

ESTUDO DOS RAIOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE VÍDEO E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

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

Giovane Beck Suss (Universidade Federal de São Paulo, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: gbsuss@unifesp.br
Tagianne Patrícia da Silva (INPE/DISSM, Orientadora)
E-mail: tagianne.silva@inpe.br
Marcelo Magalhães Fares Saba (INPE/DISSM, Coorientador) E-mail:
marcelo.saba@inpe.br

INPE São José dos Campos 2024

ESTUDO DOS RAIOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE VÍDEO E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

Giovane Beck Suss

Relatório Final de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pela Doutoranda Tagianne Patrícia da Silva e Coorientado pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

INPE São José dos Campos 2024

RESUMO

Os raios podem ser divididos em dois grandes grupos: os que tocam o solo (raios descendentes e ascendentes) e os que não tocam o solo (raios intranuvem). Eles ainda podem ser divididos pela polaridade: positivos e negativos, dependendo da carga líquida transferida para o solo. Os raios analisados neste trabalho são descendentes positivos. Esses tipos de raios compõem aproximadamente 10% dos raios descendentes e normalmente ocorrem no final da tempestade devido a distribuição das cargas na nuvem. Além de possuírem uma corrente muito alta e com longa duração, são responsáveis por diversos danos em estruturas no solo e até mesmo incêndios. Este trabalho apresenta a classificação dos raios de 2012 a 2018 das cidades de São Paulo (Brasil), Kansas e do estado de South Dakota (Estados Unidos), onde foram instaladas câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico próximos aos locais de descargas dos raios. A análise da presença de líderes de recuo, ocorrendo no canal principal do raio ao longo do seu desenvolvimento, permitiu distinguir dois tipos de raios positivos: com líder de recuo e sem líder de recuo durante a propagação ao solo. Além da análise desse fenômeno, foram obtidas as velocidades em duas dimensões e seus respectivos picos de corrente, e foi observada uma relação entre estas duas características nos dois grupos de raios descendentes positivos analisados.

Palavras-chave: Raio Descendente Positivo. Líder de recuo. Velocidade. Pico de Corrente.

STUDY OF LIGHTNING THROUGH VIDEO CAMERAS AND ELECTRIC FIELD SENSORS

ABSTRACT

Lightning can be divided into two major groups: those that strike the ground (descending and ascending lightning) and those that do not strike the ground (intracloud lightning). They can also be categorized by polarity: positive and negative, depending on the net charge transferred to the ground. The lightning analyzed in this study are positive descending lightning. These types of lightning make up approximately 10% of descending lightning and typically occur at the end of a storm due to the distribution of charges within the cloud. In addition to having very high and long-lasting currents, they are responsible for several damages to structures on the ground and even fires. This work presents the classification of lightning from 2012 to 2018 in the cities of São Paulo (Brazil), Kansas, and the state of South Dakota (United States), where high-speed cameras and electric field sensors were installed near the lightning strike locations. The analysis of the presence of recoil leaders occurring in the main channel of the lightning during its development allowed for the distinction of two types of positive lightning: with recoil leader and without recoil leader during the propagation to the ground. In addition to analyzing this phenomenon, two-dimensional velocities and their respective current peaks were obtained, and a relationship between these two characteristics was observed in the two groups of positive descending lightning analyzed.

Keywords: Positive Descending Lightning. Recoil Leader. Velocity. Current Peak.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura elétrica do modelo tripolar de uma nuvem	11
Figura 2.2: Origem e Propagação de um Raio Descendente Positivo	13
Figura 2.3: Presença de um Líder de Recuo ionizando novamente o canal rompido do Raio.	14
Figura 2.4: Formação do Líder de Recuo em Raios Descendentes Positivos	15
Figura 2.5: Desenvolvimento de uma componente M (Esquerda para a direita)	15
Figura 2.6: Zona de Exclusão de Saba	16
Figura 2.7: gráfico da correlação entre velocidade média em 2-D e pico de corrente	18
Figura 3.1: Modelos das Câmeras Utilizadas	19
Figura 3.2: Programa Cine Viewer da fabricante Phantom.	20
Figura 3.3: Pulsos Característicos das Descargas de Retorno dos Raios Descendentes	21
Figura 3.4: exemplo do método de cálculo da corrente contínua	21
Figura 3.5: campo de visão da câmera	22
Figura 3.6 - parte onde aparece o solo na imagem.	.23
Figura 3.7: arquivo de texto onde é encontrado a localização em coordenadas	.25
Figura 3.8: Ilustração do método do tempo de chegada (TOA)	.25
Figura 3.9: ilustração do método da Direção Magnética (MDF)	26
Figura 3.10: Arquivo de texto onde se localiza o pico de corrente dos raios	.27
Figura 4.1: parte da tabela onde foi reunida as informações	.28
Figura 4.2: gráfico da relação entre Pico de Corrente e Velocidade média	29
Figura 4.3: tabela da média do pico de corrente e velocidade média	.30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Formação das nuvens	11
2.2 Raios Descendentes positivos	12
2.2.1 Líder de Recuo	13
2.3 Corrente Contínua	15
2.4 Pico de Corrente	
2.5 Velocidade	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 Equipamentos	18
3.1.1 Câmeras rápidas	18
3.1.2 Campo elétrico	19
3.2 Corrente contínua	20
3.3 Velocidade	21
3.4 Localização	23
3.4.1 TOA - Time of Arrival	24
3.4.2 MDF – Magnetic Direction Finding	25
3.5 Pico de Corrente	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

Os raios são fenômenos presentes na Terra desde muito antes da evolução da vida em nosso planeta. Todas as civilizações antigas incorporaram raios e trovões em suas crenças religiosas como a ira dos deuses. Hoje sabemos que a todo o instante, existem aproximadamente 2.000 tempestades pela atmosfera da terra, atingindo o solo cerca de 100 vezes por segundo (COORAY, 2015).

