

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

Tipo da Referência Conference Proceedings

Chave Secundária INPE-11573-PRE/6959

Chave de Citação SáCinMenDomMac:2004:AnFrEv

Autor Sá, Ubirajara Oliveira de  
Cintra, Luiz Antônio  
Mendes Júnior, Odim  
Domingues, Margarete Oliveira  
Macau, Elbert Einstein Neher

Título Análise fractal de eventos de relâmpagos

Nome do Evento Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)

Localização do Evento São José dos Campos

Ano 2004

Título do Livro Anais

Data 03 -04 ago. 2004

Editora (Publisher) INPE

Cidade da Editora São José dos Campos

Organização Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Repositório do Metadado sid.inpe.br/marciana/2004/11.23.10.16.54

Palavras-Chave GEOPÍSICA ESPACIAL, Relâmpagos, Descargas elétricas, SPACE GEOPHYSICS, Lightning, Electric discharges.

Resumo Este trabalho baseia-se na análise das descargas elétricas atmosféricas em termos do seu comportamento fractal. A metodologia consiste em utilizar programas de análise já disponíveis e alguns desenvolvidos no grupo de pesquisa. O objetivo é continuar o desenvolvimento de uma metodologia consistente para um estudo sistemático, o que permitirá entender melhor a eletrodinâmica desse processo de neutralização de cargas na atmosfera. O fenômeno relâmpago consiste de uma descarga ou múltiplas descargas elétricas, de elevada corrente elétrica, através da atmosfera. De uma forma geral, os relâmpagos ocorrem como relâmpagos nuvem-solo, solo-nuvem, entre nuvens, intranuvens, horizontais e para a estratosfera. Nesse estudo será dada maior ênfase ao relâmpago tipo nuvem-solo, embora alguns casos na atmosfera sejam considerados. A técnica fractal é empregada para descrever, calcular e pensar formas que são irregulares, quebradas ou fracionárias. Dimensão fractal é um modo de se medir o grau de aspereza, rugosidade, irregularidade e tortuosidade de uma determinada curva, superfície ou objeto, não podendo ser determinada analiticamente. A análise por dimensão fractal é uma ferramenta para quantificar a informação estrutural de objetos naturais e estruturais. Os fractais têm freqüentemente dimensões fracionárias e positivas. De forma a estender a metodologia de análise em desenvolvimento, a determinação do índice ou dimensão fractal dos relâmpagos está sendo feito pelo método da régua linear (ou comprimento escalar), que permite avaliar objetivamente quanto tortuoso é o caminho percorrido por um relâmpago.

Ultima Atualização do Metadado 2008:04.04.18.05.16 sid.inpe.br/banon/2003/08.15.17.40 marciana

Site <[mtc-ml6.sid.inpe.br](http://mtc-ml6.sid.inpe.br)>

Idioma pt

Detentor da Cópia SID/SCD

Tipo Secundário PRE CN

Formato Papel

Area CEA

Grupo  
DGE-CEA-INPE-MCT-BR  
LAC-CTE-INPE-MCT-BR  
LAC-CTE-INPE-MCT-BR

**Afiliação** Escola de Engenharia Industrial (EEI)  
Faculdade IBTA  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Geofísica Espacial (INPE.  
DGE)  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Computação e  
Matemática Aplicada (INPE. LAC)  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Computação e  
Matemática Aplicada (INPE. LAC)

**Endereço de e-Mail do Autor**  
odim@dge.inpe.br  
margarete@lac.inpe.br  
elberte@lac.inpe.br

**Projeto** MAGHEL: Magnetosfera e Heliosfera

**Permissão de Leitura** allow from all

**e-Mail (login)** marciana

**Grupo de Usuários** sergio administrator marciana

**Visibilidade** shown

**Data de Acesso** 04 abr. 2008

**Histórico** 2004-12-29 12:23:58 :: sergio -> administrator  
2006-11-09 18:55:22 :: administrator -> sergio  
2008-01-07 12:53:32 :: sergio -> marciana

**Estágio do Documento** concluido

[atualizar](#)

[Fechar](#)

## **Análise Fractal de Eventos de Relâmpagos**

Ubirajara Oliveira de Sá<sup>1</sup> (EEI-SJC/Bolsista PIBIC/CNPq)

Luiz Antônio Cintra<sup>2</sup> (IBTA/Bolsista PIBIC/CNPq)

Dr. Odim Mendes Jr.<sup>3</sup> (DGE/CEA/INPE)

Dra. Margarete Oliveira Domingues<sup>4</sup> (LAC/CTE/INPE)

Dr. Elbert Einstein Neher Macau<sup>5</sup> (LAC/CTE/INPE)

### **RESUMO**

Este trabalho baseia-se na análise das descargas elétricas atmosféricas em termos do seu comportamento fractal. A metodologia consiste em utilizar programas de análise já disponíveis e alguns desenvolvidos no grupo de pesquisa. O objetivo é continuar o desenvolvimento de uma metodologia consistente para um estudo sistemático, o que permitirá entender melhor a eletrodinâmica desse processo de neutralização de cargas na atmosfera. O fenômeno relâmpago consiste de uma descarga ou múltiplas descargas elétricas, de elevada corrente elétrica, através da atmosfera. De uma forma geral, os relâmpagos ocorrem como relâmpagos nuvem-solo, solo-nuvem, entre nuvens, intranuvens, horizontais e para a estratosfera. Nesse estudo será dada maior ênfase ao relâmpago tipo nuvem-solo, embora alguns casos na atmosfera sejam considerados. A técnica fractal é empregada para descrever, calcular e pensar formas que são irregulares, quebradas ou fracionárias. Dimensão fractal é um modo de se medir o grau de aspereza, rugosidade, irregularidade e tortuosidade de uma determinada curva, superfície ou objeto, não podendo ser determinada analiticamente. A análise por dimensão fractal é uma ferramenta para quantificar a informação estrutural de objetos naturais e estruturais. Os fractais têm freqüentemente dimensões fracionárias e positivas. De forma a estender a metodologia de análise em desenvolvimento, a determinação do índice ou dimensão fractal dos relâmpagos está sendo feito pelo método da régua linear (ou comprimento escalar), que permite avaliar objetivamente quão tortuoso é o caminho percorrido por um relâmpago.

