)), como mostrado na [Figura 2.8](#).

Da mesma maneira que os sprites, os halos são gerados por campos quase-eletrostáticos criados por descargas elétricas na troposfera. Como o mecanismo de geração tem a mesma etapa inicial, que depende da quebra de rigidez dielétrica do ar por esses campos, quando os dois fenômenos acontecem juntos e sobrepostos podem ser devido a uma única descarga positiva nuvem solo e, de fato, isso é ob-

servado em vários trabalhos - Barrington-Leigh et al. (2001), Moudry et al. (2003), Miyasato et al. (2002), Thomas et al. (2007), entre outros. No entanto, também foram observados halos gerados por descargas nuvem solo negativas - Frey et al. (2007), Barrington-Leigh et al. (2001) - e observações mais recentes utilizando o sistema ISUAL, mostraram que halos são gerados por descargas negativas com mais frequência do que pelas descargas positivas (CHEN et al., 2008).

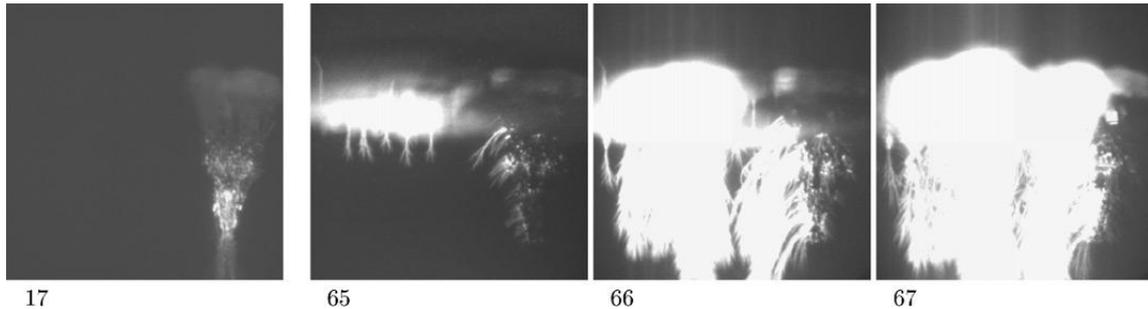


Figura 2.8 - Sequência de imagens mostrando, da esquerda para a direita, um sprite, após quase 50 ms ocorre um sprite halo donde surgem streamers que iniciam os sprites das imagens seguintes.

Fonte: Moudry et al. (2003).

Apesar de halos e sprites ocorrerem juntos frequentemente, os dois fenômenos também podem ocorrer separadamente. O que os diferencia é a escala de tempo da variação do momento de carga gerado pelo relâmpago, tal variação é ligada com o tempo de subida do pico de corrente. Relâmpagos que possuem variação do momento de carga numa escala de tempo pequena ($< 1\text{ms}$) são capazes de gerar ionização na alta atmosfera, mas não a ponto de iniciar streamers em regiões mais baixas, ocorre então apenas o halo. Por outro lado, relâmpagos com variação do momento de carga com tempos maiores não produzem halo, apenas um sprite (BARRINGTON-LEIGH et al., 2001).

A ocorrência separada de sprites e halos não resolve o problema da polaridade do relâmpago permanece. O modelo de Luque Alejandro e Ebert (2009), Silva e São Sabbas (2013) prevêem que quando um relâmpago remove cargas positivas da nuvem, uma onda de blindagem e ionização positiva (do inglês screening ionization wave, Figura 2.9) se propaga para baixo numa altitude inicial de $\sim 80\text{ km}$. Com a remoção de cargas positivas da nuvem, ocorre uma deriva de elétrons direcionada para cima na atmosfera devido ao campo elétrico da nuvem.

A onda de ionização se propaga para baixo, enquanto a deriva de cargas negativas se move para cima, em direção à ionosfera. As cargas negativas “alimentam” a onda de ionização, que acumula carga em sua ponta e forma o que é chamado de semente, que por sua vez é responsável pelo início do streamer do sprite. Observe que no meio da [Figura 2.9](#) temos uma pequena ponta, que dará o início a um streamer. Esse é o mecanismo de penetração de intensos campos elétricos ionizantes a altitudes mesosféricas e foi idealizado por [Luque Alejandro e Ebert \(2009\)](#). Essa onda de ionização possui as mesmas características físicas (tamanho, ionização volumétrica, intensidade de campo elétrico) do halo ([LUQUE ALEJANDRO E EBERT, 2009](#)).

Para relâmpagos negativos, a deriva dos elétrons é direcionada para baixo, “fugindo” da onda de ionização assim não ocorre o acúmulo de elétrons e a semente não se forma. Sem a semente, não temos o sprite, porém o halo é relacionado apenas com a quebra de rigidez dielétrica do ar, independente da criação da semente. Assim, halos podem ocorrer devido a um relâmpago positivo ou negativo ([SILVA e SÃO SABBAS, 2013](#)).

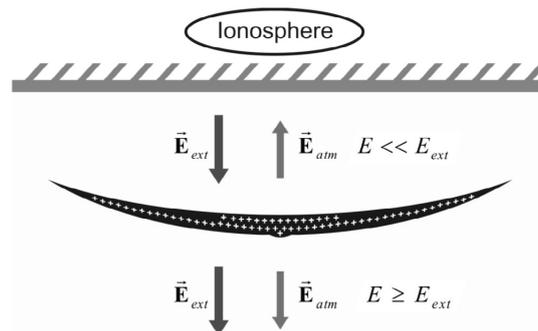


Figura 2.9 - Figura ilustrativa da onda de blindagem e ionização gerada pela deriva de cargas negativas em direção à ionosfera.

Fonte: [Silva e São Sabbas \(2013\)](#).

2.3 ELVEs

ELVEs - do inglês Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources - são emissões ópticas com características morfológicas similares aos Halos. Possuem forma de um anel em expansão, uma duração muito curta < 1 ms e brilho tênue de, em média, algumas centenas de kR ([KUO et al., 2008](#)). No entanto, as semelhanças terminam por aqui. Eves possuem um diâmetro maior que os halos, de 200 a 600 km, com início na faixa de altitude que vai de 75 a 100

km, e seu mecanismo de iniciação não é por campos quase-eletrostáticos.

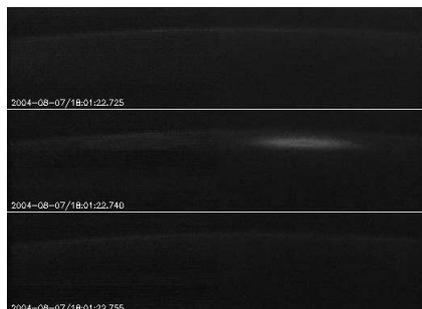


Figura 2.10 - Captura de um ELVE pelo sistema ISUAL a bordo do satélite FORMOSAT -2.

Fonte: Mende et al. (2005).

Elves são gerados pelo aquecimento e consequentemente ionização dos átomos da alta atmosfera pelo Pulso Eletromagnético - PEM - produzido pela descarga de retorno de relâmpagos nuvem solo. O aquecimento e ionização são responsáveis pela emissão óptica e a intensidade dessa emissão é diretamente proporcional à corrente de pico do relâmpago. Como o aquecimento da alta atmosfera pelo PEM é independente da polaridade do campo elétrico, elves podem ser produzidos tanto por descargas positivas quanto negativas (BARRINGTON-LEIGH E INAN, 1999). Por causa disso, ELVEs são o tipo mais comum de ELT, com uma peculiaridade: ELVEs possuem maior ocorrência sobre os oceanos do que nos continentes, muito embora a razão de ocorrência terra/oceano para os relâmpagos é de 10:1 (CHEN et al., 2008). Ao fazer uma comparação entre a ocorrência de ELVEs e temperatura superficial do oceano, Chen et al. (2008) observaram que a taxa de ocorrência de ELVEs aumenta significativamente quando a temperatura da superfície do oceano chega a 26°C. Essa temperatura é conhecida por ser o limite para a geração de tempestades tropicais, tufões e furacões. Eles estimam ainda que todos os relâmpagos que possuíam corrente de pico igual ou acima de 60 kA geravam ELVEs na atmosfera. Como elves são o tipo mais comum de ELT, é de grande importância pesquisar seus efeitos na atmosfera. Chen et al. (2008) realizaram um estudo para avaliar o impacto que um único ELVE tem na densidade eletrônica e descobriram que eles produzem um aumento entre 5 a 10% na densidade eletrônica local e de aproximadamente 1% na densidade global do planeta.

2.4 Jatos

Ao longo dos anos, há vários relatos de pilotos de avião, sobre pilares de luz saindo do topo da nuvem em direção à estratosfera. Na campanha Sprites94 (SENTMAN et al., 1995) esses pilares foram documentados cientificamente pela primeira vez utilizando câmeras de TV em preto e branco e foram batizados de Jatos Azuis¹ (WESCOTT et al., 1995). Os jatos azuis surgem do topo da nuvem, podem ser positivos ou negativos - dependendo da polaridade do centro de carga no topo da nuvem (KREHBIEL et al., 2008) - e propagam-se para cima como um cone estreito que se abre ao chegar a altitudes maiores, numa forma similar a um trompete. O ângulo do cone varia de 7.2 a 22.2°. Pode-se classificar os jatos em três tipos diferentes: precursores azuis, jatos azuis e jatos gigantes - do inglês Blue Starters, Blue Jets e Gigantic Jets, respectivamente (PASKO et al., 2002; SU et al., 2003).

Jatos azuis são descargas elétricas que acontecem no topo da nuvem e se movem para cima em direção à ionosfera com duração de $\sim 200 - 300ms$ (Figura 2.11(a)). Possuem velocidade de propagação de aproximadamente 100 km/s, altitude terminal que varia entre 40-50 km e brilho de até 500 kR. Observa-se que o brilho é mais intenso na base do jato e perde intensidade ao atingir altitudes maiores (WESCOTT et al., 1995).

Precursores azuis são, em sua essência, jatos azuis. A única diferença notável entre os dois é a altitude terminal que, no caso dos precursores azuis, é menor que a do jatos. Eles saem do topo da nuvem e vão até cerca de 20 km (WESCOTT et al., 1996).

Jatos gigantes diferem dos jatos azuis por duas características: altitude terminal e morfologia. Jatos gigantes vão do topo da nuvem atingindo altitudes de $\sim 90km$ com uma forma que se assemelha a uma cenoura como mostrado nas Figuras 2.11(b) 2.11(c), (SU et al., 2003). O tempo para que o jato gigante se forme totalmente, atingindo sua altitude terminal, é de $\sim 17ms$ (SU et al., 2003).

O modelo mais simples utilizado para descrever a estrutura elétrica da nuvem de tempestade é um tripolo com um pequeno centro de carga positivo na base, um grande centro de carga negativo no meio e um outro grande centro de carga, positivo no topo. O modelo também inclui uma pequena camada de blindagem logo acima da nuvem com polaridade contrária àquela do centro de carga no topo, ou seja, em geral essa pequena camada possui polaridade negativa (WILLIAMS, 1989).

¹tradução do termo em inglês Blue Jets

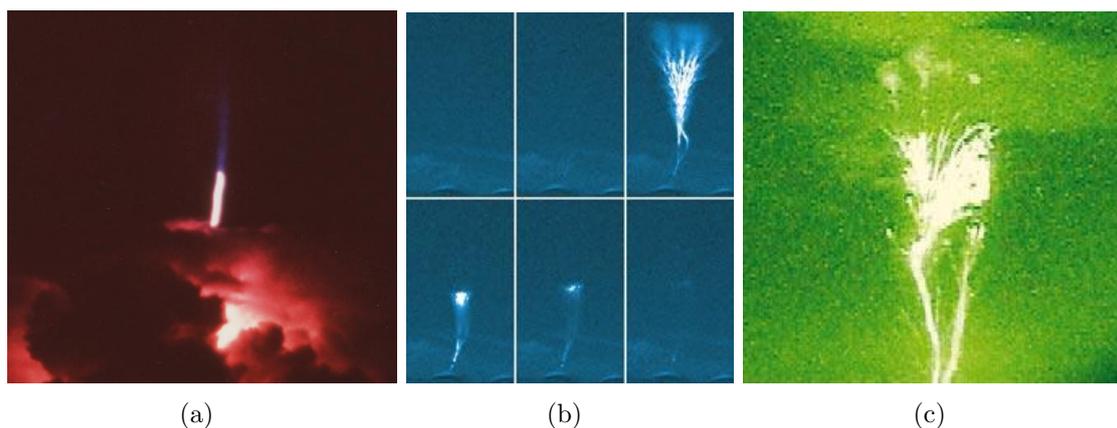


Figura 2.11 - Três imagens de jatos. A imagem 2.11(a) é a primeira imagem colorida de um jato azul e as imagens 2.11(b) e 2.11(c) são da evolução de um jato gigante no tempo e de um jato gigante respectivamente.

Fonte: Lyons et al. (2003), Su et al. (2003), Pasko et al. (2002) respectivamente.

O modelo que melhor explica os jatos azuis e jatos gigantes é aquele proposto por Krehbiel et al. (2008). Considerando nuvens tripolares convencionais, ou seja, um grande centro de cargas negativo na parte inferior, um grande centro positivo na região superior, com cargas de blindagem positivas na base e negativas no topo. Eles dizem que as nuvens tendem a desenvolver desequilíbrio de cargas negativas com o tempo como resultado das cargas de blindagem negativas se direcionarem para o topo da nuvem. Modelos eletrodinâmicos mostram que o efeito das descargas nuvem-solo negativas é de mudar, subitamente, a carga total da nuvem de negativa para positiva. Dessa forma, o potencial muda rapidamente para positivo e o campo elétrico na parte superior da nuvem é aumentado. Um carregamento contínuo da nuvem pode levar uma descarga a ser disparada, entre as cargas de blindagem e o centro de carga superior da nuvem, em alguns segundos (Figura 2.12 c,g), que é esperado que escape para cima do topo da nuvem. A descarga teria a mesma polaridade deste centro de carga, e ela é o chamada de Jato azul.

O gatilho da descarga é suprimido se as cargas de blindagem se misturarem com o centro de cargas logo abaixo, mas caso essa mistura seja fraca ou ausente, é esperado que as descargas ocorram com frequência. O fato de que os jatos são raros, implica que a mistura da camada de blindagem com o centro de carga superior é forte em tempestades. O mecanismo explicado segue o modelo apresentado na Figura 2.12. A propagação dos jatos é dada da mesma maneira que a propagação dos líderes de um relâmpago acoplado com a ausência de uma barreira de potencial.

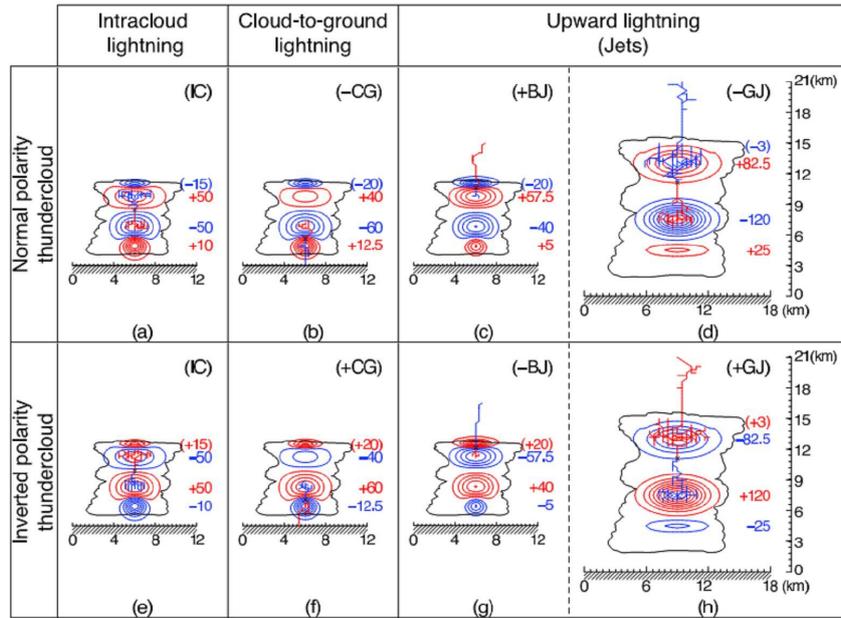


Figura 2.12 - Ilustração do mecanismo de iniciação de um jato azul e de um jato gigante em relação à polaridade. Nos quadros (a) até (d) temos a nuvem de tempestade na configuração "clássica" e nos quadros (e) a (h) temos a polaridade da nuvem invertida, as linhas vermelhas mostram cargas positivas e as linhas azuis representam carga negativa.
Fonte: Krehbiel et al. (2008).

De acordo com a teoria proposta Krehbiel et al. (2008) um jato gigante inicia na nuvem como um relâmpago intra nuvem, que se move para cima, e eventualmente "escapa" dela. Ele inicia entre os centros de carga da nuvem - local onde o campo elétrico é mais intenso - e a polaridade do jato gigante irá depender da polaridade da nuvem: para nuvens com o polaridade convencional será observado um jato negativo pois o centro de carga no topo será positivo, e para nuvens com polaridade invertida será observado um jato gigante positivo pois nesse caso há carga negativa no topo. Esse processo está esquematizado na figura 12. Pode-se observar que, para uma mesma configuração da nuvem, as polaridades entre jatos azuis e jatos gigantes são invertidas Krehbiel et al. (2008).

3 TRIANGULAÇÃO

Triangulação é um método para determinar a posição de um ponto no espaço. Nesse trabalho, são calculados a latitude, longitude e altitude de sprites. A triangulação nos permite analisar parâmetros morfológicos dos sprites bem como selecionar o relâmpago que os gerou com maior precisão, uma vez que adicionamos um critério espacial para a escolha.

No estudo de ELTs, são poucos os grupos que fazem triangulação dos eventos, em geral, aqueles que não possuem triangulação, estimam as altitudes atingidas pelos eventos, no entanto, esse é um método pouco preciso para determinar tanto a posição quanto a altitude atingida. Para que seja possível fazer triangulação, é necessário que o ELT seja capturado de dois sítios diferentes, essa condição é o principal motivo dos poucos trabalhos sobre triangulação na área, uma vez que capturar ELTs de um único sítio já apresenta dificuldades. Serão mostrados, agora, um resumo dos estudos de vários pesquisadores que utilizaram triangulação em suas análises para descrever e estudar a morfologia e características físicas dos sprites.

O primeiro estudo de triangulação de ELTs foi realizado por [Sentman et al. \(1995\)](#). Eles obtiveram capturas de sprites de avião entre 12.2 e 12.8 km de altitude. Não foi revelado o horário do primeiro ou do último sprite observado na noite, mas operaram as câmeras durante quatro horas, entre 22:00 e 02:00 horário local. Através de triangulação, eles encontraram que sprites ocorrem em altitudes entre 50 e 90 km sendo que o topo deles possui altitude de 88 ± 5 km e podem possuir extensão lateral até 40 km.

[Wescott et al. \(1996\)](#) fizeram observações de precursores azuis, e num período durante 6 m 44 s entre 3:02:47 e 3:09:30 UT, capturaram aproximadamente 30 eventos. As observações também foram feitas em aviões, na mesma campanha de observação que [Sentman et al. \(1995\)](#) em Julho de 1994. Através de triangulação, eles calcularam que os precursores azuis saem do topo da nuvem, 17 - 18 km, e atingem altitude máxima de 25 km com média de $20,8 \pm 1,8$ km e altitude máxima de 38 ± 5 km.

[Wescott et al. \(1998\)](#) capturaram 30 sprites coluna em duas horas de observação no dia 21 de Julho de 1996. As câmeras estavam instaladas em WIRO e Yucca Ridge a 600 km da tempestade, que se encontrava no estado de Dakota do Sul. A altitude do topo calculada por triangulação era de $84,3-88,9 \pm 1,9$ e o valor médio para a altitude da base era de $76,1 \pm 1,4$ km. Calcularam a distância entre o relâmpago e o sprite e o maior valor encontrado foi de 50 km.

Stenbaek-Nielsen et al. (2000) observaram uma tempestade durante três horas, que ocorreu sobre o estado de Nebraska no dia 18 de Agosto de 1999. Os sítios de observação eram em WIRO e Bear Mountain. Durante as três horas eles observaram 97 sprites e 60 halos. Observaram que os halos ocorrem, em geral, a 75 km de altitude.

Wescott et al. (2001) também estudaram halos capturados numa tempestade sobre o estado de Nebraska na noite de 18 de Agosto de 1999. Calcularam as altitudes de várias características dos halos e concluíram que eles possuem altitude média de 78 ± 4 km. Se encontram bem próximo do ponto onde o relâmpago tocou o solo, com uma distância de $4,6 \pm 2,7$ km. Fizeram uma comparação com sprites que ocorreram logo após o halo, e notaram que os sprites raramente se ocorriam próximo do relâmpago. Obtiveram uma distância média de $25,2 \pm 18,8$ km.

São Sabbas et al. (2003) estudaram 40 sprites capturados numa tempestade sobre o estado de Kansas em 22 de Julho de 1996. Os sprites foram observados num período de ~ 4 horas. Eles analisaram as relações entre relâmpago e sprite e encontraram que sprites tendem a ocorrer a ~ 50 km do relâmpago com valor máximo de 82 km. A partir dessa época, os estudos de triangulação se concentraram nas altitudes de início dos sprites e altitude dos streamers que formam sprites.