Os primeiros estudos na área de eletricidade atmosférica eram realizados através do campo elétrico, mas com o avanço da tecnologia e com o uso de câmeras de alta velocidade, foi possível adquirir imagens que permitiam o estudo da propagação destas descargas.

Os raios são classificados em: raios que não tocam o solo são denominados raios intranuvem, e os que estabelecem contato com o solo são identificados como raios nuvem-solo (descendentes) ou raios solo-nuvem (ascendentes). Eles ainda podem ser classificados pela sua polaridade, sendo positivos ou negativos, dependendo da carga líquida transferida para o solo (CRUZ, 2022). Os raios descendentes positivos, que são o foco do nosso trabalho, possuem pico de corrente alto e na maioria dos casos apresentam corrente contínua longa, quando sua duração é superior a 40 ms (FERRO, 2022; SABA et al., 2010).

A partir dos recursos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), rede de detecção de relâmpagos dos EUA (NLDN - National Lightning Detection Network) e pelo BrasilDat, foi possível realizar a análise dos dados referentes aos raios descendentes positivos, obtidos com o uso de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico. Este trabalho apresenta informações de diversos vídeos obtidos com diferentes câmeras de alta velocidade entre os anos de 2012 a 2018, dando ênfase a análise da ocorrência de líderes de recuo dos mesmos, a fim de obter informações para pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Formação das nuvens

As nuvens de tempestade são chamadas de Cumulonimbus, e tem sua formação a partir das cumulus, que se iniciam em aproximadamente 1.000 m de altura. Estas nuvens começam a se formar a partir do aquecimento do chão pelo sol, que evapora a água. Como o vapor d'água é menos denso que o ar ao nível do mar, o vapor d'água se propaga até atingir alturas onde a pressão é baixa o suficiente para que ocorra sua expansão, e consequentemente, seu resfriamento. Com o resfriamento, a água presente no ar começa a condensar, formando partículas microscópicas de água que compõem as nuvens. Se existir um contínuo suprimento de ar úmido, ocorrerá um rápido desenvolvimento vertical, até chegar a altitudes mais altas onde a temperatura aumenta, causando o deslocamento horizontal, dando uma forma característica de bigorna à nuvem (FERRO, 2022).

Este tipo de nuvem possui uma estrutura tripolar (Figura 2.1), onde existem três centros de carga: uma carga positiva próxima ao topo, uma carga negativa abaixo da positiva, na região central da nuvem, sendo estas duas geralmente chamadas de centros de cargas principais. Existe um outro centro de carga positiva adicional e menor na parte inferior da nuvem, podendo nem sempre estar presente (RAKOV; UMAN, 2005).

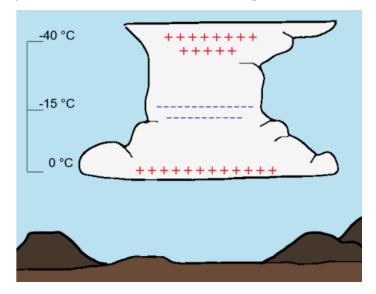


Figura 2.1: Estrutura elétrica do modelo tripolar de uma nuvem.

A região próxima ao topo possui a maior quantidade de cargas positivas, sendo este o centro

principal de cargas positivas. A região central apresenta cargas negativas, e é chamado de centro principal de cargas negativas. Por fim, a região próxima a base da nuvem possui cargas positivas, mas está em menor quantidade comparado ao centro principal de cargas positivas. Fonte: Silva (2022).

Os raios são classificados de acordo com a sua origem e propagação, sendo dividido em dois grupos: os que se originam e se propagam apenas na nuvem (raio intranuvem), que são cerca de 75% das ocorrências, e os que estabelecem contato com o solo (raios descendentes e ascendentes), que correspondem aos outros 25%. Os que estabelecem contato com o solo ainda podem ser classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo, sendo negativos, que compõem 90% das ocorrências e transferem cargas negativas, e positivos, que compõem os outros 10% e transferem cargas positivas (RAKOV, 2016).

2.2 Raios Descendentes positivos

Descargas elétricas que se originam na nuvem e se propagam em direção ao solo e fazem contato transferindo cargas positivas são chamados de raios descendentes positivos, ou nuvem-solo positivos (NS+). Este tipo de raio compõe aproximadamente 10% das ocorrências de raios descendentes.

Os raios NS+ se originam entre o centro principal de cargas positivas e o centro principal de cargas negativas e se propaga em direção ao solo. A figura 2.2 mostra a formação de um raio descendente positivo.

h [km] 10

6

4

Ecloud

Ponto de Iniciação

Lider Positivo

Solo

Figura 2.2: Origem e Propagação de um Raio Descendente Positivo.

Fonte: Adaptado de Ferro (2022).

Segundo Rakov (2016), existem quatro situações que podem favorecer a ocorrência de tais descargas, sendo eles: (i) o estágio de dissipação da nuvem de tempestade, onde o centro de carga negativa já está parcialmente dissipado, restando apenas os centros positivos; (ii) Tempestades de inverno, que além de possuírem a base da nuvem mais próxima ao solo, o centro de cargas negativas inferior se encontra deslocado em relação as tempestades de verão; (iii) Tempestades fortes, onde a distribuição de cargas dentro da nuvem é mais complexa que a representada pelo modelo tripolar; (iv) E nuvens formadas sobre incêndios florestais ou contaminadas por fumaça.

2.2.1 Líder de Recuo

Os Líderes de Recuo (RLs) são canais condutores flutuantes cuja extremidades têm polaridades opostas (MAZUR et al., 2013). Segundo Mazur (2016), os RLs se originam em canais decaídos dos líderes positivos, onde a extremidade negativa do RL ioniza novamente e de forma parcial ou integral o canal do líder positivo. Na Figura 2.3 podemos ver a presença de um RL se propagando em uma ramificação decaída de um

raio descendente positivo.