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Engenharia Industrial Mecânica, EEI-SJC (Substituído). E-mail: atualmente sem

<sup>2</sup>Aluno do Curso Superior de tecnologia em redes de computadores, IBTA. E-mail: atualmente sem

<sup>3</sup>Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial: E-mail: [odim@dge.inpe.br](mailto:odim@dge.inpe.br)

<sup>4</sup>Pesquisadora do Lab. Assoc. de Comput. e Mat. Aplicada: E-mail: [margarete@lac.inpe.br](mailto:margarete@lac.inpe.br)

<sup>5</sup>Pesquisador do Lab. Assoc. de Comput. e Mat. Aplicada: E-mail: [elbert@lac.inpe.br](mailto:elbert@lac.inpe.br)



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

# AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

Número

PIBIC-042/04

Título 15712 1.534

Análise Fractal de Eventos de Relâmpagos

Autor

Luis Antônio Cintra

Tradutor

Não há

Editor

Origem	Projeto	Série	No. de Páginas	No. de Fotos	No. de Mapas
			29	0	0

Tipo

RPQ  PRE  NTC  PRP  MAN  PUD  TAE

Divulgação

Externa  Interna  Reservada  Lista de Distribuição Anexa

Periódico / Evento

Seminário de Iniciação Científica do INPE - SICINPE 2004

Convênio

Autorização Preliminar

Solicitada  Dispensada  
 Recebida   /  /   Devolvida   /  /  

Titular de Nível "A"  
 Assinatura do Revisor

Revisão Técnica

Solicitada  Dispensada  
 Recebida   /  /   Devolvida   /  /  

Titular de Nível "A"  
 Assinatura do Revisor

Revisão de Linguagem

Solicitada  Dispensada  
 Recebida   /  /   Devolvida   /  /  

Titular de Nível "A"  
 Assinatura do Revisor

Autorização Final

Solicitada  Dispensada  
 Recebida   /  /   Devolvida   /  /  

Titular de Nível "A"  
 Assinatura do Revisor

Palavras Chave

Análise Fractal - Relâmpagos

Coordenador do PIBIC  
 Programa Titular da Unidade Bolsas  
 de Iniciação Científica do INPE

Marcos Dion da Silva  
 Coordenador de Ensino, Documentação  
 e Programas Especiais - PIBIC

S. Moreira Martins  
 Presidente do Conselho  
 de Regulação Espacial - CRE



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-11573-PRE/6959**

## **ANÁLISE FRACTAL DE EVENTOS DE RELÂMPAGOS**

Luiz Antônio Cintra

Relatório Parcial de Projeto de Iniciação Científica  
(PIBIC/CNPq-INPE)

INPE  
São José dos Campos  
2004

P 70



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

## **ANÁLISE FRACTAL DE EVENTOS DE RELÂMPAGOS**

**Relatório parcial de Projeto de Iniciação Científica  
(PIBIC/CNPq-INPE)**

**Luiz Antônio Cintra (IBTA, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: la.cintra@terra.com.br**

### **Responsáveis**

**Dr. Odim Mendes Jr. (DGE/CEA/INPE)  
E-mail: odim@dge.inpe.br**

**Dr. Elbert Einstein N. Macau (LAC/CEA/INPE)  
E-mail: elbert@lac.inpe.br**

**Dra. Margarete O. Domingues (LAC/CEA/INPE)  
E-mail: mo.domingues@lac.inpe.br**

**Julho de 2004**

## Sumário

### Pág.

#### **Lista de Figuras**

#### **Lista de Equação**

#### **Lista de Imagens**

#### **Lista de Tabelas**

#### **Lista de Gráficos**

#### **Lista de Abreviaturas**

Introdução .....	5
<b>Capítulo 1</b>	
1 . 1 – Objetivo do trabalho .....	6
<b>Capítulo 2</b>	
2 . 1 – Propriedades dos relâmpagos .....	7
<b>Capítulo 3</b>	
3 . 1 – Fractais: conceitos .....	9
3 . 2 – Análise Fractal .....	10
3 . 3 – Dimensão Fractal .....	11
<b>Capítulo 4</b>	
4 . 1 – Dados e Metodologia de Análise .....	13
4 . 2 – As técnicas de análise e como usar .....	13
<b>Capítulo 5</b>	
5 . 1 – Resultados e Análises .....	16
<b>Capítulo 6</b>	
56. 1 – Conclusões.....	28
<b>Bibliografia</b> .....	29

**Pág.**

**Lista de Figura**

Figura 1 .....	12
Figura 2 .....	14
Figura 3 .....	16
Figura 4 .....	17
Figura 5 .....	25
Figura 6 .....	26
Figura 7 .....	27

**Lista de Tabelas**

Tabela 1 .....	17
Tabela 2 .....	20
Tabela 3 .....	22



### **Lista de Abreviaturas**

AR	- Relâmpago para o Ar
CNTP	- Condições Normais de Temperatura de Pressão
D	- Dimensão Fractal
d	- Tamanho da Régua
EM	- Relâmpago Entre-Nuvens
IN	- Relâmpago Intra-Nuvem
L	- Estimativa do comprimento de um objeto
L1; L2	- Medida dos comprimentos das curvas
N	- Números de réguas usadas
NS	- Relâmpago Nuvem-Solo
S	- Unidade de medida de tamanhos diferentes
S1; S2	- Tamanho das unidades usadas na medição
SN	- Relâmpago Solo-Nuvem
$l / d$	- Tamanho da régua dividido por 1

## ***INTRODUÇÃO***

O fenômeno relâmpago, ao longo dos tempos, tem sido cada vez mais estudado e pesquisado por diversas comunidades científicas e tecnológicas em todo o mundo (Mendes e Domingues, 2003).