Stenbaek-Nielsen et al. (2007) analisaram a velocidade de propagação dos streamers de sprites capturados no Observatório de Langmuir no estado de Novo México durante uma campanha de observação em 2005. Eles calcularam a velocidade dos streamers e encontraram que eles podem se mover com velocidades da ordem de 10^7 m/s e a cabeça dos streamers são menores do que 140 m.

Stenbaek-Nielsen et al. (2010) estudaram altitudes de iniciação de sprites capturados nos sítios de Langmuir durante campanhas em 2007 e 2008. Observaram uma tempestade em 2007 que durante 5 horas e observaram 11 sprites, 10 dos quais eram coluna e 1 sprite cenoura. No dia 3 de julho de 2008 foram observados 18 sprites cenoura e coluna. Concluíram que os streamers começam com propagação para baixo e pouco depois há a propagação de streamers para cima. Calcularam que, streamers que vão para cima, se iniciam entre 64 e 78 km de altitude e aqueles com propagação para baixo possuem início entre 69 e 89 km.

Velde et al. (2010) observaram 17 sprites na noite de 6 de agosto de 2008 no noroeste da Espanha. Calcularam que os sprites se encontravam a 43 km dos relâmpagos geradores. Concluíram que o tamanho horizontal e direção de desenvolvimento dos

sprites eram próximos do tamanho e desenvolvimento do relâmpago dentro da nuvem abaixo.

[Kanmae et al. \(2012\)](#) analisaram sprites capturados de uma tempestade no sudeste do estado de Arizona nos dias 14 e 15 de Julho de 2010 no Laboratório de Langmuir. Calcularam a velocidade dos streamers, 3×10^6 m/s e observaram que streamers com diâmetros maiores se movem com velocidades maiores daqueles com diâmetros menores.

4 INSTRUMENTAÇÃO

ELTs possuem uma natureza efêmera, são gerados pela atividade elétrica de nuvens de tempestade, possuem uma duração curta e é difícil vê-los devido sua baixa luminosidade, a distância entre o observador e o evento e a absorção da luz pela atmosfera (SENTMAN E WESCOTT, 1996). Para observar um ELT é necessário se situar entre ~ 100 a 1000 km de distância da tempestade, de forma que se possa ter uma visão clara da atmosfera acima da nuvem. Sob as circunstâncias corretas, é possível observá-los a olho nu, embora seja muito difícil devido aos fatores mencionados acima.

No início das observações, ELTs eram estudados com câmeras de vídeo comuns que coletavam 30 qps, e com as imagens coletadas, foi possível obter várias informações sobre os eventos (FRANZ et al., 1990; SENTMAN et al., 1995). As pesquisas avançaram com a utilização de fotômetros, espectrômetros e sensores de radiação eletromagnética nas faixas de frequência muito baixa e extremamente baixas (tradução dos termos em inglês VLF e ELF respectivamente). Como se tratava de fenômenos com curta duração, as câmeras rápidas CCD (Charge Coupled Device), capazes de adquirir imagens com taxa superior a 1000 qps, provaram ser um instrumento de grande importância na observação de ELTs.

Como esses são fenômenos de baixa intensidade luminosa, geralmente utiliza-se um instrumento extra para aumentar a quantidade de luz que chega na lente da câmera. Acopla-se às câmeras equipamentos que multiplicam a quantidade de fótons recebidos pelos sensores, denominados intensificadores. Com eles, as câmeras recebem um sinal amplificado podendo registrar o fraco brilho emitido pelos ELTs com facilidade. Com estes equipamentos, mesmo uma câmera que esteja a 500 km da tempestade pode observar claramente os ELTs. Embora para alguns tipos de câmeras sejam necessários o uso do intensificador, certos tipos de modelos não o utilizam e conseguem observar sprites como no caso das câmeras Watec, no entanto, o uso desse tipo de câmera é limitado e depende dos objetivos do estudo. Existem também câmeras *Electron Multiplying Charge Couple Devices* (EMCCD) que não utilizam um intensificador. Devido à presença de uma estrutura que multiplicam as cargas de cada pixel do sensor antes da leitura chamada de Registro de ganho (tradução livre do termo *Gain Register*). Esse tipo de câmera não utiliza intensificador uma vez que o Gain Register possui uma função similar e com o mesmo objetivo. Iremos descrever o equipamento utilizado para fazer as observações e em seguida serão descritos o funcionamento dos instrumentos utilizados nesse trabalho.

Os dados foram obtidos de duas campanhas diferentes realizadas nos Estados Uni-

dos, uma no mês de julho de 1996 e a outra em agosto de 1999. As observações foram realizadas por dois grupos de pesquisadores: Universidade de Alaska (UAF) e Universidade do Estado de Utah (USU).

4.1 Equipamento usado em 1996

O grupo da UAF estavam com câmeras instaladas nas coordenadas: 41.098° N, 105.997° O, no Rádio-Observatório Infravermelho de Wyoming (cuja sigla em inglês é WIRO) no estado de Wyoming, EUA 4.1. Tinham uma câmera ICCD com ângulo de visada de 17° operando com resolução temporal de ~ 17 ms e tempo fornecido por um GPS com precisão de 1ms estampado na imagem. No dia 22, a tempestade quase todo o estado de Kansas (com exceção do sudeste do estado) cobrindo também o sudeste do estado de Nebraska. O grupo da USU operavam câmeras instaladas em

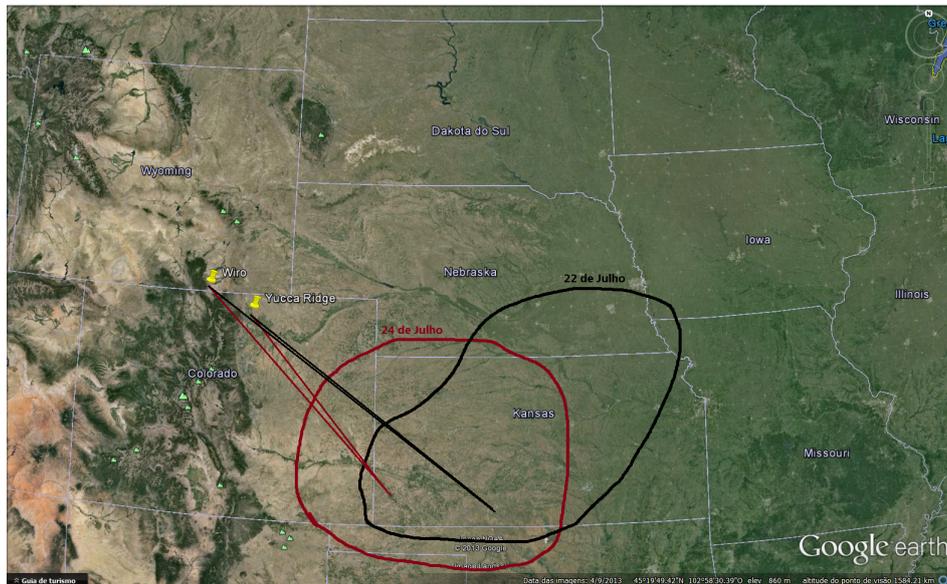


Figura 4.1 - Local onde estavam instaladas as câmeras para observação nos dias 22 e 24 de julho de 1996 e um esboço das tempestades quando o primeiro sprite da noite foi observado.

Yucca Ridge Field Station (40.668° N, 104.939° O) no estado de Colorado, EUA. Possuíam uma câmera ICCD com resolução de ~ 25 ms com campo de visada de 20° .

4.2 Equipamento usado em 1999

Nesse ano os pesquisadores da UAF instalaram câmeras em dois sítios de observação diferentes. Uma foi instalada no WIRO no estado de Wyoming, EUA nas coordenadas: 41.098° N, 105.997° E. Era uma camera ICCD com angulo de visada de 10° X 14° , operando a uma resolução de ~ 17 ms e tempo GPS na imagem. A segunda câ-mera foi instalada em Bear Mountain no estado de Dakota do Sul, EUA em 43.869° N, -103.744° E. Possuía um ângulo de visada de 10 X 8 e operava a uma reolução de 17 ms. A tempestade cobria quase todo o estado de Nebraska e Iowa, e uma o sul de Minnesota.

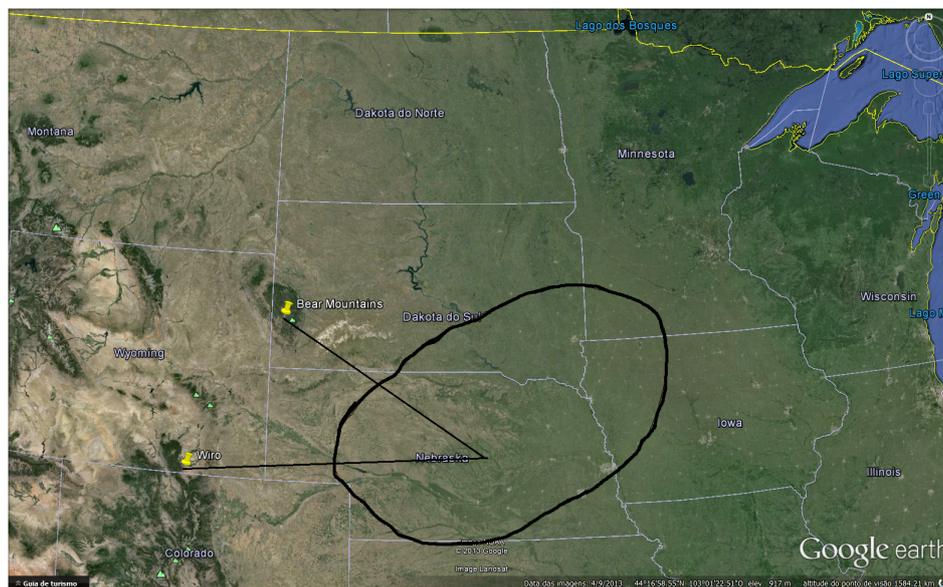


Figura 4.2 - Local onde estavam instaladas as câmeras para observação no dia 18 de agosto de 1999 e um esboço da tempestade quando o primeiro sprite da noite foi observado. A área em vermelho é um esboço da nuvem do dia 24 de julho no horário que o primeiro sprite foi observado. A área em preto é para o dia 22 de julho.

Nas duas campanhas de observação (96 e 99) foram utilizados mais equipamentos para capturar os sprites como, câmeras ICCD com 1000 fps, filtros 400 - 900 nm, campo elétrico “Broadband” entre 200 Hz e 200 kHz, entre outros. No entanto, nenhum dos dados coletados por esses instrumentos foram utilizados para fazer as análises, apenas as câmeras descritas anteriormente. A seguir encontra-se uma descrição do funcionamento geral de câmeras CCD e de intensificadores.

4.3 Câmeras CCD

As chamadas câmeras CCD são as que utilizam um sensor do tipo CCD, que significa Charged Couple Device, para detectar os fótons da luz que chega na superfície do sensor e registrar a imagem. O CCD, é um sensor feito de um material semicondutor, no caso utiliza-se o silício, cujo o princípio básico de funcionamento é baseado no Efeito Fotoelétrico e possui três funções básicas: Coletar carga, transferir carga e converter a carga em voltagem mensurável (HOLST, 1998).

Cada detector num CCD é chamado de pixel. Um sensor CCD consiste de um grande número de pixels arranjados em linhas e colunas. O número de linhas e de colunas definem o seu tamanho, que pode ser de 512 X 512, 1024 X 1024 pixels, entre outros, sendo que o número de colunas e linhas não precisa ser igual.

Os pixels são utilizados para converter fótons (luz) em carga elétrica. Quando a luz incide no sensor, os fótons realizam o efeito fotoelétrico, excitando a superfície e retirando elétrons da CCD. A taxa com que os fótons incidem determina quantos elétrons são criados por unidade de tempo no pixel. Esse processo ocorre até que um eletrodo toca o sensor, retirando as cargas do pixel e as transferindo ao longo do sensor. Essa técnica é a de acoplamento de carga (*charge coupling* que dá o nome ao sensor CCD). Esse processo é repetido até que todas as cargas estejam orientadas e então são enviados à saída da CCD que faz a leitura da imagem coletada. Os eletrodos que são usados para transferir a carga são controlados eletronicamente e formam a grade que separa cada pixel (ALLIN et al., 2006).

Os sensores CCD podem ser construídos utilizando três arquiteturas diferentes: Full Frame, Full Transfer e Interline-Transfer (Figura 4.3). A diferença entre cada uma está na configuração física do sensor, armazenamento e transferência de cargas.

- Full Frame Transfer juntamente com a Frame Transfer 4.3(a), possuem a maior área sensível à luz, com os pixels constantemente expostos durante a leitura, algo que resulta numa boa resolução espacial. No entanto, devido à essa constante exposição, a imagem pode possuir manchas causada pela incidência de luz enquanto ocorre o processo de leitura.
- Frame Transfer - 4.3(b) - tipo de sensor que possui a maior área total, onde metade é utilizada para coletar a luz e metade como armazenador de cargas, protegido da luz durante a aquisição da imagem. A carga acumulada é rapidamente transferida para a região de armazenamento (região escura

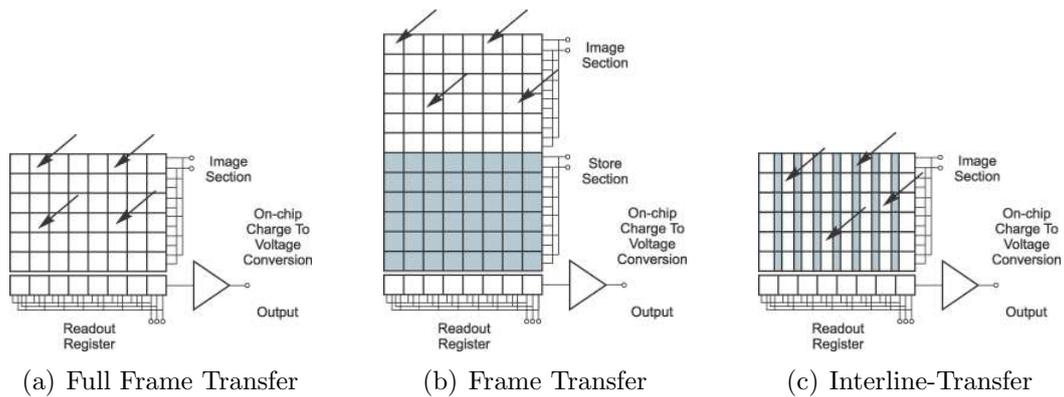


Figura 4.3 - Principais arquiteturas que governam os sensores de uma câmera CCD.

na Figura 4.3(b)) reduzindo a possibilidade de manchas na imagem.

- Interline-Transfer sacrifica parte da área sensível com uma estrutura de armazenamento localizada o mais próximo possível dos pixels, dessa maneira, as cargas são rapidamente transferidas ao longo do sensor após a aquisição da imagem - 4.3(c). Com essa veloz transferência de cargas, a interline-transfer possibilita uma resolução temporal superior às outras duas, favorecendo a aquisição de imagens com tempo de exposição muito pequenos (ALLIN et al., 2006).

4.3.1 Alcance Dinâmico

Alcance dinâmico, *dynamic range* em inglês, é a habilidade que a câmera possui de gravar sinais de baixa e alta luminosidade simultaneamente. Isso depende da capacidade que os pixels possuem de armazenarem carga. Os pixels conseguem armazenar um certo limite de carga nos poços de potencial. Se cargas são geradas além do limite do pixel, acontece um vazamento, em inglês *blooming*, que é quando as cargas em excesso em um pixel começam a migrar para outro pixel, contaminando a imagem. Nesse momento, a câmera não mais opera linearmente e começa a perder resposta quantitativa do sinal.

4.3.2 Resposta Espectral (QE)

A resposta espectral ou eficiência quântica, é a probabilidade com que um fóton irá contribuir ao sinal eletrônico recebido no sensor, ou seja, a capacidade que um material possui de absorver fótons e liberar um elétron pelo Efeito Fotoelétrico (ALLIN et al., 2006). É uma característica intrínseca que qualquer sensor de fótons

possui, seja o olho humano, um filme fotográfico ou um chip CCD. Para uma câmera rápida, esse valor varia para cada comprimento de onda (λ), desta forma, uma CCD pode possuir uma resposta espectral de 80% para luz incidente na faixa de 400 nm e menos de 10% para $\lambda > 700\text{nm}$. Nesse exemplo, a câmera teria boa sensibilidade em captar a luz azul, mas quase não perceberia a cor vermelha.

4.3.3 Agrupamento

Existem duas maneiras que o leitor de uma CCD realiza a leitura da imagem coletada pelos pixels. São elas pixel a pixel ou por agrupamento de pixels (do inglês binning). Na primeira, ocorre a transferência de carga dos pixels para o leitor separadamente, de modo que a carga de cada pixel é movida verticalmente para o readout register (para simplificar, utilizaremos o nome em inglês da estrutura da CCD 4.3(a)) ocupando apenas um poço de potencial (espaço vazio que se encontra logo abaixo à cada coluna 4.3(a)), em seguida a carga é movida horizontalmente para o leitor final da imagem. Assim a leitura da imagem é realizada com a carga de um pixel por vez. No caso da leitura por agrupamento, o sistema espera até que a carga de um determinado número de pixels esteja armazenada no readout register, tal que, a carga de vários pixels de uma das colunas é transferida para apenas um poço. Isso ocorre com todas as colunas da CCD de forma que parte da carga se encontra armazenada no readout register. Em seguida elas se movem horizontalmente para fazer a leitura da imagem, onde mais uma vez o sistema armazena toda a carga em apenas um dos poços. A leitura da imagem é feita utilizando toda a carga desses pixels de uma só vez. Ao combinar sua carga em um só espaço, o processo de agrupamento perde resolução espacial em relação ao pixel a pixel, no entanto ele requer um tempo muito menor para fazer a aquisição final das imagens e diminui significativamente o ruído.

4.4 Intensificador

Um intensificador é um aparato utilizado para multiplicar o número de fótons que chegam em algum sensor. Possui a forma de tubo com vácuo, geralmente com diâmetro de 18-25mm.

O funcionamento de um intensificador é baseado no Efeito Fotoelétrico e é realizado da seguinte maneira: uma porção dos fótons incidentes atingem o fotocátodo liberando fotoelétrons. Esses fotoelétrons emitidos atingem as paredes internas do intensificador e devido a um emissor de elétrons presente, os fotoelétrons são multiplicados. Ao saírem do emissor, os elétrons são acelerados por uma tensão constante

aplicada (Figura 4.4). Em seguida os fotoelétrons multiplicados e acelerados incidem numa tela de fósforo que converte as cargas em fótons para a detecção da CCD. O objetivo final, é fazer com que a incidência de um fóton gere vários outros. Assim, é possível obter imagens de eventos que possuam brilho tênue, tal que seria difícil de captar com uma câmera CCD simples. Portanto, os principais componentes de um intensificador são o fotocátodo, Micro-channel plate (MCP) e a tela de Fósforo.

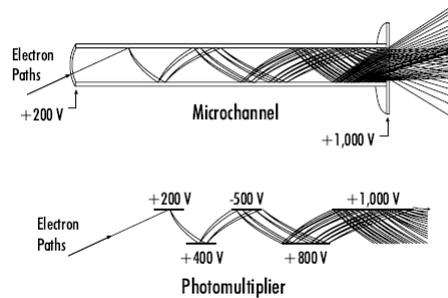


Figura 4.4 - Esquema da multiplicação de fótons

4.4.1 Componentes de um intensificador

Fotocátodo é um dos principais componentes de um intensificador. É um revestimento que converte fótons incidentes em elétrons, no entanto, não são todos os fótons que são absorvidos, e os fótons que não são capturados são perdidos no sinal final produzido pelo intensificador. Portanto a eficiência quântica (QE) é de suma importância para os intensificadores. No entanto, a presença do fotocátodo introduz uma componente do ruído de um intensificador. Esse ruído vem dos elétrons gerados termicamente e é conhecido como Iluminação de fundo equivalente (EBI, do inglês Equivalent Background Illumination). Esses elétrons são indistinguíveis daqueles gerados pelos fótons portanto eles contaminam o sinal da imagem. Esse ruído pode ser diminuído ao resfriar o intensificador.

Micro-channel plate (MCP) é o segundo mais sofisticado componente de um intensificador. Se trata de um substrato de vidro pouco condutivo (aproximadamente 2 cm de diâmetro e 5 mm de espessura) contendo um emissor de elétrons nas paredes internas. Elétrons formados no fotocátodo são conduzidos pelo MCP por um campo elétrico constante, de uma tensão (600-900V), aplicada ao MCP. Múltiplas colisões ocorrem de maneira que mais elétrons são retirados das paredes como mostra a Figura 4.4. Em essência, cada canal MCP age analogamente a um fotomultiplicador

comum.

Tela de Fósforo, o terceiro grande componente de um intensificador. Elétrons saindo do MCP são acelerados por uma tensão constante (5-8kV) e atingem a tela, onde são convertidos de volta à fótons para a detecção da CCD.

5 DADOS E METODOLOGIA

5.1 Dados

Neste trabalho, foram utilizados dados de duas fontes diferentes: dados de sprites extraídos de vídeos e dados de relâmpagos coletados pela rede de detecção de relâmpagos americana National Lightning Detection Network (sigla em inglês: NLDN).