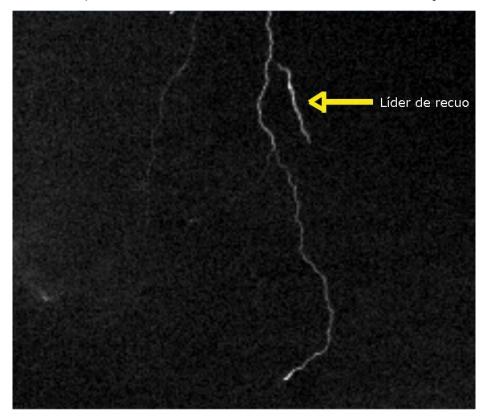


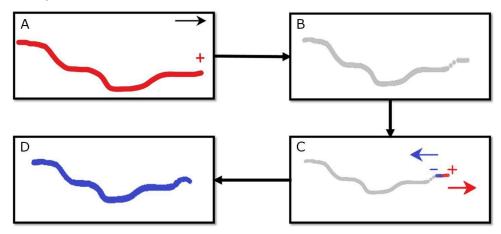
Figura 2.3: Presença de um Líder de Recuo ionizando novamente o canal rompido do Raio.

Fonte: Produção do Autor.

Os RLs se formam a partir da quebra do canal do líder positivo. À medida em que o líder positivo se desenvolve (Figura 2.4 (A)), ele se torna instável devido ao aumento no comprimento do canal. O aumento no comprimento no canal gera um aumento na resistência que dificulta a passagem de corrente, rompendo o canal nessa região (Figura 2.4 (B)) (FERRO, 2022).

Após o rompimento do canal, a parte rompida continua a apresentar a propagação da sua extremidade positiva (figura 2.4 (C)), injetando cargas negativas na extremidade oposta, próximo ao local do rompimento, fazendo com que essa extremidade, agora negativa, se propague pelo canal rompido o ionizando novamente (Figura 2.4 (D)) (FERRO, 2022).

Figura 2.4: Formação do Líder de Recuo em Raios Descendentes Positivos.

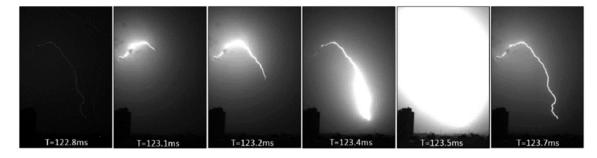


A) O raio positivo está se desenvolvendo para a direita, a medida em que sua resistência aumenta e vai se tornando instável; B) O canal do Raio Positivo se rompe cessando a passagem de corrente; C) A extremidade positiva continua a se propagar, transferindo cargas para a região onde ocorreu o rompimento o que, consequentemente, ioniza novamente o rompimento e se propaga pelo antigo canal; D) O canal rompido se reioniza.

Fonte: Silva (2022).

Os RLs também são responsáveis pelas descargas de retorno subsequentes nos raios descendentes e nos ascendentes negativos, onde o raio toca o solo novamente utilizando o mesmo canal da primeira descarga. Eles também são responsáveis pela Componente M, caracterizada por uma intensificação luminosa no canal enquanto o raio apresenta corrente contínua (FERRO, 2022; MAZUR, 2016). A figura 2.5 apresenta o desenvolvimento de uma componente M.

Figura 2.5: Desenvolvimento de uma componente M (Esquerda para a direita).



Fonte: Saba et al. (2016).

2.3 Corrente Contínua

Quando o líder estabelece o contato com o solo e ocorre a descarga de retorno, a corrente que flui por ele pode cessar em até 3 ms. Mas em alguns casos ela pode vir seguida de uma corrente de longa duração e baixa intensidade chamada corrente contínua (CC) (LAURIA, 2021).

Dependendo de sua duração, a CC é denominada: corrente contínua muito curta quando sua duração é inferior a 10 ms, corrente contínua curta quando sua duração está entre 10 ms e 40 ms e corrente contínua longa quando sua duração é superior a 40 ms (BALLAROTTI; SABA; PINTO, 2005; SHINDO; UMAN, 1989; KITAGAWA; BROOK; WORKMAN, 1962).

Saba et. al. (2010) mostrou que existe uma correlação entre a duração da CC e o pico de corrente da descarga de retorno que a precede. Em raios negativos, descargas de retorno com pico de corrente menores que 20 kA são seguidas, caso tenham, por CC longas, enquanto descargas de retorno com pico de corrente acima de 20 kA são seguidas, caso tenham, por CC curtas, como mostra a figura 2.6.

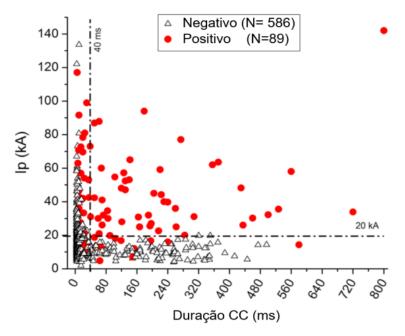


Figura 2.6: Zona de Exclusão de Saba.

No gráfico acima, os triângulos representam os raios descendentes negativos, que quando possuem CC menor que 40 ms, podem apresentar qualquer valor de pico de corrente, mas quando a CC tem duração superior a 40 ms, o valor de pico de corrente é inferior a 20 kA.

Porém, essa característica não é vista nos raios descendentes positivos (pontos vermelhos), onde raios com CC muito longa podem apresentar picos de corrente altos.

Fonte: Saba et al. (2010).

De acordo com Rakov (2016), entre 30% e 50% dos raios descendentes negativos possuem uma CC longa. Estes com CC longa duram em média 100 ms. As descargas de retorno de raios positivos tendem a possuir uma CC que pode durar de dezenas a centenas de milissegundos (RAKOV; UMAN, 2005). Aproximadamente 75% dos raios descendentes positivos apresentam CC longa (SABA et al., 2010).