O interesse crescente pelas suas origens, sua forma de ocorrência e dos seus efeitos deve-se a sua interferência no cotidiano. Por exemplo, as emissões eletromagnéticas dos relâmpagos interferem em sistemas de navegação de aeronaves, nos dispositivos de comunicação e em sofisticados equipamentos de superfície, acompanhados de significativos prejuízos econômicos causados pelas freqüentes avarias. Esses exemplos são uma motivação para o seu estudo numa ampla gama de abordagens. A facilidade de tais estudos tem aumentado devido, em grande parte, à instalação de sistemas de localização de tempestades e de novas técnicas de imageamento, que permitem estudos sobre as características tanto físicas quanto geográficas e sazonais dos relâmpagos, cobrindo grandes áreas continentais e, em particular, as regiões habitadas ou regiões de grande interesse específico.

## **CAPÍTULO 1**

### **1.1 – OBJETIVO DO PROJETO**

Este projeto de iniciação científica, relacionado ao Projeto “Análise da Eletrodinâmica de tempestade” (CNPq. 447819/03-6), coordenado pelo Dr. Odím Mendes Jr. – DGE/INPE, tem por objetivo desenvolver e implementar uma metodologia de análise das descargas elétricas atmosféricas por meio da *Técnica de Análise Fractal*, dando maior ênfase à análise da ramificação e da tortuosidade do canal.

Embora o tempo exíguo de 2 meses, por estar substituindo o estudante anterior, o estudante fez a caracterização do problema em foco, um início de estabelecimento de metodologia para a técnica da régua escalar e a aplicação preliminar a alguns casos. Assim, como uma fase inicial, fez-se o embasamento teórico sobre o fenômeno relâmpago, desde a formação das nuvens *Cumulonimbus* até a ocorrência dos relâmpagos, e sobre a *teoria fractal*, considerando conceitos básicos na visão de vários teóricos. A seguir, procedeu-se a análise e escolha de ferramentas de auxílio ao processo de *análise fractal* das descargas, dentro da técnica da régua escalar. Esses procedimentos, e outros ainda em desenvolvimento, constituem uma metodologia para o estudo da morfologia dos relâmpagos, característica que parece estar associada a parâmetros atmosféricos. Os resultados parciais obtidos dão prosseguimento ao desenvolvimento de métodos para lidar com a análise de relâmpagos quanto à morfologia, a definição dos critérios de tratamento das imagens e a obtenção de resultados quantitativos preliminares. Na fase de prosseguimento do trabalho, tratar-se-ão eventos de descargas selecionados para a obtenção de caracterizações fractais, considerando essencialmente a ramificação e a tortuosidade.

## **CAPÍTULO 2**

### **2.1 – PROPRIEDADES DOS RELÂMPAGOS**

De uma forma abreviada, faz-se uma apresentação do objeto de estudos, o relâmpago, quanto às suas características fundamentais (Uman, 1987).

Existem dois tipos fundamentais de relâmpagos: (a) no céu e (b) os que envolvem o solo. A diferença óbvia entre ambos está no fato de que os relâmpagos no céu são os que não alcançam o solo.

Entre os relâmpagos no céu, pode-se identificar três tipos principais: (1) *relâmpagos intra-nuvem* (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; (2) *relâmpagos entre-nuvens* (EN), que ocorrem entre nuvens diferentes e (3) *relâmpagos no ar* (AR), que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera em torno das nuvens de tempestade.

Os relâmpagos que envolvem o solo são classificados em dois tipos básicos: (1) *relâmpagos nuvem-solo* (NS), caracterizados por descargas que partindo de uma nuvem atingem a superfície da Terra e (2) *relâmpagos solo-nuvem* (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem. Os relâmpagos NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos relâmpagos *positivos* (transferência de cargas positiva) e *negativas* (transferência de cargas negativas).

Os relâmpagos mais comuns ocorrem no interior das nuvens (IN) seguidos pelos relâmpagos NS. Já os relâmpagos SN, EN e AR são bem mais raros. Embora os relâmpagos que envolvam o solo não sejam os mais freqüentes, eles são os mais estudados e, conseqüentemente, melhor compreendidos, devido não só a maior facilidade na realização de medidas como também por sua ação destrutiva na superfície terrestre. Por outro lado, os relâmpagos no céu são bem menos conhecidos, devido a grande dificuldade em obter-se informações detalhadas de seus mecanismo físicos.

### CAPÍTULO 3

#### 3.1 – CONCEITOS RELACIONADOS A FRACTAIS

Caos (Ferrara e Prado, 1995), a própria definição da palavra, em princípio oposta ao conceito de ordem, já nos coloca em situação difícil. Ao que indicam as últimas descobertas, o caos não é um conceito absoluto, que designaria o estado de desordem ou entropia de um sistema. Ao contrário, a suposta desordem do caos resulta de nossa incapacidade em compreender a fundo os sistemas aperiódicos, típicos da natureza e da sociedade, exemplificados pela turbulência dos fluidos, variações da economia, transformações meteorológicas, crescimento de populações e muitos outros fenômenos que escapam das famosas CNTP (Condições Normais de Temperatura de Pressão, inexistentes em qualquer lugar do planeta). Lembramos que a acepção do termo "*cháos*" no seu étimo grego é de "*origem*" ou "*abertura originária de onde vem tudo*", portanto, indeterminada. Só com o mundo romano é que tomou a acepção de "*desordem*", como oposição ao "*kósmos*" ou "*ordem*". A Segunda Lei da Termodinâmica, por exemplo, segundo a qual o universo caminha inexoravelmente para estados mais caóticos, costuma ser explicada a leigos pelo experimento da mistura de tinta e água. Seu resultado, no entanto, pode servir para explicar uma nova organização extremamente homogênea e, por conseguinte, entálpica. Esses foram alguns dos problemas encarados pelos primeiros cientistas a pensar metodicamente sobre o caos. Nas origens do estudo científico dos sistemas aperiódicos ou não-lineares, como também são chamados por apresentarem dependência sensível das condições iniciais. Cientistas como Benoit Mandelbrot e Christopher Scholz, criadores de uma matemática e geometria mais próximas da natureza. Já que o mundo se recusava a se comportar de acordo com as teses euclidianas, que viessem os fractais para descrever a complexidade do recorte de litorais e encostas montanhosas, das micro-irregularidades na superfície dos metais, das rochas porosas cheias de petróleo etc. Mandelbrot, juntando uma abordagem relativística ao profundo estudo das dimensões, concluiu que a natureza exigia, para um