Os vídeos de sprite que foram utilizados no trabalho foram capturados em 3 datas diferentes: 22 e 24 de julho de 1996, e 18 de agosto de 1999. Os responsáveis pelas observações foram pesquisadores da Universidade do Alaska Fairbanks e Universidade do Estado de Utah. Foram utilizados um total de 274 sprites, dos quais 146 foram triangulados como mostrado na [Tabela 5.1](#).

Tabela 5.1 - Conjunto de dados usados para fazer a triangulação

Data	Eventos Triangulados	Eventos observados na noite
22 julho 1996	51	79
24 julho 1996	77	128
18 agosto 1999	18	67
Total	146	274

Devemos notar que na [Tabela 5.1](#) o número de eventos triangulados é menor do que o número total de eventos observados. Os motivos pelos quais não foi possível realizar a triangulação de todos os eventos são:

- Apenas uma das câmeras capturou o evento.
- Uma das câmeras observou uma parte do evento e a segunda câmera observou a outra parte.
- Nuvens atrapalhando o campo de visada de ambas as câmeras.
- Pequeno número de estrelas no campo de visão das câmeras.

Os dados de relâmpago providos pela NLDN possuem várias características de todos os relâmpagos que foram detectados pela rede. As informações que utilizamos são: data, horário UT, polaridade, latitude, longitude e pico de corrente.

5.2 Metodologia

O objetivo deste trabalho é estudar sprites analisando várias características morfológicas assim como a relação entre os sprites e os relâmpagos associados, com base na triangulação dos eventos.

Os parâmetros utilizados para essa análise são:

- Pico de corrente do relâmpago (I_p)
- Intervalo de tempo entre relâmpago e sprite (Δt)
- Distância entre o relâmpago e sprite (ΔS)
- Duração dos sprites
- Número de sprites por evento
- Horário de observação
- Altitude do topo dos sprites (h_t)
- Altitude da base dos sprites (h_b)
- Tipo de sprite
- Extensão vertical dos sprites (E_v)

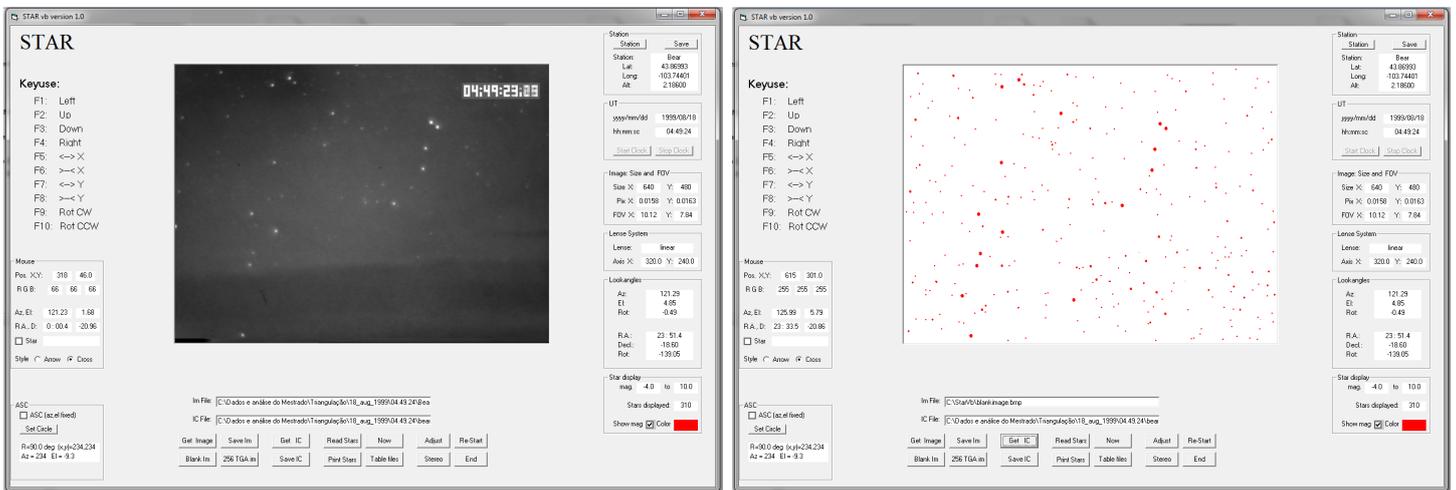
A metodologia utilizada para a análise foi:

- 1) Seleção dos eventos a serem triangulados
- 2) Triangulação dos eventos
- 3) Seleção dos relâmpagos das tempestades utilizando um critério temporal e outro espacial
- 4) Análise comparativa dos parâmetros escolhidos

Selecionamos os sprites que tiveram toda sua extensão espacial capturados pelas duas câmeras de modo a identificar seu tipo e triangular esses eventos. A técnica de triangulação consiste em usar imagens do mesmo fenômeno coletadas com câmeras em dois lugares diferentes para determinar suas coordenadas (latitude, longitude

e altitude). Os cálculos das coordenadas geográficas e devidas correções para as distorções atmosféricas foram realizados com rotinas computacionais do programa StarStereo, criado por [Stenbaek-Nielsen et al. \(1984\)](#) para analisar imagens de suas pesquisas sobre aurora e liberação química.

O método consiste em ajustar o mapa estelar calculado pelo programa para a região do céu observada pela câmera no dia e horário de observação específicos com as estrelas efetivamente presentes na imagem obtida pela câmera. Primeiramente fornecemos as coordenadas exatas do local de observação (latitude, longitude e altitude), ângulo de elevação, azimute das câmeras e o horário em que foi gravada a imagem na função “Star” do programa ([Figura 5.1](#)). Com o mapa estelar, o próximo



(a)

(b)

Figura 5.1 - Exemplo de um campo de estrelas e o mapa estelar correspondente após inserir corretamente os parâmetros de localização e campo de visada da câmera: latitude, longitude, altitude, azimute, elevação, data e horário UT.

passo é identificar as estrelas que estão no campo de visada da câmera e procurar as estrelas correspondentes no mapa estelar ajustando-o de forma que as estrelas do mapa fiquem sobrepostas às estrelas da imagem da câmera como mostrado na [Figura 5.2](#). Uma vez que o mapa estelar corresponde da melhor maneira possível às estrelas da imagem, selecionamos a figura que possui o sprite que será triangulado. Todo o processo descrito acima é realizado com as imagens dos dois sítios de observação. Ao selecionar as duas imagens de sprites, passamos à função que faz a triangulação dos eventos, que é a função “Stereo” do programa StarStereo.

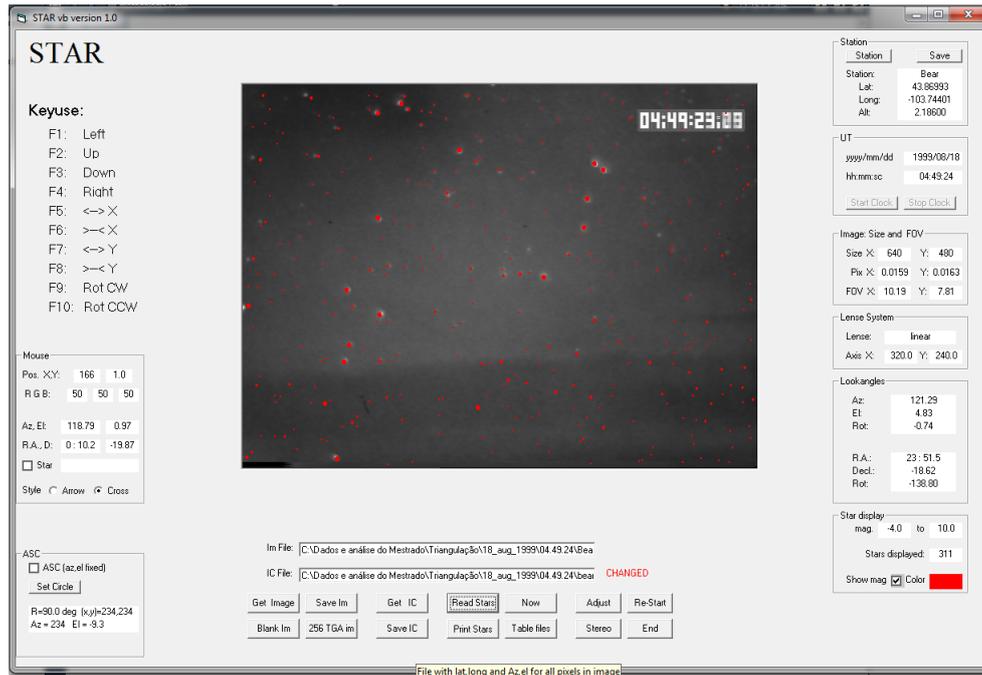


Figura 5.2 - Ajuste do mapa estelar com as estrelas da imagem. Note que a magnitude das estrelas é representada pelo tamanho e que as estrelas de menor magnitude não são visíveis na imagem da câmera devido a sua baixíssima luminosidade.

Na função Stereo, uma das imagens funciona como imagem de controle enquanto a outra é utilizada para fazer a triangulação. Na imagem de controle, selecionamos o ponto da imagem que queremos saber as coordenadas (topo, base ou outra característica do sprite). Por exemplo na Figura 5.3 foi triangulada a lateral do sprite.

Em seguida, selecionamos a imagem de controle. Imediatamente notamos que ela possui um ponto que define o local a ser triangulado, chamamo-lo de ponto de controle. No entanto, os pontos de triangulação e o de controle não se encontram no mesmo lugar, enquanto que na imagem de controle exatamente no local que queremos triangular, seu correspondente pode estar deslocado na outra imagem, como mostrado na Figura 5.4.

O que resta fazer então é alinhar o ponto de triangulação com o ponto de controle de forma que eles correspondam a mesma estrutura do sprite, nesse exemplo, na lateral do sprite (Figura 5.3). Ao fazê-lo, a triangulação está terminada com os resultados aparecendo no canto inferior esquerdo como ilustrado na Figura 5.5.

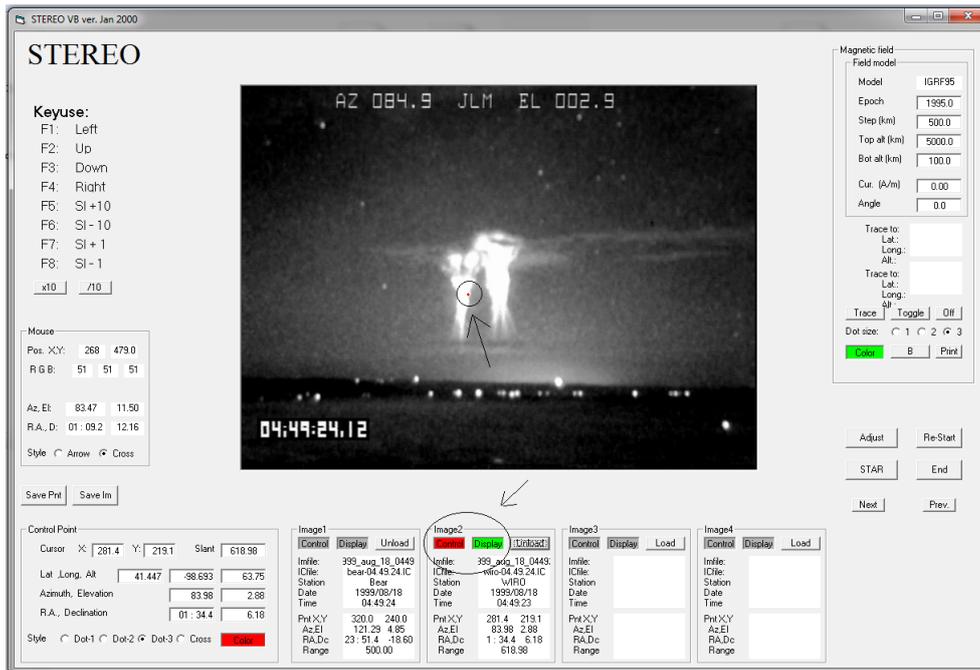


Figura 5.3 - Exemplo da função stereo mostrando o ponto do sprite que será triangulado.

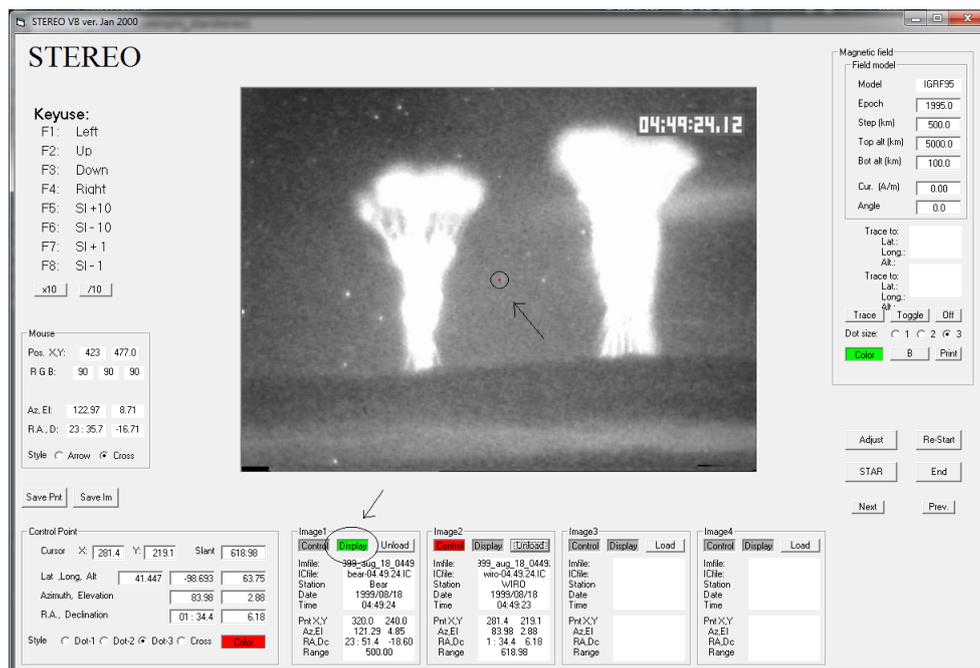


Figura 5.4 - Exemplo da função stereo mostrando a posição do ponto de triangulação correspondente ao ponto de controle.

O erro da triangulação é calculado utilizando o mesmo programa. Após o ajuste das estrelas (Figura 5.2) na seção Star, calculamos o quanto temos que mudar o

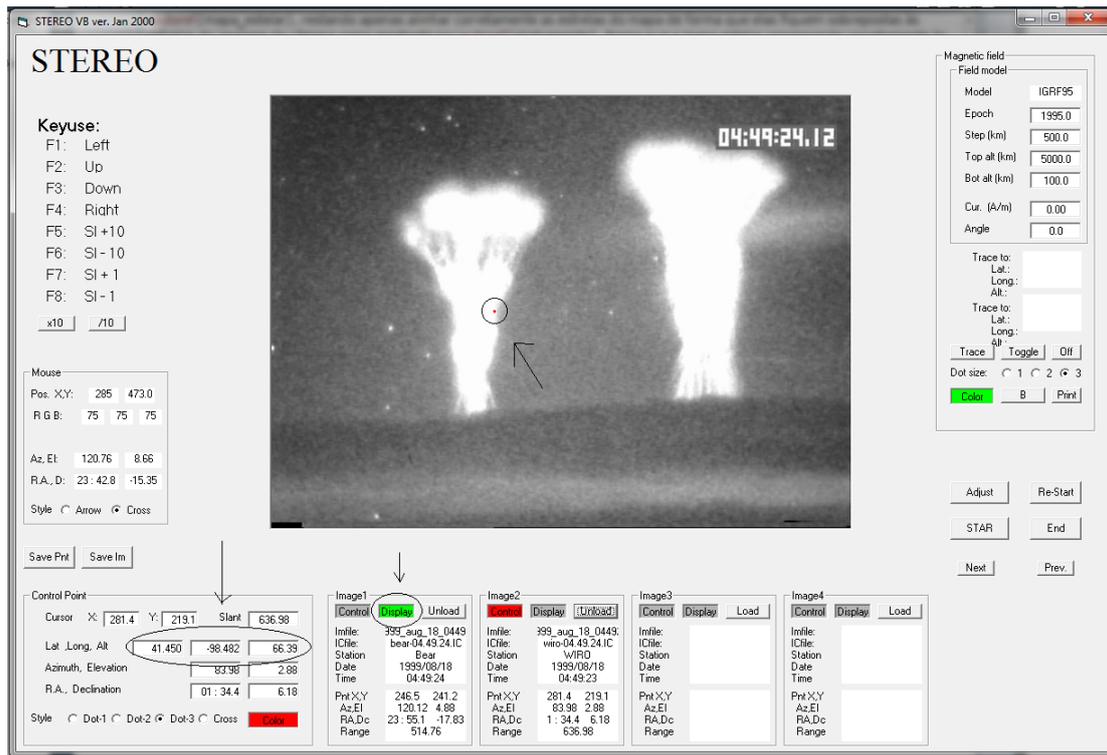


Figura 5.5 - Alinhamento final do ponto de triangulação com o ponto de controle.

azimute para que o campo de estrelas mude de um pixel para o outro. Fazemos isso da seguinte maneira: FoV/n° de pixels, onde FoV é a sigla em inglês para Campo de visada (field of view). Por exemplo, uma imagem com 640 pixels e um ângulo de visada de $10,13^\circ$ no eixo X indica que um pixel equivale a $0,0158^\circ$. Com isso, movemos o azimute da imagem por $0,0158^\circ$ e recalculamos a posição do sprite na seção Stereo. A diferença entre a posição inicial e a final é o erro. Uma maneira simplificada de fazer isso, é, na seção Stereo, mudar o ponto de controle em 0,0158° (1 pixel) e fazer o mesmo cálculo. Isso foi realizado tanto para calcular o erro na distância entre o sprite e o sítio de observação quanto o erro na altitude.

As fontes de erro dessa técnica são: Tamanho do pixel, ajuste das estrelas e paralaxe.

Tamanho do pixel: Está relacionado com o campo de visada e com o número de pixels da câmera. Em geral, cada pixel denotava uma mudança entre 0.014 e 0.045° .

Ajuste das estrelas: Esse erro depende do número de estrelas perto do sprite na imagem e de não linearidades das lentes, especialmente quando temos eventos que ocorrem nos limites do campo de visada da câmera. Devido à distorções da lente, que variam com o tipo de lente em si, e são mais acentuadas nas bordas, o ajuste das

estrelas do mapa estelar com a imagem do sprite não é perfeito. Inicialmente tentamos otimizar o ajuste de modo que as estrelas do centro estejam bem alinhadas ao mapa estelar. O ajuste das estrelas no centro da imagem nos dá a maior precisão, ou seja o menor erro, no entanto, o ajuste das estrelas que ficam nos cantos da imagem raramente fica tão bom quanto no centro, o que aumenta significativamente o erro dos cálculos para sprites que se encontram em tais regiões nas imagens. Ainda assim, quanto mais estrelas tiverem perto dos sprites, maior é a precisão da técnica. Então, sprites que se encontram nas bordas da imagem e que possuam menos estrelas próximos a eles, são os que possuem maior incerteza na sua localização.

Paralaxe: Essa fonte de erro afeta principalmente o cálculo da distância do sprite. Paralaxe é a diferença angular entre dois observadores que estão olhando um mesmo fenômeno. Quanto menor a paralaxe, maior será o erro, pois isso indica que os observadores estão capturando o evento numa linha de visão semelhante. Um exemplo disso está nas [Figura 4.1](#) e [4.2](#). Note que nos dias 22 e 24/07 ([Figura 4.1](#)) as câmeras estão numa posição tal que elas observam a nuvem com praticamente a mesma linha de visão, enquanto que as câmeras do dia 18/08 ([Figura 4.2](#)) tinham duas visões bem distintas da tempestade.

Os resultados da triangulação nos permitem estudar as características morfológicas dos sprites como altitude do topo, extensão vertical, etc, e permitem utilizar um critério espacial para selecionar os relâmpagos que geraram os sprites com maior precisão. A grande maioria dos trabalhos estudando a relação entre relâmpagos e sprites publicados na literatura utiliza apenas o critério temporal, uma vez que as observações foram realizadas de um único sítio de observação e portanto os eventos não foram triangulados. As exceções são os trabalhos de [Sentman et al. \(1995\)](#), [Wescott et al. \(1996\)](#), [Stenbaek-Nielsen et al. \(2000\)](#), [Wescott et al. \(2001\)](#), [São Sabbas et al. \(2003\)](#), [Stenbaek-Nielsen et al. \(2007\)](#), [Stenbaek-Nielsen et al. \(2010\)](#), [Kanmae et al. \(2012\)](#). Utilizando os dados de relâmpago providos pela NLDN para os dados de 1996 e 1999, obtivemos posição, horário UT, polaridade e pico de corrente.

Como a rede de detecção não se limita a dados da tempestade que estamos estudando, temos que selecionar cuidadosamente os possíveis relâmpagos que geraram os sprites. Para isso, usamos dois critérios: Intervalo de tempo entre o relâmpago e o sprite $\Delta t < 300$ ms e distância entre relâmpago e sprite < 200 km. Para a maioria dos relâmpagos selecionados o intervalo foi menor do que 200 ms e a distância entre sprite/relâmpago foi menor do que 100 km.