2.4 Pico de Corrente

A descarga de retorno do raio positivo apresenta, em média, um pico de corrente mais intenso que a média dos picos de corrente de raios negativos (SABA, 2010; RAKOV, 2016). Já em relação à CC, onde podemos ver que para raios descendentes negativos, CC longas estão associadas a picos de corrente menos intensos (menores que 20 kA), enquanto CC curtas estão associadas a picos de corrente mais intensos (maiores que 20 kA), obedecendo a zona de exclusão de Saba, mas para raios descendentes positivos, picos de corrente altos podem desencadear CC longas, como é apresentada figura 2.6.

Os maiores picos de corrente medidos (~300 kA) estão associados aos raios descendentes positivos. Saba et al. (2010) indica uma média de 42,3 kA de pico de corrente para 68 descargas de retorno de raios ascendentes positivos no Brasil. Já para os negativos, para 55 raios descendentes ocorridos no Brasil, foi encontrada uma média de pico de corrente no valor de 28,3 kA (BALLAROTTI; SABA;PINTO, 2005).

2.5 Velocidade

Campos et. al. (2014), calculou a velocidade de 29 líderes positivos e comparou com os seus respectivos picos de corrente da descarga de retorno, como mostra a figura 2.7:

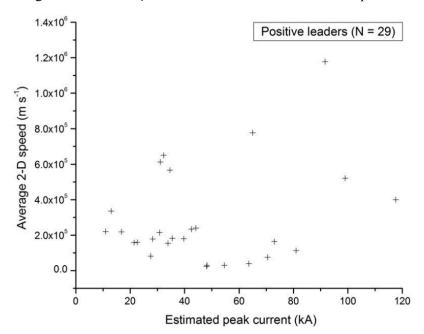


Figura 2.7: gráfico da correlação entre velocidade média em 2-D e pico de corrente.

Este gráfico mostra a correlação entre a velocidade média (eixo Y) de 29 líderes positivos em 2-D que variam entre 10^5 m/s e 1,4x10^6 m/s e seus respectivos picos de corrente (eixo X), que variam entre 0 kA e 120 kA.

Fonte: adaptado de Campos et. al. (2014).

Embora o estudo de Campos et. al. (2014) forneça dados iniciais valiosos sobre a relação entre a velocidade dos líderes positivos e o pico de corrente, a quantidade limitada de observações, com apenas 29 raios, é insuficiente para estabelecer resultados conclusivos. Para obter uma análise estatística mais robusta e generalizável, seria necessário um conjunto de dados maior e mais diversificado, como no presente trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados um total de 287 vídeos de 2012 a 2018. Os vídeos foram gravados por câmeras de alta velocidade como a V711, V310, MIRO 4, V7.1 e V12.1. Os locais de aquisição dos vídeos foram os estados de South Dakota e Kansas, e a cidade Rapid City, nos Estados Unidos, e São Paulo no Brasil. Todos os vídeos analisados pertencem ao banco de dados do INPE.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Câmeras rápidas

As câmeras rápidas utilizadas têm a capacidade de registrar de 1.000 a 100.000 imagens por segundo (ips). Os vídeos registrados por estas câmeras possuem informação de tempo GPS estampado em cada imagem. Os modelos das câmeras utilizadas foram: Phantom V711, Phantom V310, Phantom MIRO 4, Phantom V7.1 e Phantom V12.1 como mostrado na figura a 3.1 seguir.

Figura 3.1: Modelos das Câmeras Utilizadas.

A) Phantom V310, B) Phantom V711, C) MIRO 4, D) Phantom V12.1 e E) Phantom V7.1. Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

O programa utilizado para a observação dos vídeos foi o Cine Viewer. Este programa foi desenvolvido pela Phantom, fabricante das câmeras utilizadas, e permite uma análise detalhada dos vídeos, como a observação de imagem por imagem. A figura 3.2 apresenta o programa utilizado.

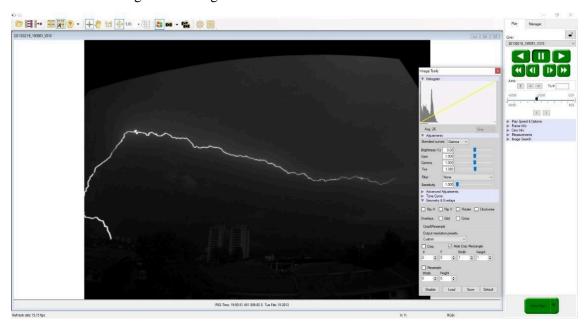


Figura 3.2: Programa Cine Viewer da fabricante Phantom.

O vídeo apresentado acima é de um raio descendente positivo que ocorreu dia 19/02/2013 às 19:50:51.483809.

Fonte: Produção do Autor.

3.1.2 Campo elétrico

O campo elétrico foi utilizado para confirmar a polaridade dos raios positivos e negativos, pois a aproximação dos dois líderes com o solo causa variações no campo elétrico diferentes. Como pode ser observado na figura 3.3, quando há variação de campo elétrico negativa, isso indica que o líder que se propaga em direção ao solo é negativo, enquanto uma variação positiva indica a aproximação de um líder positivo do solo.

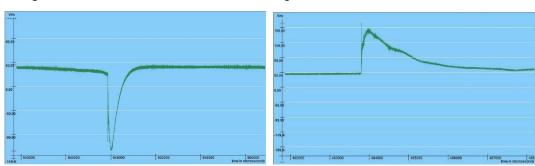


Figura 3.3: Pulsos Característicos das Descargas de Retorno dos Raios Descendentes.

À esquerda temos de um raio descendente negativo, que ocorreu dia 19/02/2013 às 18:28:00.947762, com a variação de campo elétrico negativa e à direita de um raio descendente positivo, que ocorreu dia 19/02/2013 às 19:50:51.483809, com a variação de campo elétrico positiva.