melhor entendimento, o trânsito pelas frações entre o ponto e a linha, a linha e o plano, o plano e o volume. Como calcular a quantidade de petróleo existente numa rocha porosa? Encontrando um número entre a segunda e a terceira dimensão. Algo como 2,4 dimensões, por exemplo. Com esta lógica é possível calcular o grau de irregularidade ou fragmentação de um fenômeno ou objeto. Foi a partir deste fracionamento, desta fracture, que Mandelbrot criou o termo fractal em 1975.

### ***3.2 - ANÁLISE FRACTAL***

O homem tem enfrentado problemas no sentido de caracterização das feições naturais encontradas em Geociências. A análise de características naturais tem sido feita geralmente de modo qualitativo, uma vez que, até então, não foi possível oferecer um meio quantitativo para medir processos. A geometria fractal para aplicações em medidas de processos e formas irregulares, onde o contorno irregular ou uma função irregular são analisados na escala com dimensão fractal; isto implica numa análise da menor até a maior irregularidade. O conceito matemático de um fractal caracteriza objetos com estruturas em várias escalas, desde grande como pequena, refletindo, então, um princípio hierárquico de organização. Existe uma idealização importante envolvida: objetos fractais são *auto-similares*, isto é, eles não mudam sua aparência significativamente quando vistos em um microscópio com aumento. A utilização da teoria dos fractais para análise de fenômenos representa um paradigma na ciência e, de modo geral, deverá ser apresentada uma certa dificuldade (barreira) para a aceitação deste fato. Mandelbrot inventou o termo fractal a partir do lema "*nomen est numerus*" (nomear é conhecer) e foi introduzido em 1975 (Les objets fractales: forme, hasard et dimension). O termo vem do latim "*fractus*" (fragmentado, irregular, partido), o que leva à idéia oposta Álgebra, oriundo do árabe "*al'jabara*", (significa unir). A definição de fractal não deixa transparecer as potencialidades que sua teoria possui nos mais diversos ramos da ciência.

A dimensão fractal de um objeto é a medida de seu grau de irregularidade considerado em todas as escalas e está relacionada à rapidez com que a medida estimada do objeto aumenta enquanto o instrumento de medição diminui. Quanto menor a régua, maior será o valor medido, uma régua muito grande não consegue levar em conta as irregularidades, enquanto régua menores conseguem medir mais precisamente as variações. Realizando uma série de medidas com diversas régua, seriam medidos certos valores, colocando estes valores em eixo cartesiano, apresentar-se-ia uma seqüência de pontos próxima a uma reta. Fazendo uma regressão linear, tem-se uma reta dos pontos; a inclinação desta reta tem haver com a medida fractal.

### ***3.3 - Dimensão Fractal***

O conceito de *dimensão fractal* fornece uma maneira de medir a irregularidade das curvas fractais. Nós normalmente consideramos que uma *linha reta* possui uma dimensão; uma *superfície plana* possui duas dimensões; um *ponto* possui dimensão zero; um *sólido* possui três dimensões.

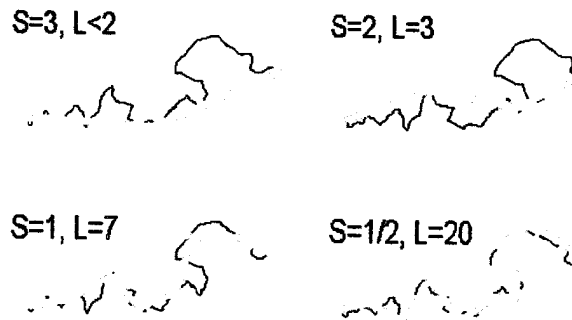
Uma *curva irregular*, contudo, se forma em torno de uma superfície; nos seus extremos ela pode se tornar tão irregular que efetivamente "*preenche*" completamente a superfície em que ela reside. Uma *curva irregular* possui uma dimensão intermediária entre 1 e 2, enquanto que uma superfície irregular possui uma dimensão entre 2 e 3. Em ambos os casos, a dimensão é fracionária.

A dimensão de uma *curva fractal* é um número que caracteriza a maneira na qual a medida do comprimento entre dois pontos aumenta à medida em que a *escala diminui*. Enquanto que a dimensão topológica de uma linha é sempre 1 e a de uma superfície é sempre 2, a dimensão fractal pode ser qualquer número real entre 1 e 2. A *dimensão fractal* é definida pela equação na qual  $L_1$  e  $L_2$  são as medidas dos comprimentos das curvas (em unidades) e  $S_1$  e  $S_2$  são o tamanho das unidades (ou seja, as escalas) usadas na medição.



$$D = \frac{\log(L_2/L_1)}{\log(S_2/S_1)}$$

A figura 1 abaixo representa a linha costeira de uma região. Repare que foram utilizadas unidades de medida de tamanhos diferentes (S) para estimar o comprimento (L) do litoral.