Através dos vídeos de observação de sprite podemos determinar a duração, tipo e

número de sprites por evento. Com a triangulação podemos obter outras informações além da posição do evento. Foram calculados a altitude do topo, da base e do meio do sprite. Com essas informações, os dados foram organizados na [Tabela 5.2](#). No total, foram analisados 274 sprites, sendo eles observados pelas duas câmeras ou não. Desse número total, 145 sprites foram triangulados, ou seja, o critério de que devemos ter eventos observados pelas duas câmeras reduziu nossos dados de 274 para 145. E finalmente, dos 145 sprites triangulados, foram utilizados 121 deles. Essa nova redução se deve ao critério de seleção do relâmpago gerador dos sprites. Por exemplo, foram observados sprites sem que a rede tenha detectado um relâmpago gerador, ou que foi observado um relâmpago que tenha ocorrido num intervalo de tempo muito grande (< 500 ms).

Para a grande maioria das análises deste trabalho, foram utilizados os dados da terceira coluna da [Tabela 5.2](#), pois são os dados que possuem triangulação e relâmpagos geradores. Os dados da primeira coluna foram utilizados para estudar a distribuição de sprites ao longo da noite, uma vez que não é necessário triangulação ou determinação do relâmpago para esse tipo de análise.

Tabela 5.2 - Conjunto de dados usados para fazer as tabelas para análise

	N° total de eventos	Eventos triangulados	Eventos utilizados
22 julho 1996	79	51	34
24 julho 1996	128	77	70
18 agosto 1999	67	17	17
Total	274	145	121

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse trabalho, foram estudados sprites gerados de três tempestades diferentes que ocorreram nos Estados Unidos nos dias 22 e 24 de julho de 1996 e em 18 de agosto de 1999. Serão apresentadas a seguir, os resultados do estudo de sprites.

A [Figura 6.1](#) mostra a relação entre o intervalo de tempo e a distância entre os sprites e relâmpagos estudados.

Observamos que, em sua maioria, os intervalos temporais entre relâmpago e sprite não ultrapassaram 100 ms, sendo que o valor máximo foi de 242 ± 16 ms. Obtivemos uma média de 50 ± 11 ms, que é um valor razoável comparado com o resultado obtido por outros pesquisadores: média de 30 ms ([SÃO SABBAS et al., 2003](#)), 30-280ms ([MIKA et al., 2005](#)), até ~ 200 ms ([VELDE et al., 2006](#)), média de 68 ms ([HU et al., 2007](#)), até ~ 150 ms ([GAMEROTA et al., 2011](#)). É possível que os relâmpagos que realmente geraram os eventos que tiveram grandes intervalos temporais Δt , não tenham sido detectados pela rede ou que o grande Δt seja devido à corrente contínua dos relâmpagos positivos que o geraram ([CUMMER E FÜLLEKRUG, 2001](#); [HU et al., 2007](#); [LI et al., 2008](#)). A corrente contínua é um modo contínuo de transferência de carga da nuvem para o solo após a descarga de retorno. [Saba et al. \(2010\)](#) observaram que, aproximadamente $\sim 97\%$ dos relâmpagos positivos apresentavam corrente contínua, sendo que 75% deles possuíam corrente contínua longa (>40 ms). Como a corrente contínua é um fluxo constante de cargas da nuvem para o solo durante um longo período de tempo, ela pode promover a quebra de rigidez dielétrica, iniciando um sprite com uma grande “atraso” em relação ao relâmpago ([CUMMER E LYONS, 2005](#); [HU et al., 2007](#)).

Observa-se que a maioria dos sprites ocorreram num raio de até 100 km com até de 100 ms depois do relâmpago. No dia 24 de Julho, $13 \pm 4\%$ dos eventos tiveram Δt maior do que 100 ms e apenas $5 \pm 3\%$ ocorreram com distância maior do que 100 km. No dia 22 de julho, $11 \pm 5\%$ dos sprites tiveram Δt maior do que 100 ms e não houve nenhum sprite com distância maior do que 90 km. Em 18 de agosto de 1999, houve apenas um evento com intervalo de tempo maior que 100 ms e não houve sprite com distância maior que 67 km. Obtivemos uma distância média total de 37 ± 1 km sendo que a distância máxima detectada foi de 150 ± 11 km. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por outros grupos: [Sentman et al. \(1995\)](#) encontraram distância máxima de 100 km, [Füllekrug et al. \(2001\)](#) obtiveram máximo de 60 ± 5 km, [Lyons \(1996\)](#), [Wescott et al. \(1998\)](#), [Wescott et al. \(2001\)](#), [São Sabbas et al. \(2003\)](#) obtiveram média de 50 km e [Velde et al. \(2010\)](#) encontrou média de 43 km.

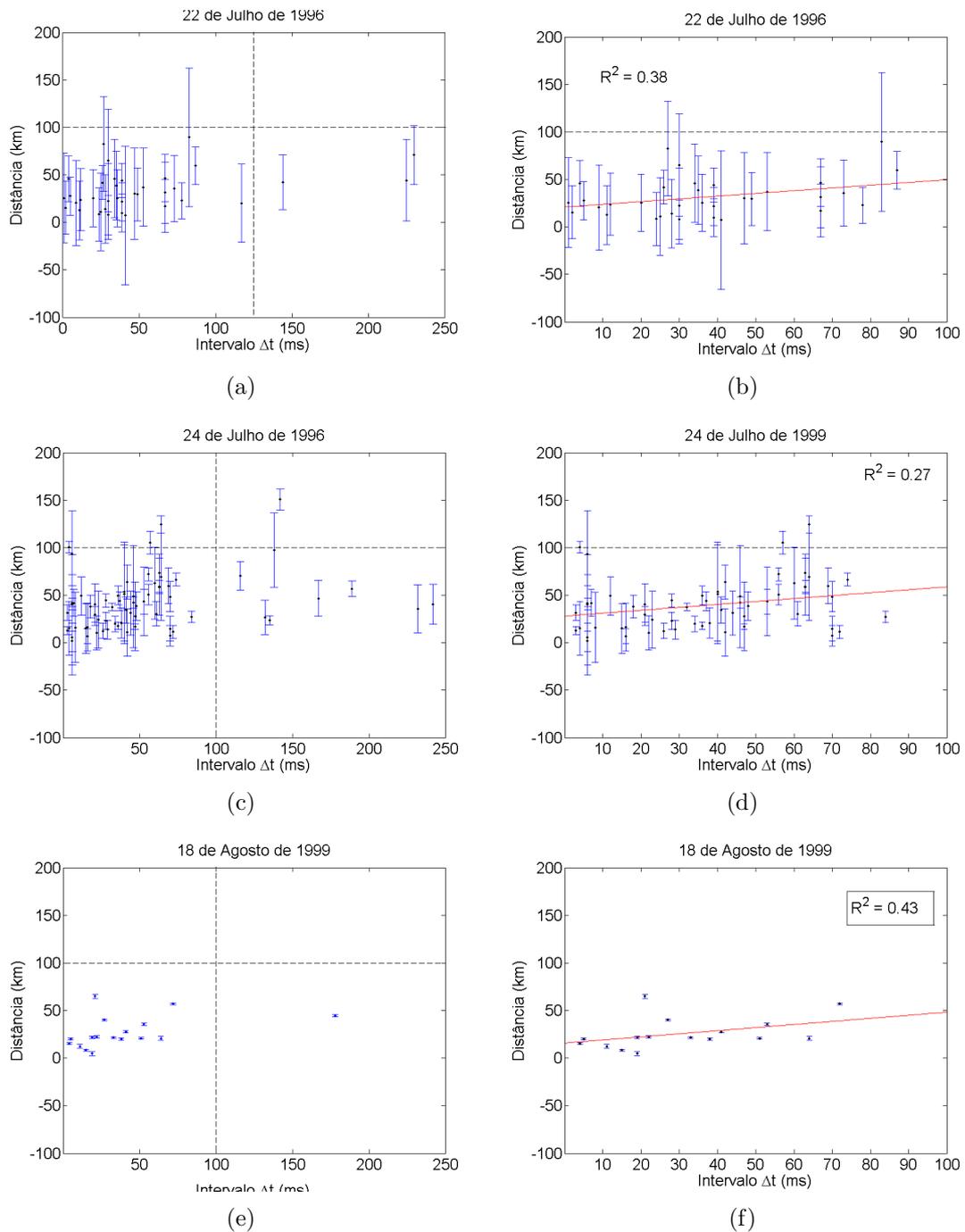


Figura 6.1 - Relação entre Δt vs Distância entre o sprite e o relâmpago. As Figuras 6.1(f), 6.1(b) e 6.1(d) são o resultado de um fit linear dos dados considerando o intervalo até 100 ms.

A distância horizontal entre o relâmpago e o sprite é obtida pela diferença entre a localização do relâmpago e do sprite. Ela pode ser explicada pela propagação do relâmpago gerador na nuvem. Asano et al. (2009) fizeram modelos 3D para estudar

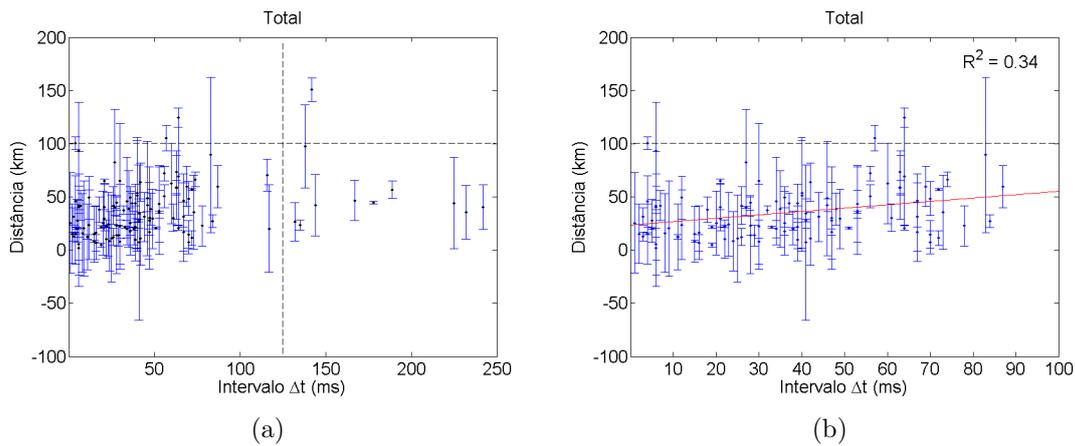


Figura 6.2 - Relação entre Atraso do sprite com a distância para todos os eventos analisados.

sprites. Considerando o relâmpago gerador apenas com propagação vertical, eles observaram que o sprite ocorria logo acima do relâmpago. Ao adicionar propagação horizontal do relâmpago, observaram que a posição do sprite é alterada de acordo com a extensão do canal horizontal. Lang et al. (2011) também estudaram a distância entre o relâmpago e o sprite através de observações no solo para obter informações de sprite e utilizaram LMA para obter um mapeamento do caminho do relâmpago dentro da nuvem. Seu resultado dá suporte àquele de Asano et al. (2009) e sugerem ainda que os sprites ocorrem sobre os locais em que há neutralização da carga da nuvem pelo relâmpago.

Na Figura 6.1 analisamos o intervalo temporal e a distância entre sprite e relâmpago. Observamos que o atraso do sprite aumenta com a distância entre relâmpago e sprite. Considerando que o tempo entre sprite e relâmpago está associado a longa duração da corrente contínua, sugerimos que o relâmpago pode estar neutralizando cargas de distâncias cada vez maiores da nuvem durante a fase da corrente contínua. O parâmetro que define a geração de um sprite é a variação do momento de carga (ΔM_q), ou seja, a quantidade de carga removida da nuvem num intervalo de tempo, entretanto a NLDN não fornece essa informação e nem a curva de corrente para que a carga possa ser estimada, fornece apenas o pico da corrente.

Note que o erro na distância dos dias 22 e 24 de Julho são muito maiores do que o dia 18 de agosto, variando entre 18-73 km no dia 22 de Julho, 3-54 km para o dia 24 de Julho de 1996 e de 1-2 km no dia 18 de Agosto. Isso ocorreu pois a paralaxe desses dias era bem pequena, ou seja, a diferença no ângulo de visada das câmeras era

mínima, o que é uma das maiores fontes de erro da distância. Na [Figura 4.1](#) (página 20) podemos observar que as câmeras capturavam os eventos com, basicamente, a mesma linha de visão. Na noite de 18 de Agosto, a diferença no ângulo das câmeras era maior, de forma que a linha de visada das câmeras era bem diferente ([Figura 4.2](#)), e os sprites estavam mais próximos do que nos dias 22 e 24. Outra fonte de erro é o pequeno número de estrelas nas imagens dos dias 22 e 24, que resulta num ajuste ruim entre as estrelas da imagem e o mapa estelar.

As [Figura 6.3](#) mostram a relação encontrada entre os parâmetros intervalo de tempo e pico de corrente.

Obtivemos uma média no pico de corrente de 57 ± 3 kA, comparável com a média obtida por outros estudos: 42 kA ([LYONS et al., 2008](#)), 65 kA ([GREENBERG et al., 2009](#)). Comparando com relâmpagos que não geram sprites, observamos que o pico de corrente dos relâmpagos geradores são, na média, maiores, sendo que relâmpagos positivos possuem média de 39 kA ([SABA et al., 2010](#)). Embora o pico de corrente do relâmpago não seja um bom parâmetro para verificar a capacidade de um relâmpago produzir um sprite, ele está relacionado com a impulsividade do sprite. Através de simulações, [Silva e São Sabbas \(2013\)](#) observaram que quanto maior é o pico de corrente do relâmpago gerador, mais rápido a quebra de rigidez é estabelecida na mesosfera, acelerando as condições para a iniciação do streamer. Ou seja, quanto maior o pico de corrente, menor será o tempo para iniciar o sprite. Nossos resultados estão de acordo com o trabalho de [Silva e São Sabbas \(2013\)](#), é possível verificar o decaimento do tempo de iniciação dos sprites e aumento do pico de corrente nos gráficos da [Figura 6.3](#).

Devemos considerar que os vídeos dos sprites desse trabalho possuíam resolução temporal de 16 ms, o que dificulta a observação da início do sprite. Na grande maioria dos casos, ao passarmos o vídeo quadro a quadro, numa imagem constava o céu sem o sprite e no quadro seguinte constava o sprite totalmente formado. Em raras ocasiões era possível observar seu início. Para isso, é necessário uma câmera com uma resolução temporal maior.

Observa-se que mais de $98 \pm 8\%$ dos relâmpagos possuem pico de corrente superior a 14 kA, o que mostra que a detecção dos relâmpagos pela rede é confiável, uma vez que a rede é capaz de detectar aproximadamente 100% dos relâmpagos que possuem pico de corrente acima desse valor. Para relâmpagos com pico de corrente abaixo de 14 kA, a detecção pela rede cai significativamente ([IDONE et al., 1998](#)). A eficiência da detecção pela rede depende dos seguintes fatores: número de sensores

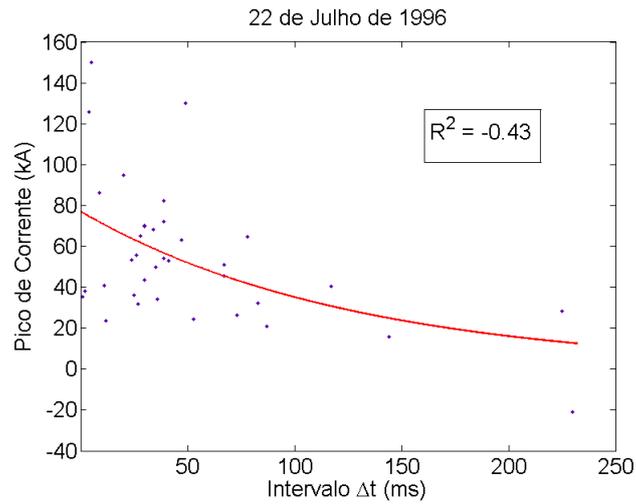
que capturaram o relâmpago, eficiência individual de cada sensor e um outro fator que importante é que o pico de corrente influencia fortemente na detecção (CUMMINS et al., 1998).

A Figura 6.5 mostra os resultados encontrados ao relacionar os tipo de sprite com a distância entre sprite e relâmpago. Nos vídeos de sprite do dia 22/07/1996, os sprites estavam a uma distância de ~ 800 km do sítio de observação, saturavam a imagem e qualidade das imagens estava pior do que os vídeos dos outros dias estudados. Esses aspectos dificultaram a identificação do tipo dos sprites do dia 22. Os eventos que classificamos como Medusa/Coluna e Cenoura/Coluna, são eventos que possuem sprites do tipo Medusa e Coluna ou Cenoura e Coluna ocorrendo simultaneamente.

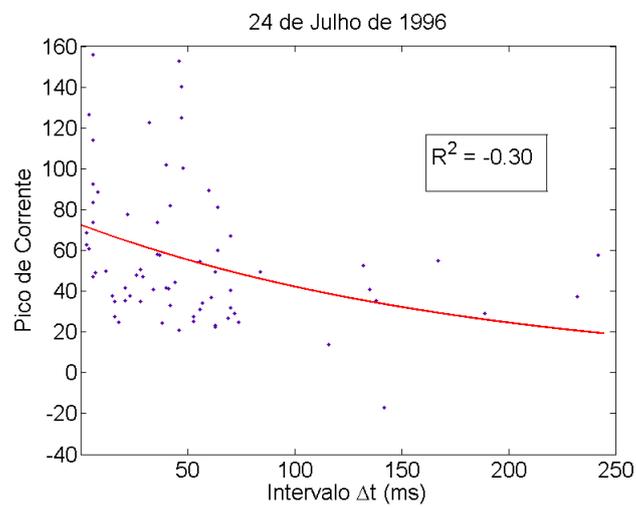
Pela Figura 6.5 podemos observar que os sprites do tipo Medusa não ocorreram a distâncias maiores que 60 km do relâmpago que o causou, enquanto que os sprites do tipo Cenoura ocorreram, em sua maioria, a uma distância até 80 km do relâmpago gerador. Na Figura 6.5(b) o sprite cenoura que ocorreu a uma distância de ~ 150 km do relâmpago pode ter sido causado por um relâmpago negativo de pico de corrente -17 kA (6.3(b)) ou a rede não detectou o relâmpago positivo que o gerou. Podemos observar que a grande maioria dos sprites ocorreu num raio de até 80 km do relâmpago, resultado que está de acordo com outros trabalhos (WESCOTT et al., 2001; SÃO SABBAS et al., 2003; LANG et al., 2010). Os mecanismos físicos que geram as diferentes morfologias dos sprites é um problema em aberto na área.

Também estudamos o tipo de sprite em relação ao seu atraso ao relâmpago. A Figura 6 mostra que sprites cenoura não apenas são os que tiveram maior incidência, mas também são os que possuem atrasos excepcionalmente grandes, até 242 ± 17 ms. Frisamos que tais eventos podem ter sido causados por relâmpagos que não foram detectados pela rede, no entanto, outros pesquisadores também encontraram sprites que ocorreram com tempo superiores a 100 ms Mika et al. (2005) encontraram atraso até 300 ms, Velde et al. (2006) observaram atraso máximo de 200 ms e Gamerota et al. (2011) também observaram tempos superiores a 100 ms.

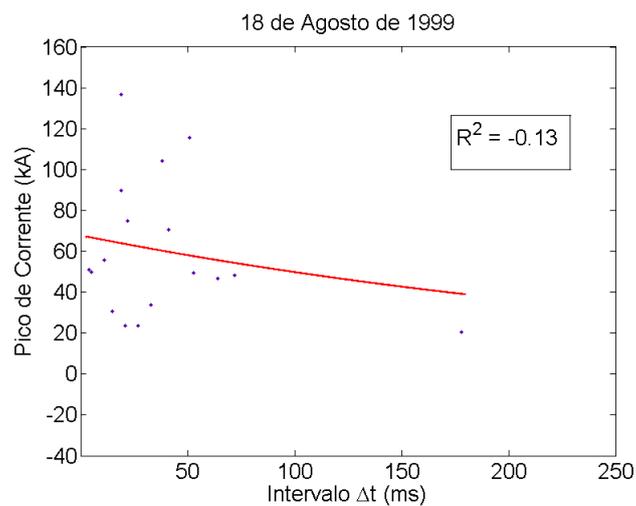
O atraso médio dos 21 casos de sprites do tipo coluna que estudamos é de 40 ± 2 ms enquanto, que os 57 sprites do tipo cenoura analisados, verificamos que eles possuem atraso de 62 ± 5 ms. Nosso resultado para o atraso do sprite coluna está de acordo com os resultados de outros pesquisadores: 30 ms (VELDE et al., 2006), 42 ms (YAIR et al., 2009) 80 ms (MATSUDO et al., 2009). Matsudo et al. (2009) observaram que sprites gerados por tempestades de inverno no oeste do Japão ocorrem com atrasos surpreendentemente longos quando comparados com sprites observados no oceano



(a)



(b)



(c)

Figura 6.3 - Relação entre Intervalo Δt vs Pico de corrente do relâmpago. A incerteza em determinar o intervalo de tempo entre relâmpago e sprite é de 17 ms para todos os eventos.