Fonte: Produção do Autor.

3.2 Corrente contínua

A corrente contínua (CC) pode ser observada nos registros em vídeo feitos por câmeras rápidas, e são identificadas por uma persistência na luminosidade do canal após a sua descarga de retorno. Ela é calculada pelo tempo decorrido entre o momento de contato com o solo até o desaparecimento da luminosidade do canal.

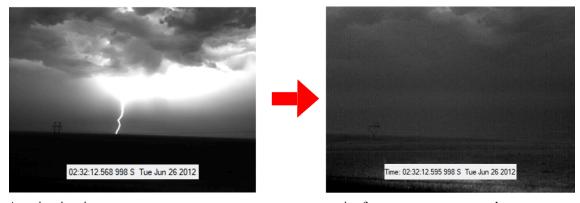


Figura 3.4: Exemplo do método de cálculo da corrente contínua.

A primeira imagem mostra o momento em que o raio faz contato com o solo, no tempo 02:32:12,568 998 onde, em ordem, é hora, minuto segundo e milissegundo. A segunda imagem mostra a hora em que o canal enfraquece, ou seja, a corrente contínua cessa, no tempo 02:32:12,595 998.

Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 3.4, é apresentado um exemplo de CC. A duração desta corrente pode

ser determinada pela subtração do tempo inicial, em segundos (568 998 s), do tempo final (595 998 s). Calculando a diferença entre esses dois valores, obtemos uma duração de 27 milissegundos. Esta duração classifica a CC como sendo de curta duração.

3.3 Velocidade

A velocidade média do raio em 2D pode ser calculada através da análise dos vídeos de câmera rápida. Esse processo é feito utilizando geometria.

Para calcular a velocidade média do raio, são necessários os seguintes dados: as informações da câmera, como o tamanho do sensor da câmera, a altura do sensor da câmera e a distância focal da lente, o tamanho da imagem na vertical do vídeo, a coordenada do sistema de detecção de descargas e a coordenada geográfica da câmera.

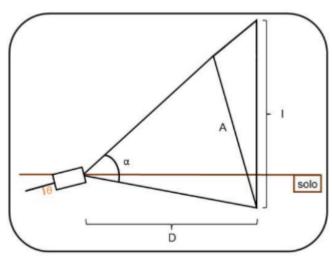


Figura 3.5: Campo de visão da câmera.

A figura representa a região de captura do vídeo da câmera em relação ao α , que é o ângulo de abertura da câmera, o tamanho I se refere ao tamanho do objeto capturado, A é a extensão vertical e D a distância do objeto em relação a câmera.

Fonte: Cedido por Cruz (2024).

O primeiro passo é calcular o ângulo de abertura da câmera através da equação 3.1, onde s é o tamanho do sensor da câmera em micrômetros (um), A é o tamanho da imagem na vertical em pixels (px) e f é a distância focal da lente em milímetros (mm):

$$\alpha = 2 \tan^{-1}(\frac{sA}{2f}) \quad (3.1)$$

Para calcular o tamanho do raio no vídeo, uma vez que não havia um objeto com tamanho conhecido, foi medida sua extensão em pixels para posteriormente compará-la com sua extensão real em metros, utilizando geometria simples. Antes de realizar esse cálculo, o solo na imagem foi desconsiderado (Figura 3.6).

A/2 B = A/2 - C $B = \alpha/2 - \theta$ DSolo

Figura 3.6 - Subtração do solo da imagem.

O triângulo em vermelho representa a parte que vamos desconsiderar, que seria o solo filmado pela câmera de alta velocidade.

Fonte: Cedido por Cruz (2024).

Podemos determinar o valor de C em pixels, estabelecendo a relação C = A - b, onde b representa o ponto de contato do raio com o solo. Esta relação pode ser reescrita como B = A/2 - C, já que a base da nuvem ocupa metade da imagem no vídeo, justificando o uso de A/2. Para calcular o tamanho real do raio (R), utilizamos a seguinte fórmula.

$$R = D \tan(\theta)$$
 (3.2)

Fazendo a razão entre R e B, temos:

$$F_{e} = \frac{R}{B}$$
 (3.3)

 \boldsymbol{F}_{e} fornece o fator de escala que converte a medida de pixels para metros. Ao

mapear a propagação do raio em coordenadas no eixo x (horizontal) e no eixo y (vertical) em relação ao tempo, é possível calcular a distância entre dois pontos P1(x1, y1) e P2(x2, y2) utilizando a seguinte equação:

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.4)$$

Os valores obtidos pela equação (3.4) são expressos em pixels; portanto, é necessário multiplicá-los pelo fator de escala F_e , que converte esses valores para metros. Para calcular a velocidade do líder, realiza-se a razão entre essas distâncias e o tempo decorrido entre dois pontos consecutivos. Esses resultados são representados em um gráfico que, por meio do coeficiente angular da reta e de um ajuste linear, permite determinar a velocidade média.

3.4 Localização

A localização do ponto de contato do raio com o solo é obtida através de dados fornecidos pela rede de detecção de descargas atmosféricas dos EUA (NLDN - *National Lightning Detection Network*) para os raios nos EUA, e pelo BrasilDat no Brasil, onde ambos obtém seus dados a partir dos sistemas de detecção de raios, que funcionam medindo a radiação eletromagnética gerada pelo fenômeno através de sensores no solo.

Ambas as redes, NLDN e BrasilDat, exportam os dados da localização obtidos em arquivos de texto e disponibilizam para o determinado período e local em que se deseja ser analisado, como mostra a figura 3.7.

São usados dois métodos de detecção da localização da descarga por ambas as redes, o *Time of Arrival* (TOA) e o *Magnetic Direction Finding* (MDF).

Figura 3.7: Arquivo de texto onde é encontrado a localização em coordenadas.