**Fig. 1** - Para este litoral, as medidas de S=1 e S=1/2 resultam em comprimentos de L=7 e L=20, respectivamente. Então  $D = \log(20/7) / \log(2) = 1,51$

## **CAPÍTULO 4**

### **4.1 – DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE**

Os dados são imagens de relâmpagos, obtidas por filmagens ou por tomadas de fotos. As filmagens requerem ser digitalizadas e permitem obter quadros a cada 17 mili-segundos, portanto são capazes de registrar a dinâmica do fenômeno. Por outro lado, as fotos, embora não permitam acompanhar a dinâmica, apresentam ainda uma mais alta resolução espacial, permitindo análises que considerem variações espaciais.

A metodologia de trabalho aqui desenvolvida consiste em:

1. obter o comportamento espacial do relâmpago por meio de filmagens (gravações VHS); e proceder a captura das imagens em padrão AVI, utilizando programas computacionais de tratamento e análise gráfica;
2. separar os campos de imagens em padrão TIFF que permite uma melhor impressão (com resolução temporal de 17,6 ms), criando uma base de dados para utilização nas análises realizadas utilizando a técnica fractal;
3. aplicar a essas imagens o tratamento desenvolvido neste projeto, utilizando as ferramentas de análise selecionadas.

Uma das ferramentas já utilizadas é um programa de análise baseada na técnica de *contagem de caixas*. Procede-se agora a busca de novos recursos computacionais capazes de aprimorar essas análises. O método da régua linear está sendo implementado e uma metodologia de análise das características da trajetória da descarga.

### **4.2 – A técnica de análise pelo método da régua escalar**

O método da régua Linear diz respeito à tortuosidade.

Para facilitar a análise das as imagens coletadas, essas são ampliadas. Usa-se o método da régua linear para medir em princípio o canal central do Relâmpago, essa medida começa com o tamanho máximo da régua. À medida que se diminui a régua e encontrado um maior numero de pontos, chegando assim bem próximo da trajetória do relâmpago na imagem original. Ao se estabelecer todos os pontos adequados para uma aproximação da imagem estudada, é criada uma tabela onde serão relacionados o tamanho da régua (d) e o numero de réguas usadas (n). Os pontos (d) serão dividido por 1 para que se obtenha no gráfico final uma reta crescente. Em seguida é achado o (log) de todos os pontos (1/d) e (n). Com esses resultados, os pontos encontrados na tabela serão transferido para um gráfico onde o log de (n) serão os pontos de y e o log de 1/d serão os pontos de x. Para se obter a *reta* nesse gráfico é preciso usar a fórmula dos mínimos quadrados onde a possibilidade de obter uma função real que passe nos pontos ou pelo menos passe próximo dos pontos ( x , y ) dados. Dentre os processos matemáticos que resolvem tal problema, o *Método dos Mínimos Quadrados*, serve para gerar o que se chama em Estatística: Regressão Linear ou Ajuste Linear. Depois de aplicar os pontos achados na tabela, é aplicada a equação mostrada na Figura 2, onde apresenta-se a reta traçada no gráfico. A inclinação da reta que se ajusta aos pontos dá o índice fractal do canal do relâmpago.

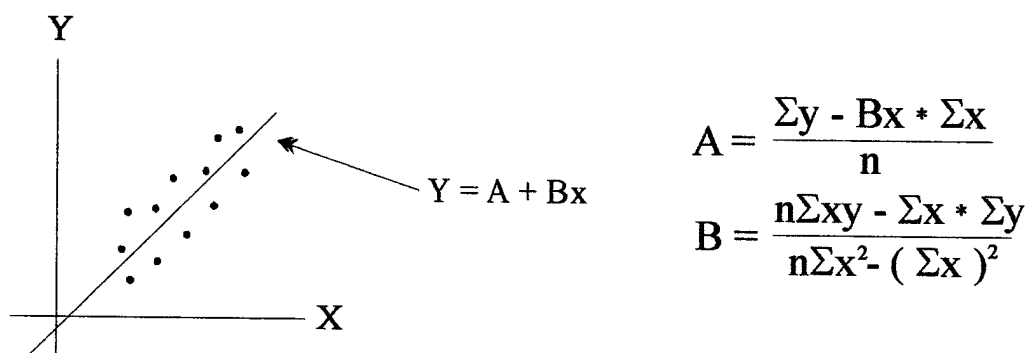


Fig. 2 – Procedimento de cálculo da dimensão fractal com auxílio de um ajuste linear obtido pelo método dos mínimos quadrados.

O método de cálculo de dimensão pelo divisor escalar ou régua escalar (Stoyan e Stoyan, 1994) é considerado preciso para a determinação da dimensão fractal de curvas e planos. Essas curvas são orientadas e delimitadas (por exemplo, o limite de uma partícula ou de uma linha da costa). Sua descrição prossegue do seguinte modo: primeiramente um ponto inicial denominado S é marcado na curva a ser analisada; em seguida um ponto final ou um ponto arbitrário são selecionados em uma curva B. Os divisores são ajustados a uma largura de raio igual a  $r_1$ , e então um ponto de intersecção com B e do círculo centrado em S de raio  $r_1$  é determinado. O processo pode ser repetido várias vezes se necessário. Nos cálculos, admite-se que  $N(r_1)$  seja igual à largura do divisor que é colocado em B. Esse mesmo procedimento é repetido para os raios  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  com  $r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_n$ . Se B for um fractal, sua aproximação pode ser dada por

$$L(r) = c r^{(1-D)}$$

ou

$$\log L(r) = \log C + (1-D) \log r ,$$

em que D é a dimensão do fractal calculado. Por meio do entendimento dimensional da equação acima, pode-se reescrever:

$$l_r = l_0 (r/r_0)^{(1-D)}$$

em que  $r_0$  é uma constante arbitrária que dimensiona o comprimento e  $l_0$  é uma constante adicional do comprimento.

Uma estimativa da dimensão D pode ser obtida traçando os pontos  $(r_1, l(r_1))$  em um gráfico bi-logaritmo, obtendo assim uma reta por regressão linear. A dimensão D é obtida diretamente da inclinação angular da reta ajustada à distribuição dos pares ordenados.