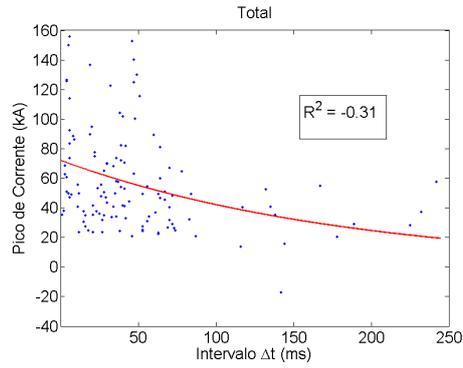


Figura 6.4 - Relação entre Atraso do sprite e o pico de corrente para todos os eventos analisados.

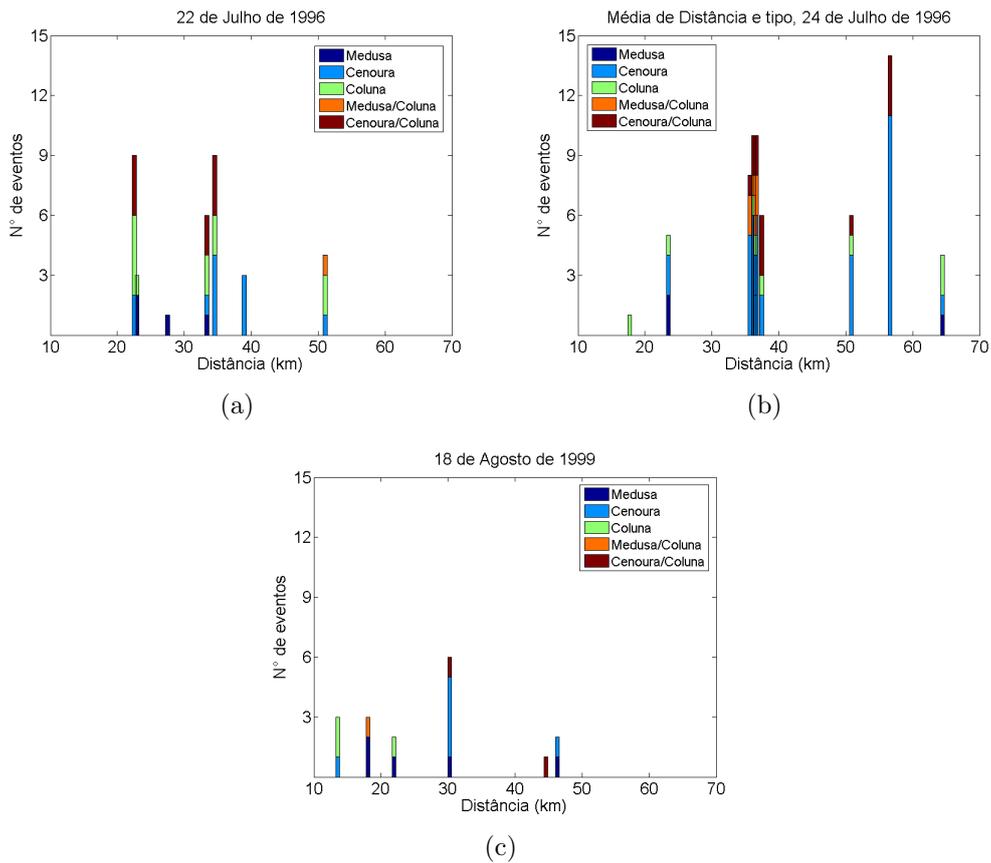


Figura 6.5 - Relação entre o tipo de sprite e a distância entre o sprite e o relâmpago gerador.

Pacífico, 42 ms. Nosso resultado obtido para sprites do tipo cenoura estão em acordo com os obtido por Yair et al. (2009), 68 ms.

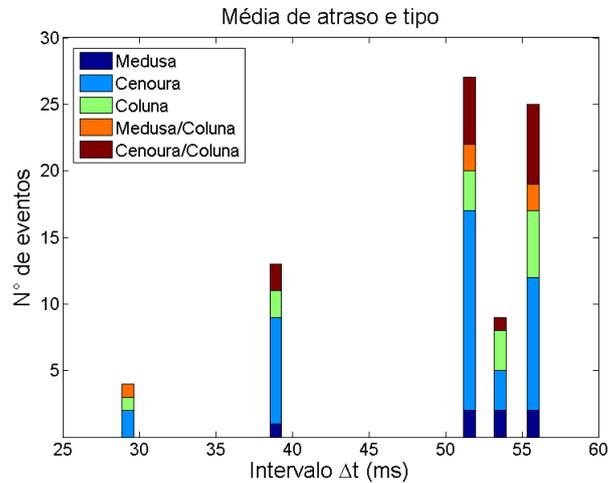


Figura 6.6 - Figura com a relação entre o tipo de sprite e o intervalo de tempo entre o sprite e o relâmpago para todos os sprites estudados.

Os gráficos da Figura 6.7 mostram os resultados encontrados quando estudamos a distribuição dos tipos de sprites com o horário de ocorrência. Isso permite analisar a evolução temporal dos tipos de sprites durante o período que a nuvem é capaz de os produzir. Para essa análise, não é necessário fazer triangulação, assim, foram utilizados os dados da terceira coluna da Tabela 5.2 que contém 79 eventos para o dia 22 de Julho, 129 para o dia 24 e 67 eventos no dia 18 de agosto. O tempo total de observação foi de $\sim 4,5$ horas, $\sim 5,5$ horas e ~ 4 horas para os dias 22 e 24 de julho e 18 de agosto respectivamente.

Analisamos os gráficos ao separar o período ativo de sprites da nuvem em duas partes iguais. Considerando apenas os sprites do tipo cenoura e combinações (Cenoura + Coluna), observamos que: para o dia 18 de agosto, 61% dos eventos ocorrem na primeira metade. Para o dia 24, $59 \pm 9\%$ ocorreram após da metade e no dia 22, $52 \pm 10\%$ foram após da metade. Considerando apenas sprites do tipo coluna, nos dias 24 de Julho e 18 de agosto, observamos que, respectivamente, $70 \pm 17\%$ e $70 \pm 26\%$ ocorreram após a metade do tempo de observação. No entanto, apenas três tempestades não formam um conjunto de dados estatísticos suficientes para tirar conclusões finais sobre essa características dos sprites, de forma que, se outros grupos de pesquisadores do mundo que fizeram campanhas de observação também

fizerem esta simples análise, poderemos ter uma maior noção da relação entre a atividade elétrica da nuvem e os diferentes tipos de sprites que são observados através do globo. A Rede Colaborativa na América Latina para a Investigação de Eventos Luminosos Transientes e Emissões de Alta Energia de Tempestades (LEONA) permitirá uma investigação em toda a América do Sul. Os erros estatísticos foram calculados utilizando $\Delta x = x/N\sqrt{x}$ onde N é o número total de eventos e x é o número de eventos relativos à porcentagem x/N (SÃO SABBAS et al., 2003).

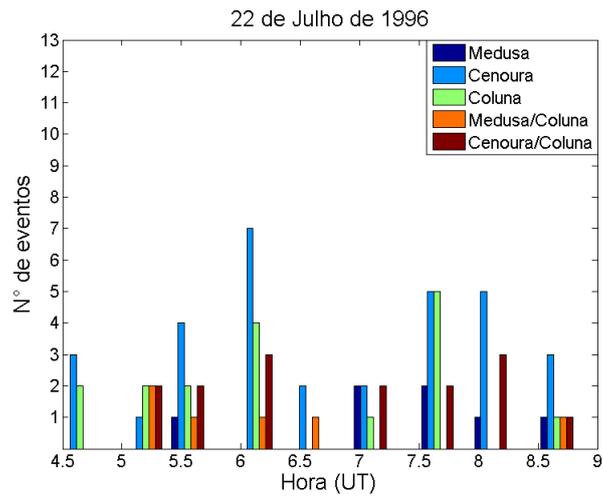
A Tabela 6.1 mostram o resultado dos três dias resumindo as informações acima para sprites coluna.

Tabela 6.1 - Comparação dos sprites coluna em relação a hora.

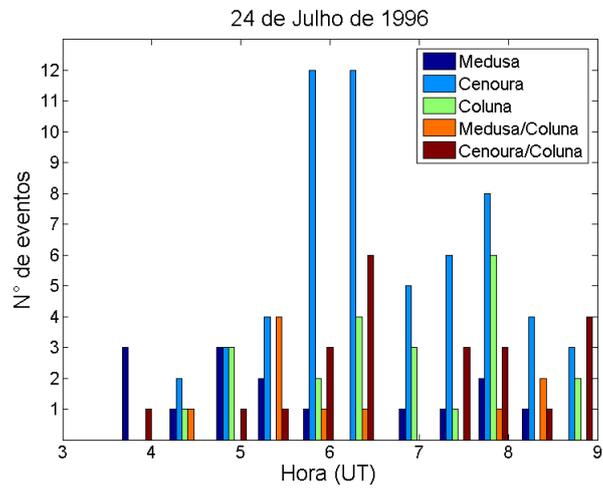
Data	Antes da metade	Depois da metade
22 de Julho	59±15%	41±12%
24 de Julho	30±12%	70±17%
18 de Agosto	30±17%	70±26%

Foi realizada uma extensiva análise, procurando entender a influência das características dos relâmpagos nas características dos sprites que eles geram. Estudamos tipo de sprite em relação a: altitude, distância entre sprite e relâmpago, número de sprites por evento, pico de corrente e duração dos sprites. No entanto, não foi possível encontrar um padrão entre esses parâmetros. A diferença nos tipos sprite pode estar relacionada com a configuração do centro de cargas da nuvem que foi removida pelo relâmpago positivo. A condutividade local também pode ser responsável por criar as diferentes formas dos sprites mas, caso isso seja verdade, o pico de corrente do relâmpago deveria influenciar de alguma maneira uma vez que o pulso Eletromagnético do relâmpago pode alterar as condições elétricas na mesosfera como sugerido por Adachi et al. (2004). Estudos de sprite e relâmpago utilizando Lightning Mapping Array (LMA) e dados de momento de carga dos relâmpagos podem ajudar a resolver esse problema (LANG et al., 2010; LANG et al., 2011).

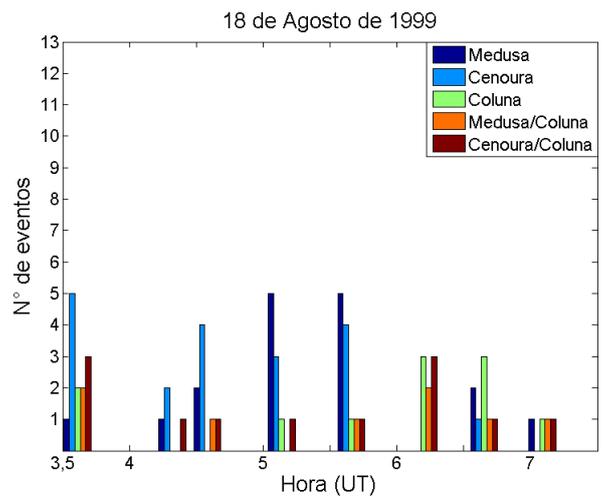
A Figura 6.8 mostra a evolução da altitude da base e do topo dos sprites ao longo do horário de observação. Os pontos vermelhos representam o topo dos sprites enquanto os pontos azuis representam a base de cada sprite triangulado. Observa-se que a altitude do topo dos sprites é aproximadamente constante com o tempo nas três tempestades, enquanto a base dos sprites aumenta de altitude ao longo das ob-



(a)



(b)



(c)

Figura 6.7 - Distribuição dos tipos de sprite ao longo de todo o tempo de observação.

servações. Isso significa que, em geral, a extensão vertical dos sprites diminui com a evolução da nuvem como mostrado na [Figura 6.9](#). Não encontramos esse tipo de análise na literatura, enquanto existem vários estudos que relatam as altitudes encontradas, nenhum faz uma relação com a evolução temporal da tempestade.

Com a triangulação, pudemos calcular a altitude de 146 sprites, de diferentes tipos e observamos que a altitude do topo dos sprites não apresenta uma mudança entre os tipos de sprites. Para os três tipos estudados, cenoura, coluna e medusa, todos tiveram altitudes variando de ~ 70 -105 km. Podemos tirar a mesma conclusão ao analisar os dados da altitude da base dos sprites, sendo que as altitudes variavam entre 33-82 km. Ao estudarmos a altitude dos sprite em relação a hora (UT), observamos que a altitude do topo é aproximadamente constante com o tempo, 88 ± 5 km, enquanto a altitude da base dos sprites aumenta à medida que o tempo passa e a nuvem evolui, ou seja, os sprites diminuem de tamanho com o tempo.

Sugerimos que isso pode ser causado pela diminuição do momento de carga uma vez que o tamanho e intensidade do sprite estão relacionados com momento de carga ΔM_q (CUMMER E LYONS, 2005). A diminuição da variação do momento de carga pode estar relacionada com a carga total da nuvem, que diminui devido falta de combustível para a nuvem continuar numa intensa atividade convectiva gerando cargas. Para checar tal hipótese seria necessário verificar um histórico completo da variação de momento de carga dos relâmpagos durante uma tempestade procurando por sua diminuição com o tempo.

Como não é possível calcular o momento de carga dos relâmpagos utilizando os dados da NLDN, analisamos a influencia das características disponíveis na determinação da altitude dos sprites. Para isso utilizamos três parâmetros: Intervalo de tempo entre sprite e relâmpago, número de sprites e pico de corrente. A [Figura 6.10](#) mostra que a altitude do topo dos sprites é aproximadamente constante em relação ao seu atraso, e que, a altitude da base diminui com o aumento do atraso, sendo que para o dia 18 de agosto a queda é bem mais dramática que nos outros dias. A diminuição da altitude da base do sprite e a constância do topo imediatamente nos diz que o sprite aumenta de extensão vertical com o aumento do atraso em relação ao relâmpago.

Fizemos uma análise relacionando a duração e a extensão vertical dos sprites ([Figura 6.14](#)). Os vídeos utilizados como banco de dados para esse trabalho possuíam resolução de 16,7 ms, portanto, para determinar a duração dos eventos, contamos os quadros em que o sprite era visível e em seguida multiplicamos o número de quadros por 16,7. Em função desse método para determinar a duração dos eventos, eles

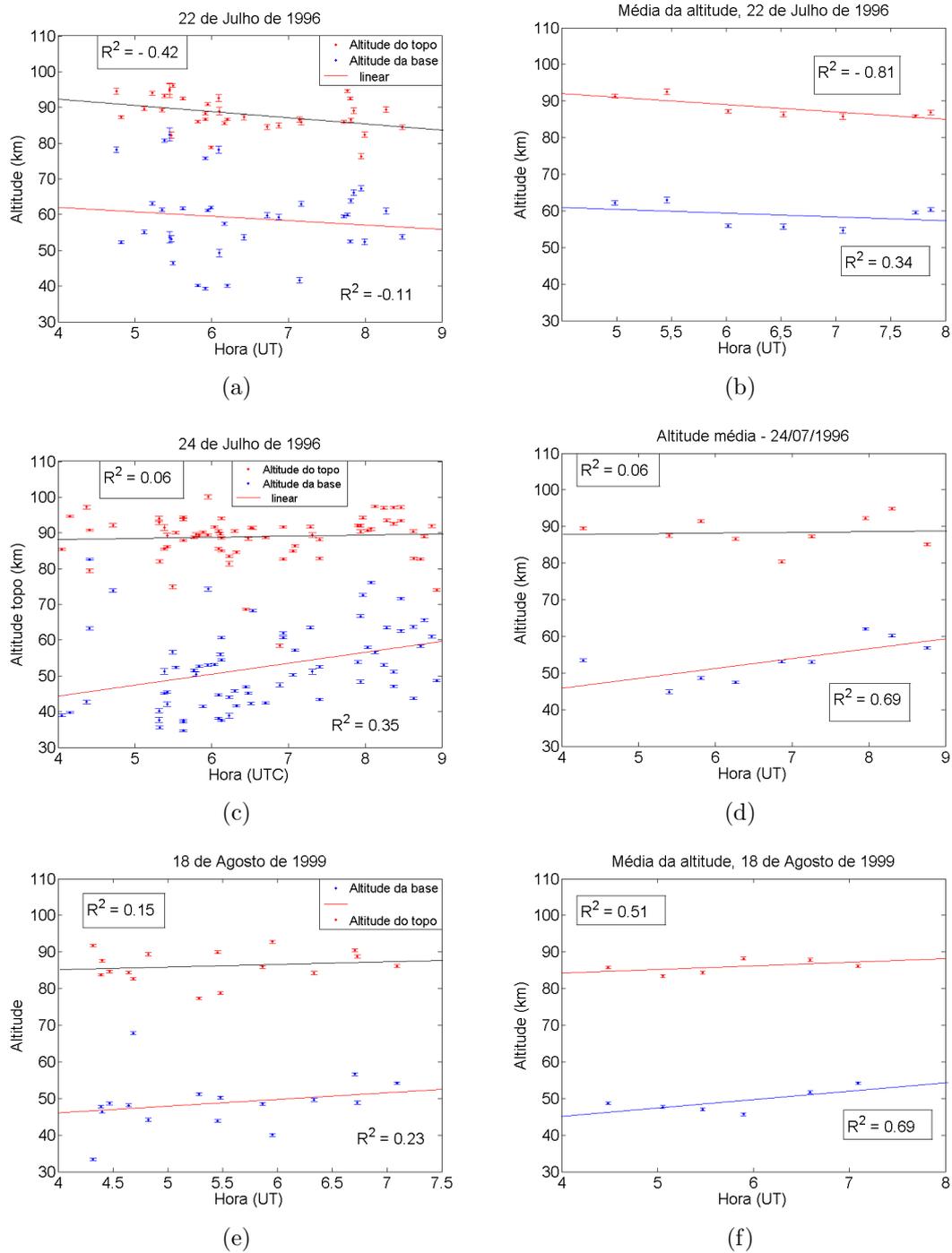


Figura 6.8 - Distribuição das altitudes do topo e da base dos sprites em relação com o horário das observações de ELTs. As figuras da direita são o valor médio das altitudes calculadas de meia em meia hora.

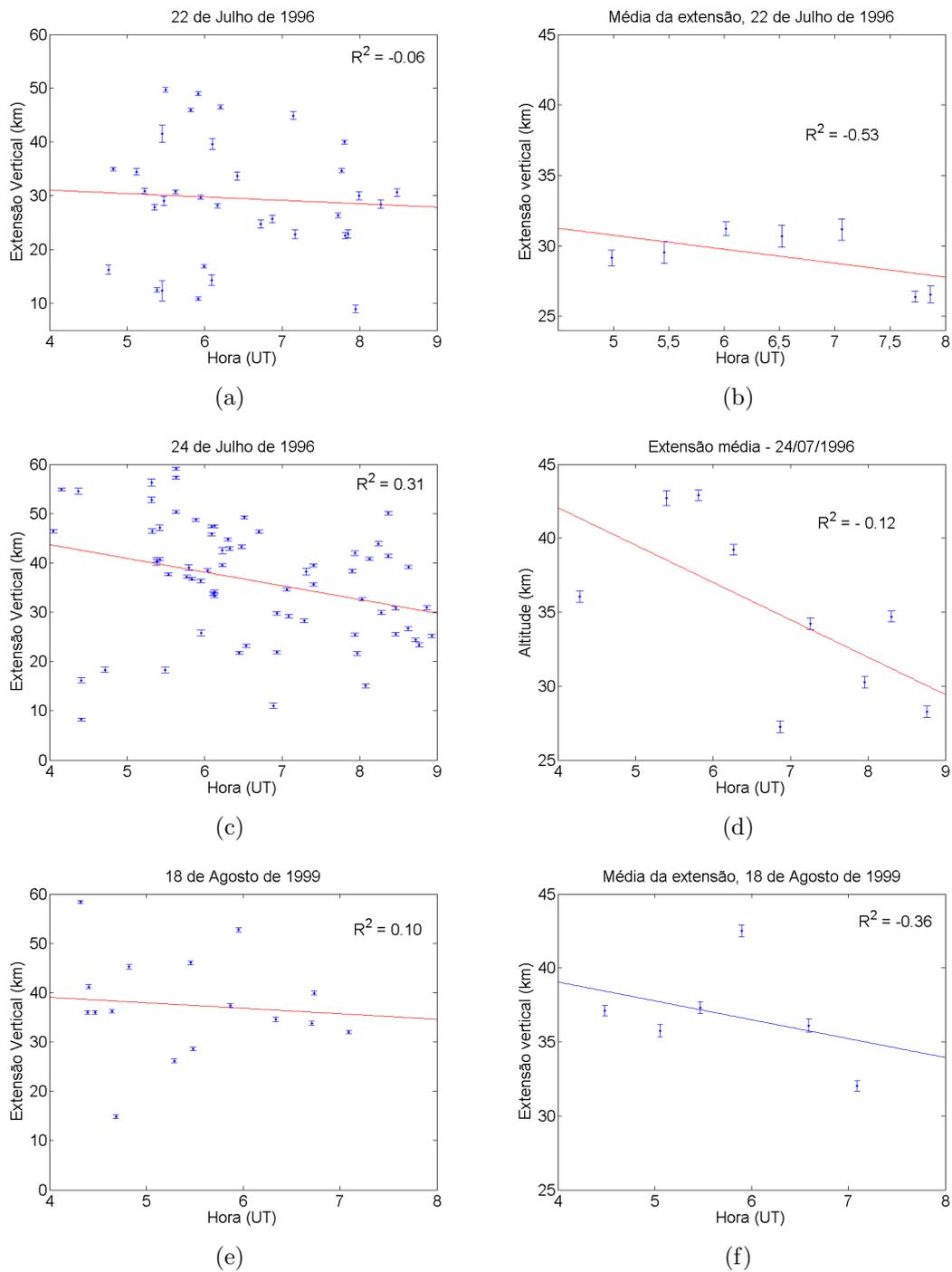


Figura 6.9 - Distribuição da extensão dos sprites em relação ao horário de observação de ELTs. As figuras da direita são o valor médio das altitudes calculadas de meia em meia hora.