2012-04-06	12:25:41.040274235	44.527	-102.742	00	-8.9	kA	0.4	2.0	1	G
2012-04-06	12:29:09.159978617	44.565	-102.715	00	7.8	kA	0.9	3.0	1	C
2012-04-06	12:29:09.168454710	44.588	-102.679	00	5.6	kA	1.1	3.7	1	C
2012-04-06	19:02:24.168340632	43.833	-104.456	00	-4.2	kA	5.9	29.5	1	G
2012-04-06	19:07:52.870079615	43.918	-104.448	00	-8.0	kA	0.3	1.5	1	G
2012-04-06	19:09:18.858996253	43.790	-104.422	00	6.4	kA	0.4	2.0	1	C
2012-04-06	19:09:48.942587298	43.941	-104.431	00	-6.4	kA	0.3	1.5	1	C
2012-04-06	19:09:48.953725953	43.949	-104.425	00	-5.1	kA	0.4	2.0	1	C
2012-04-06	19:13:41.940477499	43.954	-104.480	00	-6.4	kA	0.3	1.5	1	C
2012-04-06	19:14:24.317156224	43.824	-104.414	00	-4.8	kA	0.4	2.0	1	C
2012-04-06	19:16:00.445787921	43.786	-104.435	00	-5.2	kA	0.4	2.0	1	C
2012-04-06	19:16:00.468180242	43.778	-104.392	00	6.6	kA	0.3	1.5	5	C
2012-04-06	19:16:41.645249393	43.736	-104.393	00	-5.2	kA	0.4	2.0	1	G
2012-04-06	19:18:02.672572293	43.775	-104.425	00	-6.0	kA	3.9	19.5	1	C

O arquivo apresenta os dados obtidos pela NLDN para raios em South Dakota obtidos no dia 06/04/2012 entre as 12:25:41 e 19:18:02, as coordenadas da localização do raio estão dentro do quadrado vermelho, onde a coluna da esquerda apresenta a latitude, em graus, e a da direita a longitude, também em graus.

Fonte: Produção do autor.

3.4.1 TOA - Time of Arrival

O método do tempo de chegada (TOA – *Time of arrival*) usa sensores, que possuem um sistema de sincronização de tempo GPS (*global position system*) para a precisão temporal, colocados em diferentes distâncias do local de contato da descarga com o solo, e se compara o instante em que o pulso é registrado por diferentes sensores. A figura 3.8 ilustra este método.

Sensor 2 $\Delta^{1/2}$ Sensor 1 Sensor 3 $\Delta^{1/2}$ Sensor 4 $\Delta^{1/4}$ Sensor 4 $\Delta^{1/4}$

Figura 3.8: Método do tempo de chegada (TOA).

Utilizam-se 4 sensores, por conta da distância, cada sensor recebe a mesma informação em

tempos diferentes. A partir de sucessivas triangulações, é determinada a posição da descarga. Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

Os raios dos círculos a partir do sensor correspondente representam a distância até a possível localização da ocorrência do raio. A partir de 4 sensores, é possível calcular a intersecção destes círculos e assim determinar a localização do ponto de contato do raio com o solo (SCHUMANN, 2016).

3.4.2 MDF – Magnetic Direction Finding

O método da Direção Magnética (MDF – *Magnetic Direction Finding*) é feito a partir da detecção da componente magnética da radiação eletromagnética emitida pelo raio. São usadas duas bobinas cruzadas e ortogonais entre si em seus sensores, que atuam como antenas para identificar a componente magnética em LF (*low frequency*) gerada pelo raio. Por conta da intensidade da radiação recebida em cada bobina, é determinada a direção aproximada do ponto de contato da descarga com o solo. São usados três sensores compostos por este par de bobinas, e a partir da triangulação o valor aproximado do ponto de contato com o solo é calculado (SCHUMANN, 2016), como na figura 3.9.

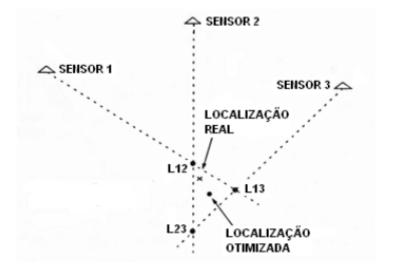


Figura 3.9: Método da Direção Magnética (MDF).

Localização do ponto de contato da descarga com o solo através do método da direção magnética utilizando 3 sensores. L12, L13 e L23 são as três intersecções das direções das componentes magnéticas medidas pelos sensores.

Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

3.5 Pico de Corrente

Os picos de corrente também foram obtidos através dos dados fornecidos pelo NLDN e pela BrasilDat. Ambos usam os mesmos métodos TOA e MDF para obter o pico de corrente dos raios através da forma de onda medida, estimando o pico de corrente, que são extraídos nos mesmos arquivos de texto da localização, como mostra a figura 3.10 a seguir.