## *CAPÍTULO 5*

### *5.1 – RESULTADOS PRELIMINARES*

As Figuras 3 e 4 mostram eventos de relâmpagos, em que se apresentam a emissão luminosa produzida na fase da conexão nuvem-solo, isto é, na fase da descarga de retorno. A Figura 3 mostra descargas praticamente simultâneas. A Figura 4 é referente a um evento de relâmpago bifurcado, com um ramo aéreo, isto é, sem conexão direta com o solo mas com outra posição na nuvem, e um ramo para o solo. Utilizou-se o método implementado da régua linear para o cálculo dos valores fractais para essas descargas, considerando o canal principal dessas ocorrências.

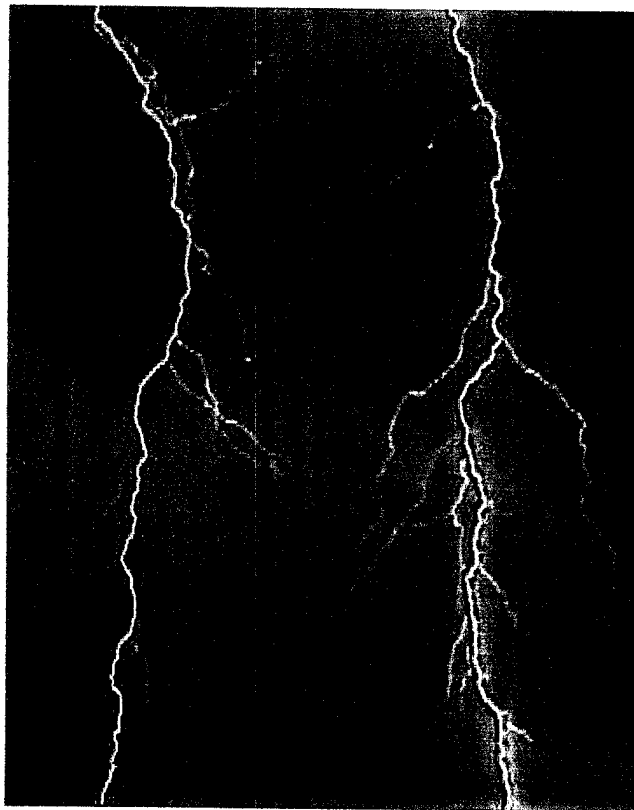


Fig. 3 – Descargas elétricas praticamente simultâneas.

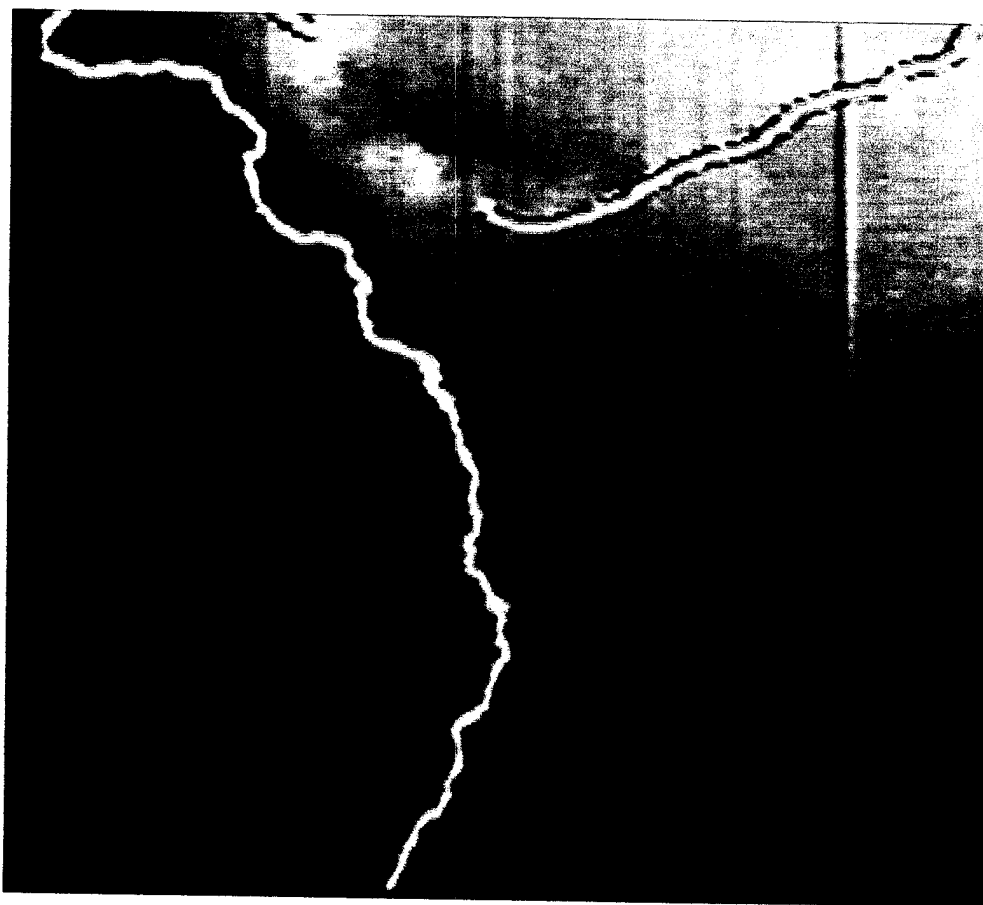


Fig. 4 – Relâmpago com um ramo aéreo e outro ramo conectando nuvem e solo.

As Tabelas 1, 2, 3 e 4 são referentes ao tratamento dos eventos analisando-se o canal principal. Na tabela o ( d ) é o tamanho da régua; ( n ) números de régua usadas; ( 1/d ) para se obter uma reta crescente no gráfico; log de ( 1/d ) representa os pontos do eixo ( x ) no gráfico; log de ( n ) representa os pontos do eixo ( y ) no gráfico. Os pontos, para atender a metodologia descrita na seção anterior, encontrados nessas tabelas serão transferidos para um gráfico.