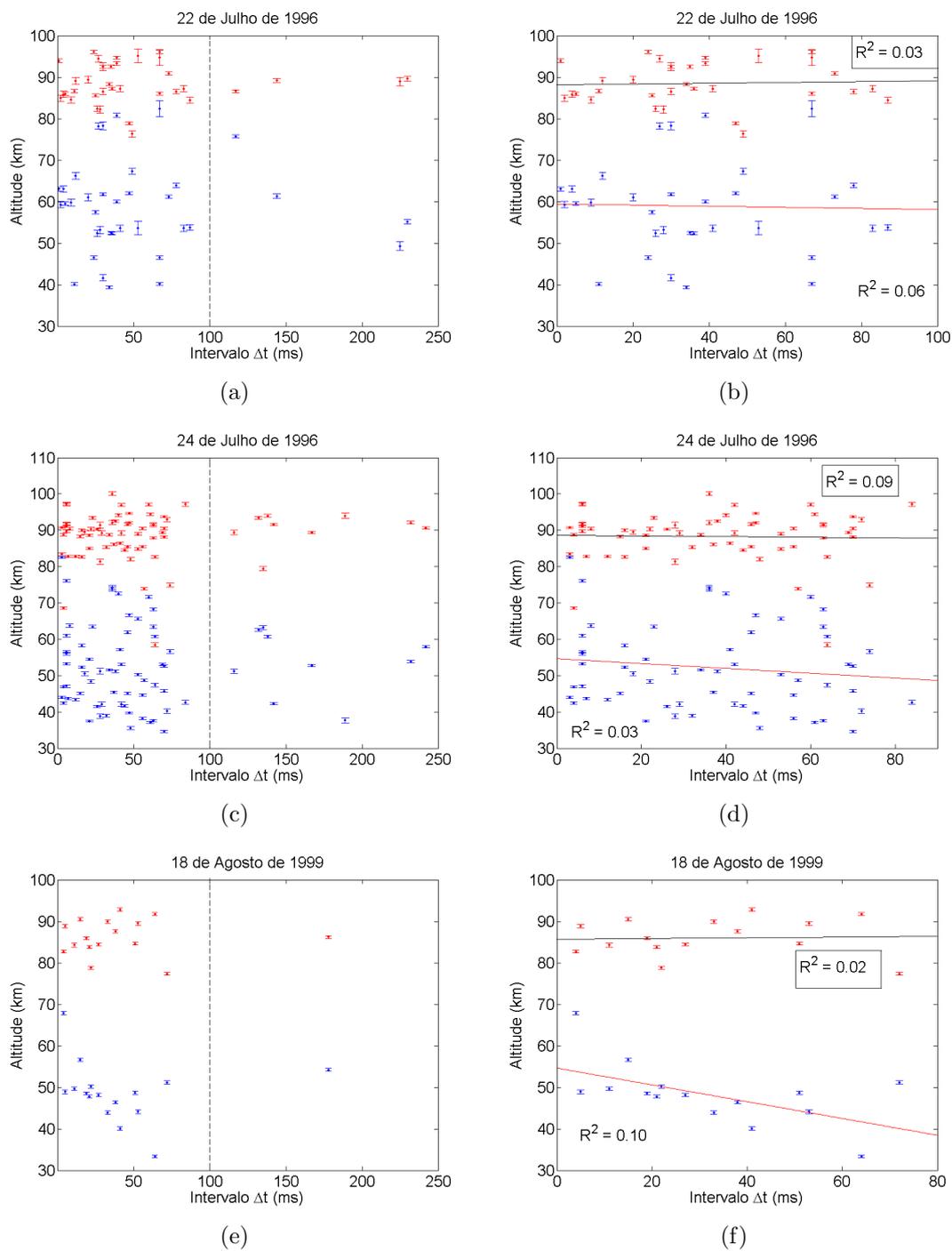


Figura 6.10 - Relação entre a altitude dos sprites e do intervalo de tempo entre sprite e relâmpago. As figuras da direita mostram um ajuste linear dos dados até 100 ms.

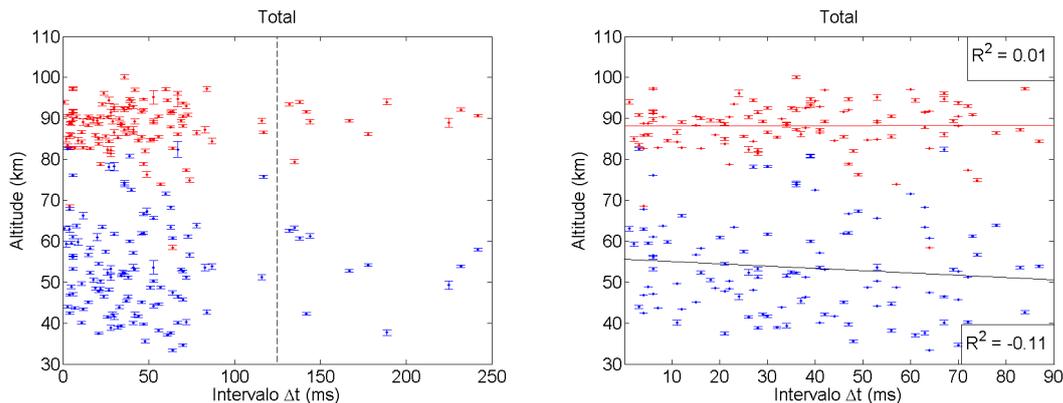
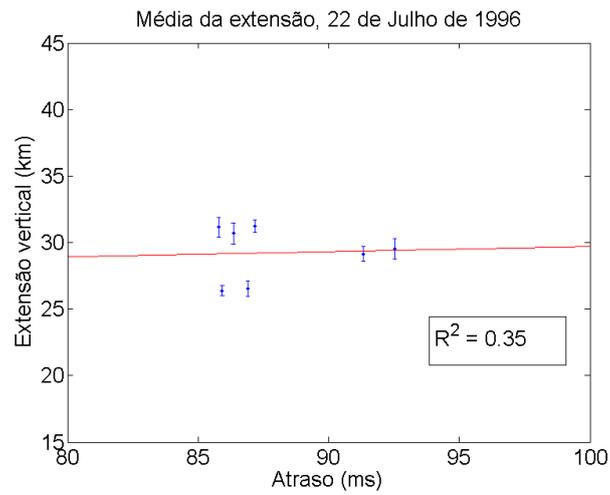


Figura 6.11 - Relação entre o atraso e altitude de todos os sprites analisados.

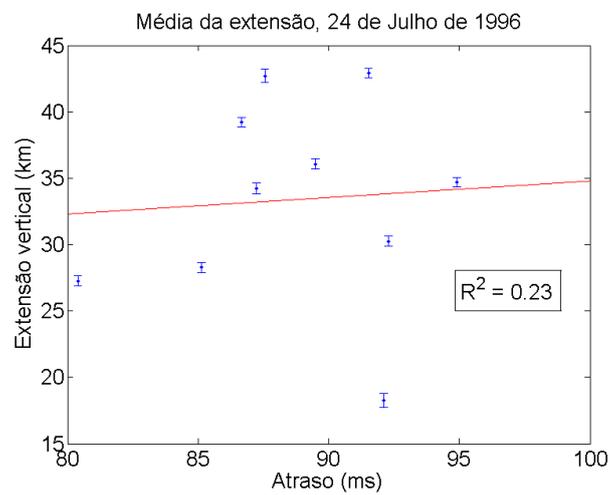
apareceram discretizados como múltiplos de 16.7 nas figuras. Na maioria dos casos, não era possível observar o início do sprite, para isso é necessário uma câmera com resolução maior. Recentemente [Stenbaek-Nielsen et al. \(2010\)](#) capturaram o início de vários sprites utilizando uma câmera com 10.000 quadros por segundo (qps). Nossos resultados variam entre ~ 86 -290 ms com média de 116 ± 9 ms, enquanto documentações recentes sobre a duração dos sprites mostram uma média de 30-40 ms ([MONTANYÀ et al., 2010](#)).

Ao passarmos de um quadro do vídeo para o outro, a maioria dos sprites aparecem totalmente formados, ou seja, entre um quadro e outro (16,7ms) a base e o topo dos sprites já tinham atingido sua altitude terminal. As resoluções temporais das câmeras de alta velocidade utilizadas por [Montanyà et al. \(2010\)](#), ~ 6000 a 15000 qps possibilitaram-lhes determinar com maior precisão o horário de início do sprite. Enquanto que a definição do início dos sprites não apresentou, um grande erro com as câmeras utilizadas neste trabalho, determinação do fim dos eventos gerou a grande diferença entre o nosso resultado e os apresentados por outros pesquisadores.

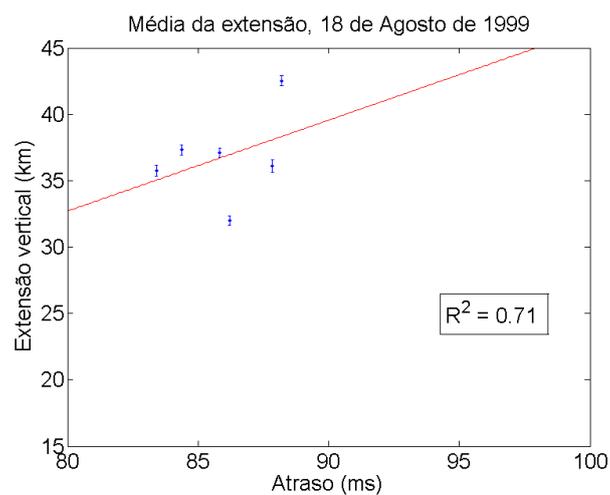
Uma vez que a observação do fim dos eventos é afetada pela persistência da tela de fósforo dos intensificadores. Essa persistência é o tempo de decaimento dos elétrons da tela de fósforo. Quanto maior for o tempo que a tela de fósforo leva para decair, mais tempo a imagem gravada por ela será transmitida para a CCD. O resultado disso, é que o vídeo mostra imagens com um brilho de fundo que pode durar vários quadros ([SANDEL et al., 1986](#); [BARRINGTON-LEIGH et al., 2001](#)). Pudemos observar tal efeito com os vídeos da campanha de 1996 utilizadas nesse trabalho. A câmera da USU utilizada no sítio de Yucca Ridge mostrava eventos que duravam mais de 19 quadros enquanto a câmera da UAF usada em WIRO mostrava o mesmo evento



(a)

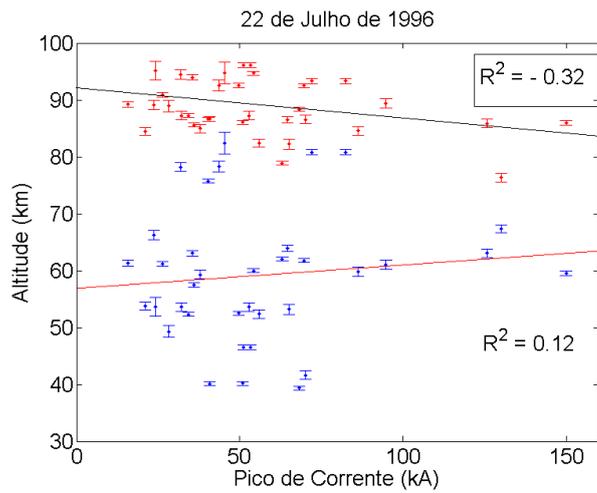


(b)

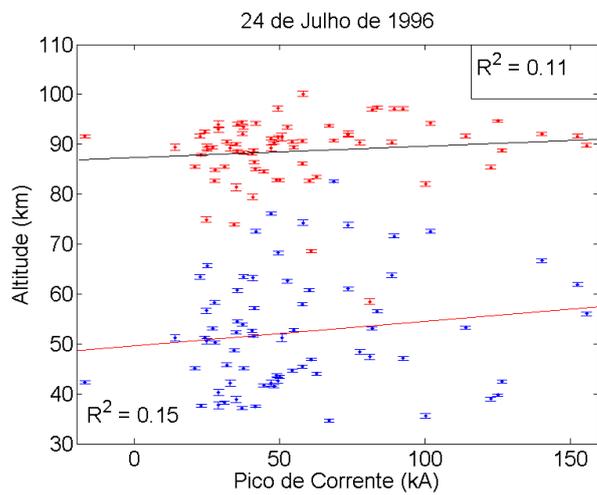


(c)

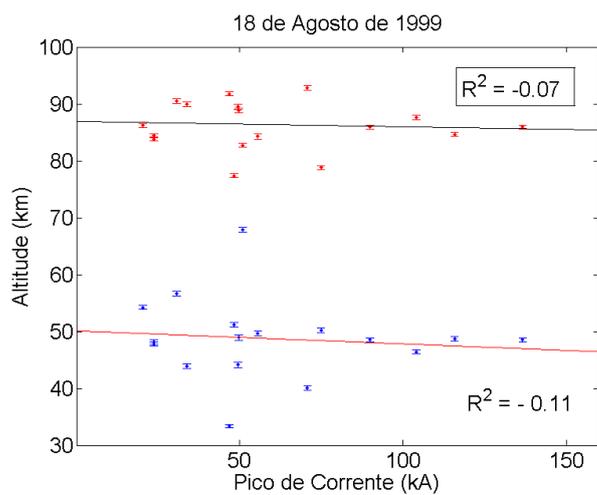
Figura 6.12 - Relação entre o atraso e a extensão vertical dos sprites.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.13 - Relação entre o pico de corrente dos relâmpagos geradores e das altitudes finais do topo e da base dos sprites.

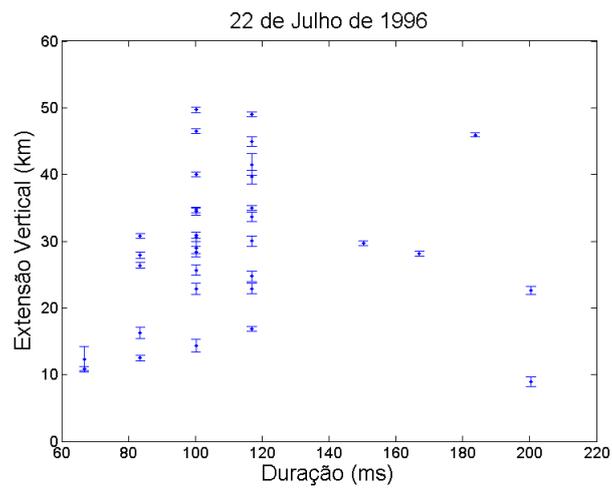
em 7 quadros (Figura 6.15). Esse efeito estava presente em todos os vídeos de 1996 providos por Yucca Ridge, sendo que em raras ocasiões os sprites detectados por ela duravam menos de 15 quadros. Portanto, para definir as durações de cada evento dos dois dias estudados em 1996 foi utilizada apenas a câmera operada em WIRO.

A Figura 6 apresenta uma comparação do pico de corrente dos relâmpagos geradores com o número de sprites por evento para dois tipos de sprite: Cenoura e coluna. Essa análise foi realizada utilizando todas as tabelas de eventos triangulados num só conjunto de dados e separamos os eventos por tipo de sprite, cenoura, coluna e Medusa. Analisamos o número de sprites por evento em relação a vários outros parâmetros, mas não foi encontrada nenhuma relação entre eles. Adachi et al. (2004) estudaram 38 sprites coluna e observaram uma relação entre o pico de corrente e o número de sprites do tipo coluna. Encontraram uma relação linear entre esses dois parâmetros e foi constatado que quanto maior o pico de corrente, mais sprites coluna apareciam num único evento. Eles sugeriram que o pulso eletromagnético emitido pela descarga de retorno ativa uma área maior para a iniciação de sprites coluna uma vez que a área de ocorrência de sprites coluna é proporcional ao número de sprites coluna (ADACHI et al., 2004). Verificamos se havia relação em nossos dados mas não foi possível constatar tal resultado. De todas as três tempestades estudadas, tivemos 21 sprites coluna para a análise, mas pelo menos 7 deles não satisfazem a condição linear crescente entre pico de corrente com número de sprites coluna. Eventos que são combinações de dois tipos de sprites não foram considerados nessa análise.

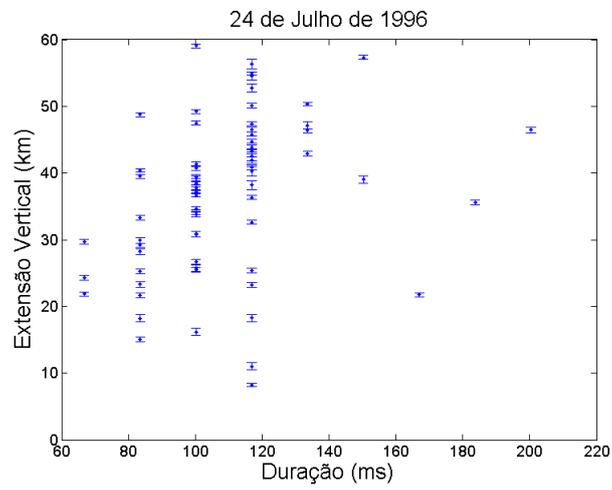
Fizemos o mesmo tipo de análise para sprites do tipo cenoura. Foram estudados 57 sprites, tal que combinações de sprites, e.g. Cenoura + Coluna, não estão presentes. No entanto, não foi possível observar uma influência ou relação do pico de corrente no número de sprites cenoura.

De acordo com os itens listados no início da metodologia, foram feitas comparações de vários outros parâmetros, no entanto, seus gráficos não estão representados neste trabalho por também não terem apresentado nenhum resultado conclusivo. As comparações feitas foram:

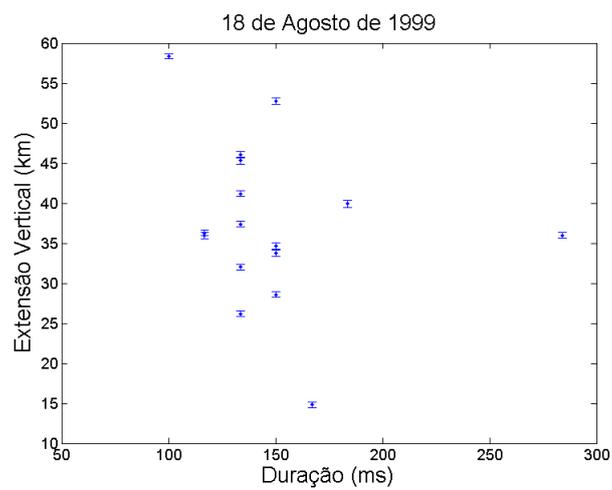
- Intervalo de tempo Δt e Número de sprites por evento
- Duração e Número de sprites por evento
- Número de sprites e pico de corrente
- Número de sprites e altitude do topo



(a)



(b)



(c)

Figura 6.14 - Relação entre a duração e a extensão vertical dos sprites.



(a) WIRO



(b) Yucca Ridge

Figura 6.15 - Exemplo da persistência da tela de fósforo. O evento acima, foi estudado na [Seção 7.2](#), onde tivemos vários sprites atravessando o horizonte, também chamados de “Sprites dançantes”. Enquanto que na câmera em WIRO temos apenas o último grupo de sprites, a câmera em Yucca Ridge ainda mostra quase todos os sprites que o precederam.

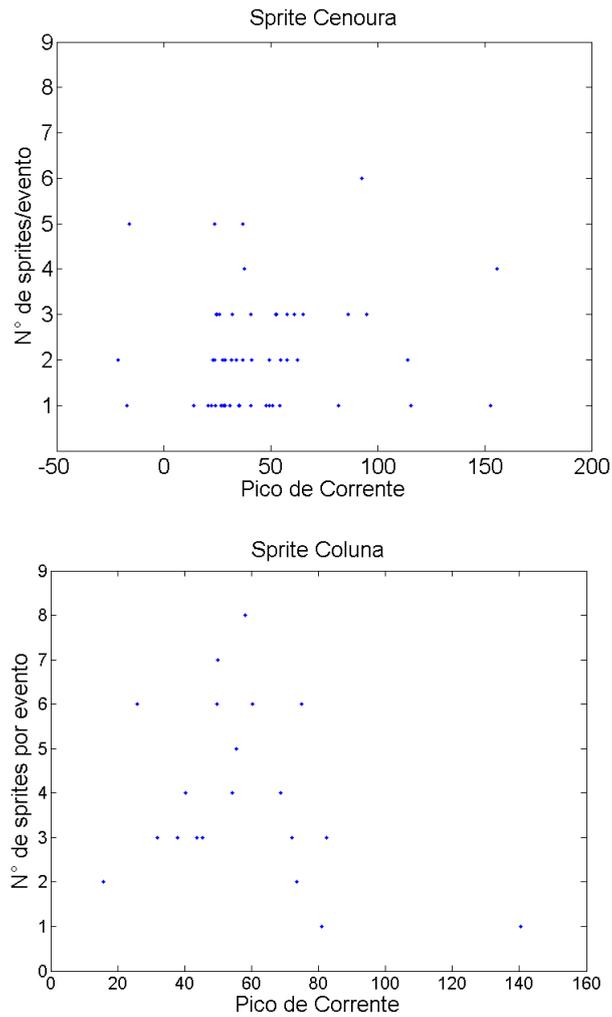


Figura 6.16 - Relação entre o número de sprites por evento e o pico de corrente do relâmpago gerador para sprites dos tipos cenoura e coluna.