Figura 3.10: Arquivo de texto onde se localiza o pico de corrente dos raios.

```
2012-04-06 12:25:41.040274235 44.527 -102.742 00
                                                                2.0
                                                    7.8 kA
                                                                3.0 1
2012-04-06 12:29:09.159978617 44.565 -102.715 00
                                                           0.9
                                                                        C
2012-04-06 12:29:09.168454710 44.588 -102.679 00
                                                    5.6 kA
                                                           1.1 3.7 1
                                                                        C
                                                   -4.2 kA
                                                           5.9 29.5
2012-04-06 19:02:24.168340632 43.833 -104.456 00
                                                                    1
2012-04-06 19:07:52.870079615 43.918 -104.448 00
                                                   -8.0 kA
                                                           0.3
                                                                1.5 1
2012-04-06 19:09:18.858996253 43.790 -104.422 00
                                                    6.4 kA
                                                           0.4 2.0 1
                                                                        C
                                                           0.3 1.5 1
2012-04-06 19:09:48.942587298 43.941 -104.431 00
                                                   -6.4 kA
                                                                        C
2012-04-06 19:09:48.953725953 43.949 -104.425 00
                                                   -5.1 kA
                                                           0.4 2.0 1
2012-04-06 19:13:41.940477499 43.954 -104.480 00
                                                  -6.4 kA
                                                           0.3 1.5 1
                                                                        C
2012-04-06 19:14:24.317156224 43.824 -104.414 00
                                                   -4.8 kA
                                                           0.4
                                                                2.0 1
                                                                        C
                                                   -5.2 kA
2012-04-06 19:16:00.445787921 43.786 -104.435 00
                                                           0.4
                                                                2.0
                                                                     1
                                                                        C
                                                    6.6 kA
                                                                     5
2012-04-06 19:16:00.468180242 43.778 -104.392 00
                                                           0.3
                                                                1.5
                                                                        C
                                                   -5.2 kA
2012-04-06 19:16:41.645249393 43.736 -104.393 00
                                                           0.4 2.0 1
                                                                        G
2012-04-06 19:18:02.672572293 43.775 -104.425 00
                                                   -6.0 kA 3.9 19.5
```

O arquivo apresenta os dados obtidos pela NLDN para raios em South Dakota obtidos no dia 06/04/2012 entre as 12:25:41 e 19:18:02, dentro do retângulo vermelho se localiza o pico de corrente em quiloAmperes (kA).

Fonte: Produção do Autor.

A partir do vídeo gravado, é possível determinar o momento exato em que o raio faz contato com o solo, utilizando o dispositivo GPS integrado à câmera. Este tempo pode ser comparado com os registros presentes na coluna mais à esquerda do arquivo de texto representado na Figura 3.10. Dessa forma, podemos localizar o raio específico que desejamos analisar, bem como o respectivo pico de corrente. Foi considerada uma margem de erro de 500 milissegundos acima e abaixo do tempo registrado pelo GPS da câmera para considerar possíveis erros de detecção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise focou exclusivamente nos raios descendentes positivos, identificados pela forma de onda do campo elétrico, permitindo a diferenciação entre raios positivos e negativos. O principal objetivo foi identificar a presença de líderes de recuo (RL - recoil leader) nesses raios antes de tocarem o solo, analisar o Pico de Corrente e calcular a velocidade. A intenção foi observar a relação entre o pico de corrente e a velocidade média para raios com e sem RL, buscando diferenciar essas duas classes.

Os dados obtidos, incluindo pico de corrente, coordenadas, campo elétrico e informações de vídeo, foram organizados em uma tabela no Excel. Nesta tabela, os dados foram separados para cada localidade analisada: São Paulo, no Brasil, os estados de South Dakota e Kansas, e a cidade de Rapid City, nos Estados Unidos, como mostra a figura 4.1 a seguir.

Figura 4.1: Exemplo da tabela produzida.

As colunas da esquerda para a direita mostram a data e horário em que o raio tocou o solo, sua corrente contínua, se ele tem Líder de Recuo ou não, o frame onde o Líder de Recuo aparece, o pico de corrente do raio, a latitude e longitude do raio obtido da NLDN, a latitude e longitude da câmera e a velocidade média do raio.

Fonte: Produção do Autor.

A partir dos dados de vídeo, foram obtidas a data e o horário em que o raio fez contato com o solo, sua corrente contínua e a coordenada da câmera. Os raios na tabela foram classificados pela presença de RL com base na análise dos vídeos, sendo que os raios com RL são aqueles que apresentam RL nos vídeos, enquanto os sem RL são aqueles que não apresentam RL nos vídeos.

Após a análise dos dados fornecidos, foram registrados 287 vídeos de raios

descendentes positivos na tabela, onde 67% do total apresentou RL antes de tocar o solo, e 33% do total não apresentando RL no momento anterior ao contato com o solo.

Foram obtidos um total de 209 picos de corrente para os raios analisados, sendo possível então fazer uma média desses valores para os raios sem RL e os com RL.

Com esses dados também foi possível calcular a velocidade média para 62 raios positivos de Rapid City e South Dakota, cujo canal principal é visível, onde 20 são raios sem RL e 42 são raios com RL, resultando no gráfico a seguir, que relaciona a velocidade média em metros por segundo (m/s) com o pico de corrente em quiiloAmperes (kA).

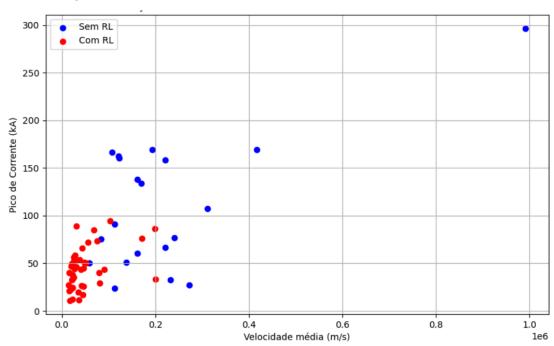


Figura 4.2: Gráfico da relação entre Pico de Corrente e Velocidade média.

O gráfico apresenta a relação da velocidade média, em metros por segundo (m/s), pelo pico de corrente, em quiiloAmperes (kA), dos raios analisados, sendo os sem RL os pontos azuis e os com RL os pontos vermelhos.

Fonte: Produção do Autor.

A partir da figura 4.2, observa-se que os raios positivos sem RL não excedem um pico de corrente superior a 100 kA e uma velocidade superior a 0,2 x 10⁶ m/s. Em contraste, os raios com RL não seguem um padrão definido, apresentando tanto picos de corrente baixos e velocidades baixas quanto picos de corrente altos e velocidades altas.

Tabela 4.1: Tabela da média do pico de corrente e velocidade média.