**Tabela 1 – Relampago 1 (canal esquerdo)**

d	n	1 / d	Log ( 1 / d )	Log ( n )
30	1.0666	0.0355	-3.338223	6.447598E-2

29.5	1.0779	0.03653	-3.310443	7.501476E-2
29	1.093	0.0376	-3.280751	8.892626E-2
28.5	1.112	0.0390	-3.244194	0.1061602
28	1.1357	0.0405	-3.206453	0.1272492
27.5	1.1527	0.0419	-3.172469	0.142107
27	1.1740	0.0434	-3.137296	0.1604167
26.5	1.1924	0.00449	-3.426151	0.1759681
26	1.2192	0.0468	-3.061872	0.1981949
25.5	1.2431	0.0487	-3.022076	0.2176083
25	1.268	0.0507	-2.981829	0.2374409
24.5	1.297	0.0529	-2.939352	0.2600539
24	1.316	0.0540	-2.918771	0.2745968
23,5	1.353	0.0575	-2.85597	0.3023244
23	1.2192	0.0530	-2.937463	0.1981949
22.5	1.2755	0.0566	-2.871746	0.2433383
22	1.436	0.0652	-2.730296	0.3618615
21.5	1.2883	0.0599	-2.815079	0.2533236
21	1.509	0.0718	-2.633871	0.4114471
20.5	1.546	0.0754	-2.584948	0.4356709
20	1.585	0.0792	-2.535779	0.4605844
19.5	1.6256	0.0833	-2.485307	0.485877
19	1.668	0.0877	-2.433833	0.5116253
18.5	1.7189	0.0929	-2.376232	0.5416845
18	1.766	0.0981	-2.321768	0.5687171
17.5	1.817	0.1038	-2.265289	0.5971868
17	1.864	0.1096	-2.210918	0.6227247
16.5	1.9272	0.1168	-2.147292	0.6560681
16	1.987	0.1241	-2.086668	-1.308525E-2
15.5	2.051	0.1323	-2.022683	0.7183275

15	2.126	0.1417	-1.954043	0.7542422
14.5	2.02	0.1393	-1.971125	0.7030975
14	2.292	0.1637	-1.80972	0.8294248
13.5	2.3851	0.1766	-1.733868	0.869241
13	2.4769	0.1905	-1.658103	0.9070078
12.5	2.6	0.208	-1.570217	0.9555114
12	2.6916	0.2243	-1.494771	0.9901358
11.5	2.8434	0.2472	-1.397558	1.045001
11	2.9454	0.2677	-1.317888	1.080245
10.5	3.0952	0.2947	-1.221797	1.129853
10	3.26	0.326	-1.120858	1.181727
9.5	3.4315	0.3612	-1.018323	1.232997
9	3.6111	0.4012	-0.9132952	1.284012
8.5	3.8117	0.4484	-0.8020696	1.338075
8	3.062	0.3827	-0.9605039	1.119068
7.5	4.3333	0.5777	-0.5487006	1.466329
7	4.6428	0.5162	-0.661261	1.535318
6.5	5	0.7692	-0.2624042	1.609438
6	5.45	0.9083	-9.618058E-2	1.695616
5.5	5.9272	1.0776	7.473635E-2	1.779552
5	6.62	1.324	0.2806575	1.890095
4.5	7.2222	1.6049	0.4730614	1.97716
4	8.175	2.0437	0.7147619	2.101081
3.5	9.457	2.702	0.9939922	2.246755
3	9.9	3.3	1.193922	2.292535
2.5	13.12	5.248	1.657847	2.574138
2	16.6	8.3	2.116256	2.809403
1.5	22.333	14.8886	2.700596	3.106066
1	33.4	33.4	3.508556	3.508556



0.75	44.8	59.733	4.089885	3.802208
0.5	67.8	135.6	4.909709	4.216562
0.25	136	544	6.298949	4.912655
0.1	364	3640	8.199739	5.897154

**Tabela 2 – Relâmpago 1 (canal direito)**

<b>d</b>	<b>n</b>	<b>1 / d</b>	<b>Log ( 1 / d )</b>	<b>Log ( n )</b>
30	1.0666	0.0355	-3.338223	6.447598E-2
29.5	1.0779	0.0365	-3.310443	7.501476E-2
29	1.0965	0.0378	-3.275446	9.212332E-2
28.5	1.1192	0.0392	-3.239079	0.1126141
28	1.1392	0.0406	-3.203987	0.1303262
27.5	1.1636	0.0423	-3.162968	0.1515186
27	1.1851	0.0438	-3.128121	0.1698271
26.5	1.2075	0.0455	-3.090043	0.1885521
26	1.2269	0.0471	-3.055482	0.2044906
25.5	1.2509	0.0490	-3.015935	0.2238633
25	1.28	0.0512	-2.972016	0.2468601
24.5	1.302	0.0531	-2.935578	0.2639016
24	1.325	0.0552	-2.896792	0.2814125
23.5	1.3574	0.0577	-2.852498	0.305571
23	1.382	0.0600	-2.813411	0.3235317
22.5	1.4177	0.0630	-2.764621	0.3490359
22	1.45	0.0659	-2.719617	0.3715636
21.5	1.4837	0.0690	-2.673649	0.394539
21	1.5142	0.0721	-2.629701	0.4148872
20.5	1.5560	0.0759	-2.578339	0.4421184
20	1.595	0.0797	-2.529486	0.4668738
19.5	1.6307	0.0836	-2.481712	0.4890094