- Hora e distância
- Hora e intervalo de tempo Δt
- Hora e número de sprites
- Tipo e duração
- Tipo e número de sprites
- Tipo e pico de corrente
- Tipo e Δt

7 ANÁLISE DE EVENTOS SEPARADOS

Neste capítulo foram separados três eventos para uma análise mais aprofundada da evolução temporal de um sprite assim como das características do seu relâmpago gerador. Cada um desses sprites são eventos especiais, e.g. sprites que ocorreram com um atraso especialmente grandes ou que não tiveram relâmpago positivo detectado pela rede.

7.1 18 de Agosto de 1999, 4:19:27h

Nesse evento, houve a formação simultânea de 4 sprites e um halo como mostrado na Figura 7.1. Alguns quadros para frente, teve a ocorrência de outro sprite à esquerda do grupo inicial. Lembrando que as observações foram realizadas em WIRO e Bear Mountain.



Figura 7.1 - Ocorrência de um grupo de 4 sprites cenoura precedidos de um halo.

Lembramos que a câmera que foi utilizada na captura possuía resolução temporal de 16,7 ms, o que torna a captura do início do sprite incerta. Mesmo assim, nesse evento foi possível observar o halo com o sprite se formando pela câmera em Bear Mountains(Figura 7.2). Calculamos que o centro do halo se encontra a uma altitude de 77 ± 1 km. Ao avançarmos um quadro, i.e. 16,7 ms, o sprite e o halo já se encontravam totalmente formados com brilho suficiente para saturar a imagem.

Avançando mais um quadro, foi possível observar a expansão do halo a partir do centro como um disco, com luminosidade também aumentando do centro. O halo teve uma duração de $83,5 \pm 16,7$ ms. A duração dos sprites foi de $150,3 \pm 16,7$ ms e os



Figura 7.2 - Na imagem da esquerda observa-se a fase inicial dos sprites capturada em Bear Mountain. Na direita, o quadro seguinte, mostrando o desenvolvimento total do evento.

quatro sprites começaram e terminaram ao mesmo tempo. Logo após o término do halo, houve o início de um outro sprite logo à esquerda como mostrado na Figura 7.3.



Figura 7.3 - Quinto sprite do evento, gerado após o desaparecimento do halo.

Esse último sprite possui tempo de vida de $116,9 \pm 16,7$ ms e seu término coincide com o término dos 4 sprites iniciais. Todos os sprites possuem aproximadamente a mesma altitude da base e do topo, ~ 50 e 78 km.

O halo e os sprites tiveram início no horário 4:19:27.916h. No horário 4:19:27h foi detectado apenas relâmpagos negativos, sendo o que relâmpago positivo mais próximo ocorreu em 4:19:26.498 h, 1.418 ms antes do sprite. Foi encontrado um relâmpago

negativo em 4:19:27.850h que ocorreu há 67 ms antes dos sprites e 76 km de distância do local de onde o relâmpago tocou o solo e seu pico de corrente foi -16.04 kA. Nesse caso, o ponto de referência para fazer a triangulação foi o centro do halo.

Abaixo está a evolução temporal dos sprites desde o momento que o relâmpago tocou o solo até o fim da gravação do vídeo.

27.850	→	27.917	→	27.983	→	28.000	→	28.050
	67 ms		66 ms		17 ms		50 ms	
Relâmpago		Início Halo		Fim Halo		5° sprite		Fim

7.2 24 de Julho de 1996, 5:38:00h

Às 5:38:00 UT, ocorreram vários sprites se movendo ao longo do horizonte, um sprite dançante, possibilitando-nos estudar um evento bem complexo. Nesse dia, as observações foram realizadas em WIRO e em Yucca Ridge Field Station, sendo que a câmera de WIRO não capturou o primeiro sprite, apenas uma parte dele. Todos os sprites que se seguiram estavam no campo de visada da câmera.

O primeiro sprite ocorreu em 5:38:00,650h e um outro em 5:38:00,700h, ambos do tipo cenoura (Figura 7.4(a)). Selecionamos como gerador o relâmpago positivo que ocorreu 63 ± 17 ms antes do sprite a uma distância de $59,08 \pm 11$ km e pico de corrente de 23,05 kA. Não foi possível determinar a duração do primeiro sprite, pois ele foi detectado plenamente apenas pela câmera de Yucca Ridge. O segundo sprite teve duração de 100 ms. Como o segundo sprite teve um “atraso” e não teve nenhum relâmpago próximo, sugerimos que ele tenha ocorrido devido à corrente contínua do mesmo relâmpago que ocorreu a 114 ms antes do sprite.

Em seguida, no horário 5:38:00,833h tivemos mais dois sprites com duração de 100 ms (Figura 7.4(b)). Para esses sprites, não foi possível selecionar um relâmpago positivo, as detecções mais próximas foram de relâmpago negativos, um com pico de corrente de 32,37 kA a uma distância de 137 km e 134 ms antes do sprite e outro com pico de corrente de 34,76 kA a 94 km distância e 30 ms **após** o sprite.

No horário 5:38:00,933h ocorreu mais um sprite cenoura (Figura 7.4(c)). Novamente, a rede não detectou nenhum relâmpago positivo próximo. Os dois relâmpagos negativos detectados ocorreram a uma distância de 204 ± 13 e 107 ± 11 km a num intervalo de 11 ± 16 e 53 ± 16 ms respectivamente. O sprite durou 116 ± 16 ms.

Às 5:38:01,066h ocorreram dois sprites do tipo cenoura (Figura 7.4(d)). Dentre todos os sprites dessa série, esse foi o único que teve captura do início do evento. O relâmpago gerador ocorreu 61 ms antes do sprite a uma distância de $30,68 \pm 7$ km com um pico de corrente de 37,74 kA. Os sprites tiveram duração de 133 ± 16 ms. Após 83 ms quatro sprites ocorreram simultaneamente e 50 ms após isso, ocorreu mais um sprite (Figuras 7.4(e) e 7.4(f)). Todos foram do tipo cenoura. Notamos também que os sprites que apareceram ao mesmo tempo tiveram o mesmo tempo de vida, ou seja, eles desapareceram ao mesmo tempo.

Finalmente, no horário 5:38:01,266h ocorreram vários sprites do tipo cenoura e coluna (Figura 7.4(g)). que tiveram duração de 133 ± 16 ms. Selecionamos o relâmpago gerador que ocorreu 70 ± 16 ms antes do início dos sprites. Ele possuía pico de corrente de 67,01 kA e ocorreu a uma distância de $7,36 \pm 7$ km. O evento foi muito extenso e não foi possível capturar seu início, portanto, o ponto de referência para o cálculo da posição foi o meio do grupo de sprites.

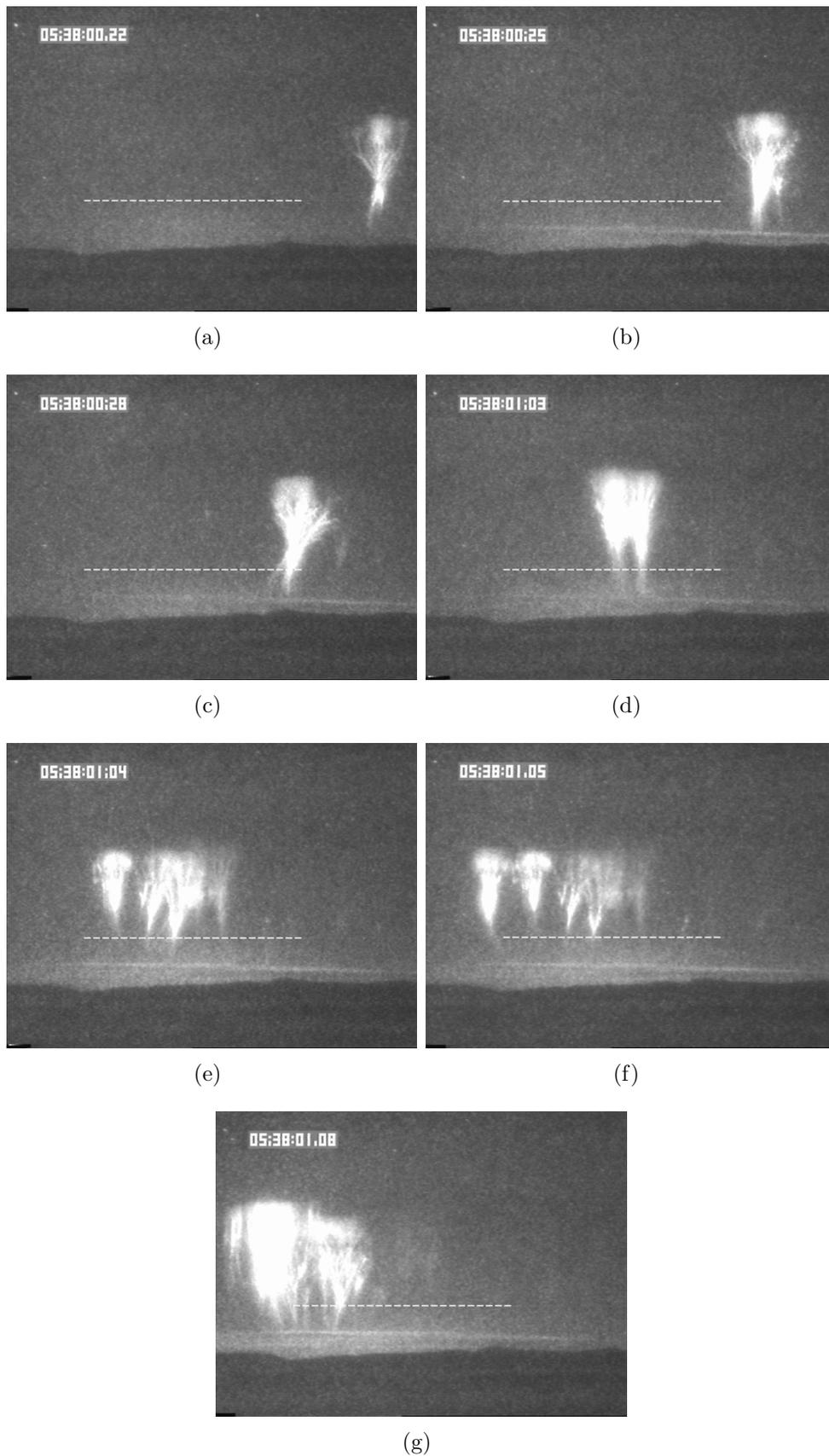


Figura 7.4 - Sequência dos sprites capturados. Do início do primeiro sprite até o início do último sprite se passaram 749 ms.

7.3 24 de Julho de 1996, 8:14:47h

As 8:14:47h ocorreu um outro evento complexo, embora nem tanto quanto o que acabamos de ver. Esse evento foi composto um halo, seguido de dois sprites cenoura (em tempo diferentes) e, posteriormente, um grupo de sprites cenoura.

O halo ocorreu às 8:14:47,067h e durou 33 ms (Figura 7.5(b)). No horário 8:14:47,100h tivemos um sprite cenoura que durou 133 ms (Figura 7.5(c)). O relâmpago gerador de ambos o sprite e o halo possuiu pico de corrente e 81,81 kA. Ele ocorreu 9 ± 17 ms antes do halo e 42 ± 17 ms antes do sprite. No entanto, quando o sprite desapareceu, ocorreu outro sprite cenoura no horário 8:14:47:266h que durou 100 ms (Figura 7.5(d)). Para esse sprite, a rede não detectou nenhum relâmpago positivo ou negativo num intervalo de 200 ms, o que nos leva a crer que esse sprite foi gerado pelo mesmo relâmpago que gerou o halo e o primeiro sprite. Caso isso seja verdade, esse último sprite foi gerado 209 ms após a detecção do relâmpago. Em função disso, sugerimos que o relâmpago possa ter tido uma corrente contínua longa.

Um quadro após o término do segundo sprite, i.e. 33 ms depois, ocorreu um grupo com 7 sprites do tipo cenoura, no horário de 8:14:47,367h (Figura 7.5(e)). Esse grupo teve uma duração de 117 ms, e novamente, o início e fim foi simultâneo. A rede de detecção não capturou nenhum relâmpago num intervalo de tempo de 300 ms antes do sprite, no entanto, 5 ms **após** o sprite, foi detectado um relâmpago positivo com pico de corrente de 84,18 kA a uma distância de 50.77 km. Como o erro do horário de ocorrência dos sprites é de 17 ms, esse relâmpago provavelmente é o gerador desse evento.

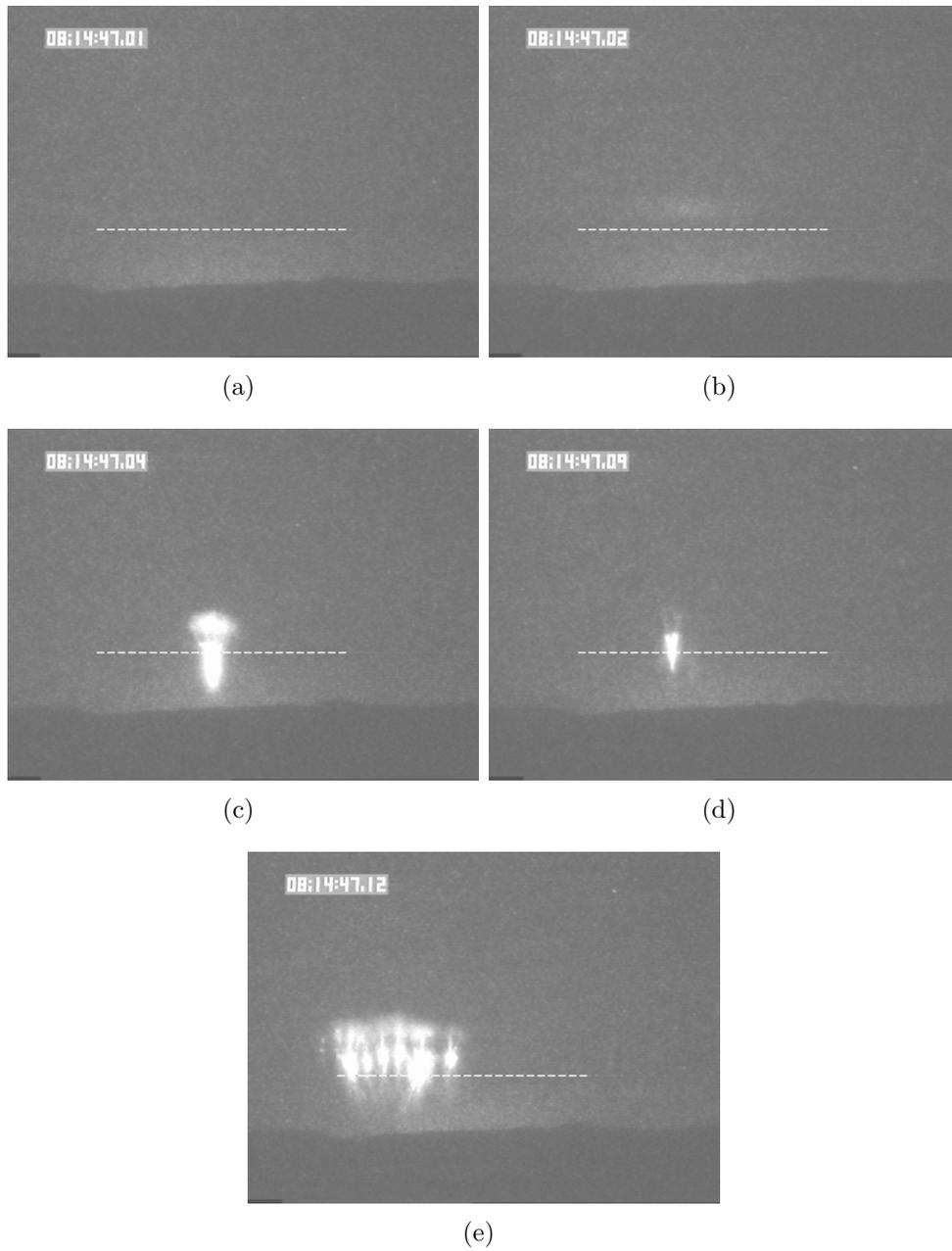


Figura 7.5 - Sequência dos sprites capturados. Do início do primeiro sprite até o início do último sprite passaram-se 300 ms.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudados Eventos Luminosos Transientes através triangulação de sprites. Foram analisados um total de 274 sprites dos quais 145 foram triangulados. Com as triangulações obtivemos informações sobre latitude, longitude e altitude dos sprites. Com dados de relâmpagos providos pela NLDN fomos capazes de relacionar os relâmpagos geradores com os sprites triangulados e obtivemos 121 sprites com relâmpagos geradores selecionados. Assim é possível estudar características da atividade elétrica da nuvem durante as observações.

Os dados foram coletados com câmeras de vídeo operadas por pesquisadores da Universidade do Alaska e Universidade do Estado de Utah. Os sprites capturados ocorreram acima de três tempestades diferentes ocorridas nos Estados Unidos nos dias 22 e 24 de Julho de 1996 e 18 de Agosto de 1999 e foram filmados de três diferentes sítios de observação: Radio-Observatório Infravermelho de Wyoming (WiRO) e Yucca Ridge Field Station para o ano de 1996 e em WiRO e Bear Mountain no estado de Dakota do Sul em 1999.

Para estudar os sprites, identificamos os relâmpagos geradores como sendo os relâmpagos que ocorreram com $\Delta t \leq 300$ ms e $\Delta S \leq 200$ km dos sprites. Posteriormente, comparamos as propriedades dos sprites e relâmpagos geradores como intervalo Δt , distância entre relâmpago e sprite. Observamos que o atraso do sprites aumenta com a distância entre o relâmpago e o sprite. Esse é um resultado inédito na literatura. Com isso, sugerimos que o relâmpago pode estar neutralizando cargas cada vez mais longe durante a fase contínua. Para esses parâmetros, encontramos que $95 \pm 9\%$ dos sprites analisados ocorreram com distância de até 100 km do relâmpago que os causou com média de 37 ± 1 km e distância máxima de 150 ± 11 km. Obtivemos valores do intervalo de tempo menor do que 100 ms entre o relâmpago e o sprite com média de 50 ± 11 ms e atraso máximo de 242 ± 17 ms. Encontramos relâmpagos geradores com média de pico de corrente de 50 ± 3 kA. Comparando com relâmpagos que não geram sprites, observamos que o pico de corrente dos relâmpagos geradores são, na média, maiores, sendo que relâmpagos positivos possuem média de 39 kA (SABA *et al.*, 2010). Aproximadamente 80% dos sprites analisados foram gerados por relâmpagos positivos, 1% podem ter sido gerados por relâmpagos negativos e para 19% não foi possível definir o relâmpago que os gerou. Sobre os relâmpagos geradores, notamos que em torno de $98 \pm 8\%$ deles possuem pico de corrente maior do que 14 kA que mostra que os relâmpagos selecionados como geradores tiveram detecção confiáveis uma vez que para valores acima de 14 kA a eficiência da rede é quase

100%.

Também foi feita uma análise sobre os diferentes tipos de sprites observados e sua relação com vários parâmetros dos relâmpagos. Observou-se que, sprites do tipo cenoura estão mais presentes nas observações seguidos dos sprites tipo coluna e medusa. Sprites cenoura são os que podem ocorrer a maiores distâncias do relâmpago gerador, até $\sim 150 \pm 11$ km, seguidos pelos sprites coluna. Observamos ainda que os sprites do tipo cenoura são os que possuem maior extensão vertical, seguidos de perto dos sprites medusa. Os sprites cenoura são também os que possuem uma variedade de tamanho maior do que os outros, podendo variar entre 15 e 59 ± 2 km, enquanto sprites medusa variam de 22 a 58 ± 2 km. Sprites do tipo coluna são os menores com extensões variando entre 8 e 40 ± 5 km. Analisamos também o atraso dos tipos de sprite em relação ao relâmpago gerador. Obtivemos que sprites cenoura são os que podem ter maior intervalo de tempo, 242 ms. Na média, também encontramos que sprites do tipo cenoura possuem maior tempo, 62 ms enquanto sprites do tipo coluna possuem tempo médio de 40 ms. Esses resultados estão de acordo com [Velde et al. \(2006\)](#), [Yair et al. \(2009\)](#), [Matsudo et al. \(2009\)](#). Embora tenhamos feito várias análises, não foi possível observar uma relação que nos indicasse uma dependência entre os diferentes tipos de sprite.