	Quantidade (%)	Pico de Corrente (kA) (N)	Velocidade Média (m/s) (N)	Corrente Contínua (ms) (N)		
Sem RL	95 (33%)	87,45 (69)	2,23x10^5 (20)	152 (83)		
Com RL	192 (67%)	44,23 (140)	4,96x10^5 (42)	222 (165)		

A média do pico de corrente foi calculada com base em 209 raios, a média das velocidades foi calculada com base em 62 raios, pois a medição da velocidade requer a visibilidade do raio ao longo do seu trajeto até o solo, o que não é visível em diversos casos e a corrente contínua foi medida com base em 248 raios. N indica o total da amostra utilizado em cada análise.

Fonte: Produção do Autor.

Na tabela 4.1, é possível observar uma diferença significativa nas médias entre os raios com RL e sem RL. Em relação ao Pico de Corrente, a média dos raios sem RL é o dobro da dos raios com RL, o que indica que o canal estável (caso sem RL) é mais eficiente na transferência de cargas para o solo que os casos onde é observada instabilidade no canal (casos com RL).

Quanto à velocidade média, a diferença é quase três vezes maior nos raios sem RL, o que, novamente, demonstra que a estabilidade do canal torna o raio mais eficiente também em relação a sua propagação em direção ao solo.

A Corrente Contínua (CC) média observada em raios sem RL foi de 152 milissegundos, enquanto nos raios com RL essa média aumentou para 222 milissegundos, o que pode indicar um comportamento dentro da nuvem que favorece a CC mais longa para os raios com RL.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse trabalho, foi possível reunir informações relacionadas aos raios descendentes positivos através da análise de várias das imagens obtidas através de câmeras de alta velocidade e pelos dados dos sensores de campo elétrico, fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados obtidos e organizados na tabela produzida foram utilizados para compreender os estágios finais de conexão com o solo do raio descendente positivo, as possíveis relações entre os Líderes de Recuo e a velocidade de aproximação desses raios com o solo ou estruturas no solo.

Os raios positivos analisados apresentaram dois comportamentos no seu desenvolvimento em direção ao solo, sendo diferenciados pela presença ou não de líderes de recuo, mas as diferenças não se limitam a apenas a estabilidade do canal. Os raios positivos que apresentaram estabilidade no canal durante o seu desenvolvimento também foram os mais rápidos em seu desenvolvimento em direção ao solo (3x) e admitem uma maior eficiência na transferência de cargas para o solo, apresentando picos de corrente superiores (2x) aos raios positivos que apresentam instabilidade no seu canal.

Em relação à Corrente Contínua (CC), os raios com RL apresentaram uma CC mais prolongada em comparação aos raios sem RL, isso sugere que o comportamento dentro da nuvem, incluindo uma maior presença de RLs, pode ter influencia na extensão da duração da CC.

Esses resultados são de grande importância para a compreensão do processo de conexão do raio com o solo e estruturas com solo e para a criação de medidas de mitigação dos efeitos dessas conexões, como o estabelecimento de parâmetros que poderão ser utilizados no aprimoramento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas que são usados em prédios e em torres de telecomunicação, por exemplo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO Jr., O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophysical Research Letters**. v. 32, L23802, doi:10,1029/2005GL023889, 2005.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; PINTO Jr., O.; KRIDER, E. P.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders – A statistical analysis. **Atmospheric Research.** v. 135–136, p. 285–305, jan.2014.

COORAY, V. An Introduction to Lightning. Uppsala, Sweden: Springer, 2015. 391 p. ISBN(9789401789387).

CRUZ, I. T. **LÍDERES DE RECUO EM RAIOS ASCENDENTES**. 2022. 120p. (INPE - 03.14.18.54-TDI) São José dos Campos – SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

DWYER, J. R.; UMAN, M. A. **The physics of lightning**. **Physics Reports**, v. 534, n. 4, p. 147 - 241, 2013.

FERRO, M. A. S. **Afinal, o que, Raios, é isso**. Ed. Do Autor. São José dos Campos, SP: INPE, 2022. 210 p. ISBN 978-65-00-55553-0.

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-toground discharges. **Journal of Geophysical Research**. v. 67, p. 637-647, 1962.

LAURIA, P. B. ESTUDO DE LÍDERES ASCENDENTES INICIADOS NOS PARA-RAIOS EM RESPOSTA ÀS DESCARGAS DESCENDENTES NEGATIVAS. 2021. 160 p. (INPE – 05.24.13.08-TDI) São José Dos Campos – SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

MAZUR. Principles of Lightning Physics: Principles of Lightning Physics. Ed. 20161201. National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA, 2016. 183 p. ISBN 978-0-7503-1152-6.

MAZUR, V. et al. Recoil leader formation and development. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 4, p. 763–768, ago. 2013.

NAG, A.; RAKOV, V. A. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 5, 16 mar. 2009.

RAKOV, V. A. **Fundamentals of Lightning**. [s.l.] Cambridge University Press, 2016. ISBN (9781139680370).

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning**: physics and effects. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 687 p. ISBN(9780415475976).

SABA, M. M. F. et al. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. 24, 2010.

SABA, M. M. F. et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research**, v. 121, n. 14, p. 8493–8505, 2016.

SCHUMANN, C. CARACTERIZAÇÃO DOS RAIOS POSITIVOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO. 2012. 135 p. (INPE - 04.23.13.25-TDI). São José dos Campos, SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

ESTUDO DOS RAIOS ASCENDENTES A PARTIR DE OBSERVAÇÕES DE CÂMERAS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL E DE MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO. 2016. 180 p. (INPE - 05.04.19.06-TDI). São José dos Campos, SP: Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

SHINDO, J. T.; UMAN, M. A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research**, vol. 94, n. D4, pp. 5189-5198, 1989.

SILVA, T. P. **ESTUDO DOS RAIOS INTRANUVEM ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO**. 2022. 98 p. (INPE - 03.17.12.55-TDI). São José dos Campos, SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.