Ao relacionar os sprites com o horário de observação de cada noite obtivemos uma distribuição de ELTs. Isso nos permitiu analisar e comparar algumas características dos sprites ao longo do período de observação, uma vez que as observações ocorrem num extenso período de tempo (~ 5 horas). Observamos que o tamanho dos sprites diminuiu ao longo do tempo nas três tempestades analisadas, sendo que a altitude do topo permanece aproximadamente constante durante toda a tempestade, 88 ± 5 km, enquanto a base do sprite ganha altitude com o tempo. Isso pode estar relacionado com o momento de carga dos relâmpagos, indicando que ele diminui ao longo da vida da tempestade. Essa é uma análise inédita nessa área científica, gerando resultados também inéditos e interessantes. Sugerimos que isso pode ocorrer pois, uma vez que o “combustível” convectivo para eletrificação da nuvem é totalmente consumido, a carga líquida da nuvem diminui ao longo do tempo devido à incidência de descargas intra nuvem e nuvem-solo negativas e positivas. A diminuição do tamanho dos sprites também pode estar ligada à condutividade elétrica da atmosfera na região da estratosfera e baixa mesosfera, uma vez que apenas a altitude da base do sprite é alterada com o tempo.

Para duas das três tempestades analisadas, observou-se que a maioria dos sprites do

tipo coluna ocorreram, em sua maioria, do meio para o fim do tempo das observações por um porcentagem de $70\pm 17\%$.

Calculamos as altitudes da base e do topo de 146 sprites separados em três diferentes tempestades. Obtivemos uma altitude de 88 ± 5 km para o topo sendo que eles variavam entre aproximadamente 64 e 100 ± 5 km. Enquanto para a base dos sprites, as altitudes tiveram valores entre 33 e 82 ± 5 km com média de 52 ± 5 km. Ao analisar a altitude da base e do topo com o atraso entre o sprite e relâmpago, observamos a extensão vertical dos sprites aumenta com o atraso. A altitude do topo dos sprites permanece aproximadamente constante, enquanto a altitude da base dos sprites diminui com o atraso. Esse é um resultado que ainda não foi publicado por nenhum grupo de pesquisa da área, fazendo nosso resultado inédito na literatura.

Analisamos também o pico de corrente em relação à altitude final dos sprites. A princípio, em função do mecanismo físico de geração de sprites, quanto maior o pico de corrente, em maiores altitudes será promovida a quebra de rigidez dielétrica do ar que pode dar origem ao sprites. Entretanto, analisando os três dias separadamente, é difícil achar um padrão na altitude do topo pois para cada dia a relação muda. Para a altitude da base, observamos que ela aumentou em relação ao pico de corrente para dois dias, 22 e 24 de Julho, enquanto que para o dia 18 de Agosto ocorreu uma diminuição da altitude. Realizando uma análise da extensão vertical como um todo, observamos que os sprites diminuíram de tamanho com o aumento do pico de corrente no dia 22 de Julho. No dia 24 eles também diminuíram, porém numa taxa bem menor do que a observada no dia 22. No dia 18 de Agosto observamos que eles aumentaram de tamanho com o aumento do pico de corrente.

Fizemos uma análise do pico de corrente e o número de sprites do tipo cenoura e coluna com o intuito de verificar um resultado encontrado por (ADACHI et al., 2004). Eles encontraram uma relação linear crescente entre o pico de corrente e o número de sprites coluna. Em nossos resultados não é possível fazer tal afirmação.

Sugestões para trabalhos futuros incluem estudar ELTs na América do Sul utilizando a técnica de triangulação com o projeto LEONA, que tenciona observar ELTs de vários sítios de observação espalhados por vários países desse continente. Um outro trabalho com o potencial de relevantes contribuições científicas é a análise das características morfológicas dos sprites em relação a duração das observações e as possíveis diferenças morfológicas dos ELTs devido à presença da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADACHI, T.; FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; SATO, M. Roles of the emp and qe field in the generation of columniform sprites. **Geophysical research letters**, American Geophysical Union, v. 31, n. 4, p. L04107, 2004. 47, 56, 71
- ALLIN, T.; NEUBERT, T.; LAURSEN, S. Imaging systems in tle research. In: FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. (Ed.). **Sprites, ELVEs and intense lightning discharges**. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2006, (NATO Science Series, v. 225). p. 101–121. ISBN 978-1-4020-4629-2. 26, 27
- ARMSTRONG, R.; SHORTER, J.; TAYLOR, M.; SUSZCZYNSKY, D.; LYONS, W.; JEONG, L. Photometric measurements in the sprites 95 & 96 campaigns of nitrogen second positive (399.8 nm) and first negative (427.8 nm) emissions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 7?9, p. 787–799, maio 1998. ISSN 1364-6826. 11
- ASANO, T.; SUZUKI, T.; HAYAKAWA, M.; CHO, M. Three-dimensional em computer simulation on sprite initiation above a horizontal lightning discharge. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 71, n. 8, p. 983–990, 2009. 40, 41
- BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 6, p. PP. 683–686, 1999. 15
- BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S.; STANLEY, M. Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. A2, p. PP. 1741–1750, fev. 2001. 12, 13, 53
- BOCCIPPIO, D. J.; WILLIAMS, E. R.; HECKMAN, S. J.; LYONS, W. A.; BAKER, I. T.; BOLDI, R. Sprites, elf transients, and positive ground strokes. **Science**, v. 269, n. 5227, p. 1088–1091, ago. 1995. ISSN 0036-8075, 1095-9203. 10
- BRIELS, T. M. P.; KOS, J.; WINANDS, G. J. J.; VELDHUIZEN, E. M. van; EBERT, U. Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 23, p. 234004, dez. 2008. ISSN 0022-3727, 1361-6463. 8

CHEN, A. B.; KUO, C.; LEE, Y.; SU, H.; HSU, R.; CHERN, J.; FREY, H. U.; MENDE, S. B.; TAKAHASHI, Y.; FUKUNISHI, H.; CHANG, Y.; LIU, T.; LEE, L. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 8 PP., ago. 2008. [13](#), [15](#)

COORAY, V. Mechanism of electrical discharges. In: **The Lightning Flash**. Bellingham, USA: Institution of Electrical Engineers, 2003. v. 34, p. 45–124. [8](#)

CUMMER, S. A.; FÜLLEKRUG, M. Unusually intense continuing current in lightning produces delayed mesospheric breakdown. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 28, n. 3, p. 495–498, 2001. [39](#)

CUMMER, S. A.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; Barrington-Leigh, C. P. Elf radiation produced by electrical currents in sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 8, p. PP. 1281–1284, 1998. [11](#)

CUMMER, S. A.; LYONS, W. A. Lightning charge moment changes in u.s. high plains thunderstorms. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. 4 PP., mar. 2004. [10](#)

_____. Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, Wiley Online Library, v. 110, n. A4, 2005. [39](#), [49](#)

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, A. E. A combined toa/mdf technology upgrade of the us national lightning detection network. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 103, n. D8, p. 9035–9044, 1998. [43](#)

FRANZ, R. C.; NEMZEK, R. J.; WINCKLER, J. R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. **Science**, v. 249, n. 4964, p. 48–51, jul. 1990. ISSN 0036-8075, 1095-9203. [1](#), [23](#)

FREY, H. U.; MENDE, S. B.; CUMMER, S. A.; LI, J.; ADACHI, T.; FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; CHEN, A. B.; HSU, R.; SU, H.; CHANG, Y. Halos generated by negative cloud-to-ground lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 5 PP., set. 2007. [13](#)

FÜLLEKRUG, M.; MOUDRY, D. R.; DAWES, G.; SENTMAN, D. D. Mesospheric sprite current triangulation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 106, n. D17, p. 20189–20194, 2001. [39](#)

GAMEROTA, W.; CUMMER, S.; LI, J.; STENBAEK-NIELSEN, H.; HAALAND, R.; MCHARG, M. Comparison of sprite initiation altitudes between observations and models. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, Wiley Online Library, v. 116, n. A2, 2011. 39, 43

GERKEN, E. A.; INAN, U. S.; BARRINGTON-LEIGH, C. P. Telescopic imaging of sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 17, p. PP. 2637–2640, 2000. 7

GREENBERG, E.; PRICE, C.; YAIR, Y.; HALDOUPIS, C.; CHANRION, O.; NEUBERT, T. Elf/vlf signatures of sprite-producing lightning discharges observed during the 2005< i> eurosprite</i> campaign. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 71, n. 12, p. 1254–1266, 2009. 42

HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J.; WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D. Optical spectral characteristics of sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 1, p. PP. 89–92, 1996. 10, 11

HOLST, G. C. **Solid state arrays**. University of California, USA: SPIE Optical Engineering Press Bellingham, 1998. 45-100 p. 26

HU, W.; CUMMER, S. A.; LYONS, W. A. Testing sprite initiation theory using lightning measurements and modeled electromagnetic fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 13 PP., jul. 2007. 39

HUANG, E.; WILLIAMS, E.; BOLDI, R.; HECKMAN, S.; LYONS, W.; TAYLOR, M.; NELSON, T.; WONG, C. Criteria for sprites and elves based on schumann resonance observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D14, p. PP. 16,943–16,964, jul. 1999. 10

IDONE, V. P.; DAVIS, D. A.; MOORE, P. K.; WANG, Y.; HENDERSON, R. W.; RIES, M.; JAMASON, P. F. Performance evaluation of the us national lightning detection network in eastern new york: 1. detection efficiency. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 103, n. D8, p. 9045–9055, 1998. 42

KANMAE, T.; STENBAEK-NIELSEN, H.; MCHARG, M.; HAALAND, R. Diameter-speed relation of sprite streamers. **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP Publishing, v. 45, n. 27, p. 275203, 2012. 21, 37

KREHBIEL, P. R.; RIOUSSET, J. A.; PASKO, V. P.; THOMAS, R. J.; RISON, W.; STANLEY, M. A.; EDENS, H. E. Upward electrical discharges from

thunderstorms. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 4, p. 233–237, mar. 2008. ISSN 1752-0894. [16](#), [17](#), [18](#)

KUO, C. L.; CHEN, A. B.; CHOU, J. K.; TSAI, L. Y.; HSU, R. R.; SU, H. T.; FREY, H. U.; MENDE, S. B.; TAKAHASHI, Y.; LEE, L. C. Radiative emission and energy deposition in transient luminous events. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 23, p. 234014, dez. 2008. ISSN 0022-3727, 1361-6463. [12](#), [14](#)

LANG, T. J.; LI, J.; LYONS, W. A.; CUMMER, S. A.; RUTLEDGE, S. A.; MACGORMAN, D. R. Transient luminous events above two mesoscale convective systems: Charge moment change analysis. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, v. 116, n. A10, 2011. [41](#), [47](#)

LANG, T. J.; LYONS, W. A.; RUTLEDGE, S. A.; MEYER, J. D.; MacGorman, D. R.; CUMMER, S. A. Transient luminous events above two mesoscale convective systems: Storm structure and evolution. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 22 PP., maio 2010. [10](#), [43](#), [47](#)

LI, J.; CUMMER, S.; LYONS, W.; NELSON, T. Coordinated analysis of delayed sprites with high-speed images and remote electromagnetic fields. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 113, n. D20, 2008. [39](#)

LIU, N.; PASKO, V. P. Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. 17 PP., abr. 2004. [6](#), [9](#)

LUQUE ALEJANDRO EBERT, U. Emergence of sprite streamers from screening-ionization waves in the lower ionosphere. **Nature Geoscience**, v. 2, n. 10, p. 757–760, 2009. [13](#), [14](#)

LYONS, W. A. Sprite observations above the us high plains in relation to their parent thunderstorm systems. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union, v. 101, n. D23, p. 29641–29, 1996. [39](#)

LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; WILLIAMS, E. R.; CUMMER, S. A.; STANLEY, M. A. Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective system. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 10, p. 2417–2427, out. 2003. ISSN 0027-0644, 1520-0493. [10](#), [17](#)

- LYONS, W. A.; STANLEY, M. A.; NELSON, T. E.; CUMMER, S. A.; HUFFINES, G. R.; WIENS, K. C. Supercells and sprites. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 8, p. 1165–1174, 2008. 42
- MATSUDO, Y.; SUZUKI, T.; MICHIMOTO, K.; MYOKEI, K.; HAYAKAWA, M. Comparison of time delays of sprites induced by winter lightning flashes in the japan sea with those in the pacific ocean. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 71, n. 1, p. 101–111, 2009. 43, 70
- MENDE, S. B.; FREY, H. U.; HSU, R. R.; SU, H. T.; CHEN, A. B.; LEE, L. C.; SENTMAN, D. D.; TAKAHASHI, Y.; FUKUNISHI, H. D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. 11 PP., nov. 2005. 15
- MENDE, S. B.; RAIRDEN, R. L.; SWENSON, G. R.; LYONS, W. A. Sprite spectra; n2 1 pg band identification. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 19, p. PP. 2633–2636, 1995. 10
- MIKA, A.; HALDOUPIS, C.; MARSHALL, R.; NEUBERT, T.; INAN, U. Subionospheric vlf signatures and their association with sprites observed during < i> eurosprite-2003</i>. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, Elsevier, v. 67, n. 16, p. 1580–1597, 2005. 39, 43
- MIYASATO, R.; TAYLOR, M. J.; FUKUNISHI, H.; Stenbaek-Nielsen, H. C. Statistical characteristics of sprite halo events using coincident photometric and imaging data. **Geophysical Research Letters**, v. 29, p. 4 PP., nov. 2002. 12, 13
- MONTANYÀ, J.; VELDE, O. Van der; ROMERO, D.; MARCH, V.; SOLÀ, G.; PINEDA, N.; ARRAYAS, M.; TRUEBA, J.; REGLERO, V.; SOULA, S. High-speed intensified video recordings of sprites and elves over the western mediterranean sea during winter thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, Wiley Online Library, v. 115, n. A4, 2010. 53
- MOUDRY, D.; Stenbaek-Nielsen, H.; SENTMAN, D.; WESCOTT, E. Imaging of elves, halos and sprite initiation at time resolution. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 5, p. 509–518, mar. 2003. ISSN 13646826. 12, 13
- PASKO, V. P. Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges. **Plasma Sources**

Science and Technology, v. 16, n. 1, p. S13–S29, fev. 2007. ISSN 0963-0252, 1361-6595. 8, 9

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F. Spatial structure of sprites.

Geophysical Research Letters, v. 25, n. 12, p. PP. 2123–2126, 1998. 7

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; TARANENKO, Y. N. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A3, p. PP. 4529–4561, mar. 1997. 9, 10

PASKO, V. P.; STANLEY, M. A.; MATHEWS, J. D.; INAN, U. S.; WOOD, T. G. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. **Nature**, v. 416, n. 6877, p. 152–154, mar. 2002. ISSN 0028-0836. PMID: 11894087. 16, 17

RAIZER, Y. P.; MILIKH, G. M.; SHNEIDER, M. N.; NOVAKOVSKI, S. V. Long streamers in the upper atmosphere above thundercloud. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 31, n. 22, p. 3255–3264, nov. 1998. ISSN 0022-3727, 1361-6463. 9

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. ISBN 9780521035415. 10

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 9 PP., dez. 2010. 10, 39, 42, 69

SÃO SABBAS, F. T.; SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; PINTO, O.; MENDES, O.; TAYLOR, M. J. Statistical analysis of space time relationships between sprites and lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 5, p. 525–535, mar. 2003. ISSN 13646826. 2, 10, 20, 37, 39, 43, 47

SANDEL, B. R.; COLLINS, D.; BROADFOOT, A. L. Effect of phosphor persistence on photometry with image intensifiers and integrating readout devices. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 25, n. 20, p. 3697–3704, 1986. 53

SENTMAN, D.; WESCOTT, E. Red sprites and blue jets: High-altitude optical emissions linked to lightning. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Wiley Online Library, v. 77, n. 1, p. 1–5, 1996. 23

SENTMAN, D. D.; Stenbaek-Nielsen, H. C.; McHarg, M. G.; MORRILL, J. S. Plasma chemistry of sprite streamers. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 33 PP., jun. 2008. 11

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the sprites94 aircraft campaign: 1. red sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 10, p. PP. 1205–1208, 1995. 5, 6, 7, 16, 19, 23, 37, 39

SILVA, C. L. da; SÃO SABBAS, F. T. Consequences of the application of the streamer fluid model to the study of the sprite inception mechanism. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 10, p. 1902 – 1915, 2013. <ce:title id=. 9, 13, 14, 42

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; HAALAND, R.; McHarg, M. G.; HENSLEY, B. A.; KANMAE, T. Sprite initiation altitude measured by triangulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 9 PP., mar. 2010. 2, 20, 37, 53

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; HALLINAN, T. J.; WESCOTT, E. M.; FOEPPL, H. Acceleration of barium ions near 8000 km above an aurora. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. A12, p. PP. 10,788–10,800, 1984. 33

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MCHARG, M. G. High time-resolution sprite imaging: observations and implications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 23, p. 234009, dez. 2008. ISSN 0022-3727, 1361-6463. 1, 6, 7

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; McHarg, M. G.; KANMAE, T.; SENTMAN, D. D. Observed emission rates in sprite streamer heads. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 5 PP., jun. 2007. 6, 20, 37

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MOUDRY, D. R.; WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; SABBAS, F. T. S. Sprites and possible mesospheric effects. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 23, p. PP. 3829–3832, 2000. 20, 37

SU, H. T.; HSU, R. R.; CHEN, A. B.; WANG, Y. C.; HSIAO, W. S.; LAI, W. C.; LEE, L. C.; SATO, M.; FUKUNISHI, H. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. **Nature**, v. 423, n. 6943, p. 974–976, 2003. ISSN 0028-0836. 16, 17

SUSZCZYNSKY, D. M.; Roussel-Dupré, R.; LYONS, W. A.; ARMSTRONG, R. A. Blue-light imagery and photometry of sprites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 7?9, p. 801–809, maio 1998. ISSN 1364-6826. 11

THOMAS, J. N.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, D.; BAILEY, M.; SOLORZANO, N. N.; HOLZWORTH, R. H.; McCarthy, M. P.; KOKOROWSKI, M.; SABBAS, F. S.; JR, O. P.; CUMMER, S. A.; JAUGEY, N.; LI, J.; SCHUCH, N. J. A very

active sprite-producing storm observed over argentina. **Eos**, v. 88, n. 10, p. PAGE 117, 2007. 13

VELDE, O. A. van der; MIKA, Á.; SOULA, S.; HALDOUPIS, C.; NEUBERT, T.; INAN, U. S. Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes. **Journal of geophysical research**, American Geophysical Union, v. 111, n. D15, p. D15203, 2006. 39, 43, 70

VELDE, O. A. van der; MONTANYÀ, J.; SOULA, S.; PINEDA, N.; BECH, J. Spatial and temporal evolution of horizontally extensive lightning discharges associated with sprite-producing positive cloud-to-ground flashes in northeastern spain. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, v. 115, n. A9, 2010. 20, 39

WESCOTT, E.; SENTMAN, D.; HEAVNER, M.; HAMPTON, D.; LYONS, W.; NELSON, T. Observations of [] columniform'sprites. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, Elsevier, v. 60, n. 7-9, p. 733–740, 1998. 19, 39

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D.; OSBORNE, D.; HAMPTON, D.; HEAVNER, M. Preliminary results from the sprites94 aircraft campaign: 2. blue jets. **Geophysical Research Letters**, v. 22, p. 1209–1212, maio 1995. 16

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; HAMPTON, D. L.; OSBORNE, D. L.; JR, O. H. V. Blue starters brief upward discharges from an intense arkansas thunderstorm. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 16, p. PP. 2153–2156, 1996. 16, 19, 37

WESCOTT, E. M.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; MOUDRY, D. R.; SABBAS, F. T. S. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. A6, p. PP. 10,467–10,477, jun. 2001. 2, 20, 37, 39, 43

WILLIAMS, E.; KUO, C.-L.; BÓR, J.; SÁTORI, G.; NEWSOME, R.; ADACHI, T.; BOLDI, R.; CHEN, A.; DOWNES, E.; HSU, R. et al. Resolution of the sprite polarity paradox: The role of halos. **Radio Science**, Wiley Online Library, v. 47, n. 2, 2012. 10

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. PP. 13,151–13,167, 1989. 16

_____. Sprites, elves, and glow discharge tubes. **Physics Today**, v. 54, n. 11, p. 41–47, 2001. 10

_____. Problems in lightning physics?the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. S91–S108, maio 2006. ISSN 0963-0252, 1361-6595. 10

WILSON, C. T. R. The electric field of a thundercloud and some of its effects. **Proceedings of the Physical Society of London**, v. 37, n. 1, p. 32D–37D, jan. 1924. ISSN 1478-7814. 2, 9

YAIR, Y.; PRICE, C.; GANOT, M.; GREENBERG, E.; YANIV, R.; ZIV, B.; SHEREZ, Y.; DEVIR, A.; BÓR, J.; SÁTORI, G. Optical observations of transient luminous events associated with winter thunderstorms near the coast of israel. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 91, n. 2, p. 529–537, 2009. 43, 46, 70

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.