19	1.6736	0.0880	-2.430418	0.514977
18.5	1.7189	0.0929	-2.376232	0.5416845
18	1.7722	0.0984	-2.318715	0.5722217
17.5	1.8171	0.1038	-2.265289	0.5972419
17	1.8764	0.1103	-2.204551	0.6293551
16.5	1.9272	0.1168	-2.147292	0.6560681
16	1.9875	0.1242	-2.085862	0.6868775
15.5	2.051	0.129	-2.047943	0.7183275
15	2.126	0.1417	-1.954043	0.7542422
14.5	2.2	0.1517	-1.88585	0.7884574
14	2.285	0.1632	-1.812779	0.8263661
13.5	2.3629	0.1750	-1.742969	0.8598897
13	2.4615	0.1893	-1.664422	0.9007709
12.5	2.56	0.2048	-1.585721	0.9400072
12	2.675	0.2229	-1.501032	0.9839494
11.5	2.7913	0.2533	-1.373181	1.026507
11	2.9090	0.2644	-1.330292	1.067809
10.5	3.047	0.2901	-1.23753	1.114157
10	3.19	0.319	-1.142564	1.160021
9.5	3.357	0.3533	-1.040438	1.211048
9	3.5777	0.3975	-0.9225603	1.27472
8.5	3.7764	0.4442	-0.8114803	1.328771
8	3.975	0.4968	-0.6995677	1.380025
7.5	4.266	0.5688	-0.5642264	1.450677
7	4.728	0.6754	-0.3924502	1.553502
6.5	4.9384	0.7597	-0.2748317	1.597041
6	5.233	0.8721	-0.1368512	1.654985
5.5	5.8909	1.0710	6.859277E-2	1.773409
5	6.038	1.2076	0.1886349	1.798073
4.5	7.022	1.5604	0.4449422	1.949048

4	8.075	2.0187	0.7024537	2.088773
3.5	9.028	2.5794	0.9475569	2.200331
3	10.633	3.5443	1.265341	2.363962
2.5	12.92	5.168	1.642486	2.558777
2	16.3	8.15	2.098018	2.791165
1.5	23.8	15.8666	2.764216	3.169686
1	37.5	37.5	3.624341	3.624341
0.75	44	58.6666	4.07186	3.78419
0.5	66.6	133.2	4.891852	4.198705
0.25	134.8	539.2	6.290087	4.903792
0.1	339	3390	8.128585	5.826

**Tabela 3 – Relâmpago bifurcado (para o solo)**

<b>d</b>	<b>N</b>	<b>1 / d</b>	<b>Log ( 1 / d )</b>	<b>Log ( n )</b>
24	1	0.0416	-3.179655	0
23.5	1.0340	0.044	-3.123566	3.343482E-2
23	1.0652	0.0463	-2.730296	6.316255E-2
22.5	1.12	0.0497	-3.00175	0.1133287
22	1.15	0.0522	-2.952673	0.1397619
21.5	1.1860	0.0551	-2.898606	0.1705863
21	1.2142	0.0578	-2.850766	0.1940854
20.5	1.2829	0.0625	-2.772589	0.2491231
20	1.335	0.0667	-2.70755	0.2889313
19.5	1.3692	0.0702	-2.656407	0.3142266
19	1.4052	0.0739	-2.605042	0.3401797
18.5	1.4378	0.0777	-2.5549	0.3631142
18	1.4666	0.0814	-2.50838	0.3829468
17.5	1.5028	0.0858	-2.455736	0.40733
17	1.5647	0.0920	-2.385967	0.4476941

16.5	1.6060	0.0973	-2.329956	0.4737466
16	1.675	0.1046	-2.257612	0.5158131
15.5	1.7290	0.1115	-2.193731	0.5475432
15	1.78	0.1186	-2.131999	0.5766134
14.5	1.8482	0.1274	-2.060424	0.6142122
14	1.9	0.1357	-1.997309	0.6418539
13.5	1.9555	0.1448	-1.932402	0.6706459
13	2.0384	0.1568	-1.852784	0.7121652
12.5	2.136	0.1708	-1.767262	0.7589349
12	2.1916	0.1826	-1.700457	0.7846319
11.5	2.2956	0.1996	-1.61144	0.8309942
11	2.4	0.2181	-1.522802	0.8754688
10.5	2.5714	0.2448	-1.407314	0.9444505
10	2.72	0.272	-1.301953	1.000632
9.5	2.8526	0.3002	-1.203306	1.048231
9	2.9666	0.3296	-1.109875	1.087417
8.5	3.1529	0.3709	-0.9918228	1.148323
8	3.375	0.4218	-0.863224	1.216395
7.5	3.52	0.4693	-0.7565131	1.258461
7	3.9142	0.5591	-0.581427	1.364611
6.5	4.1846	0.6437	-0.4405225	1.431411
6	4.5	0.75	-0.2876821	1.504077
5.5	0.7005	0.9123	-9.178641E-2	-0.3559609
5	5.52	1.104	9.893993E-2	1.708378
4.5	5.0444	1.1209	0.114132	1.618279
4	6.9	1.725	0.5452271	1.931521
3.5	7.85	2.2428	0.8077251	2.060513
3	9.1666	3.0555	1.116943	2.215566
2.5	11.0363	4.4145	1.484895	2.40119
2	14.3	7.15	1.967112	2.660259

1.5	19.2	12.8	2.549445	2.95491
1	29.7	29.7	3.391147	3.391147
0.75	40.8	54.4	3.998201	3.708682
0.5	61	122	4.804021	4.110874
0.25	123.4	493.6	6.201725	4.815431
0.1	294	2940	7.986165	5.68358

Os gráficos apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 são referentes à determinação do índice fractal para cada evento de relâmpago. No eixo X são lançados os valores de escala, isto é, da métrica adotada (comprimento). No eixo Y são lançados os valores coordenados do número de comprimentos lineares necessários para percorrer, de acordo com a técnica, o caminho definido pelo canal ionizado da descarga elétrica. Com esses pontos formando pares coordenados, em um gráfico dilogarítimo, será traçada uma reta que melhor se ajuste aos pontos. A inclinação,  $\text{tang}(\theta)$ , dá o índice fractal,  $D (= 1 + \text{tang}(\theta))$ , referente à propriedade do objeto considerado, neste caso, à tortuosidade do canal do relâmpago.

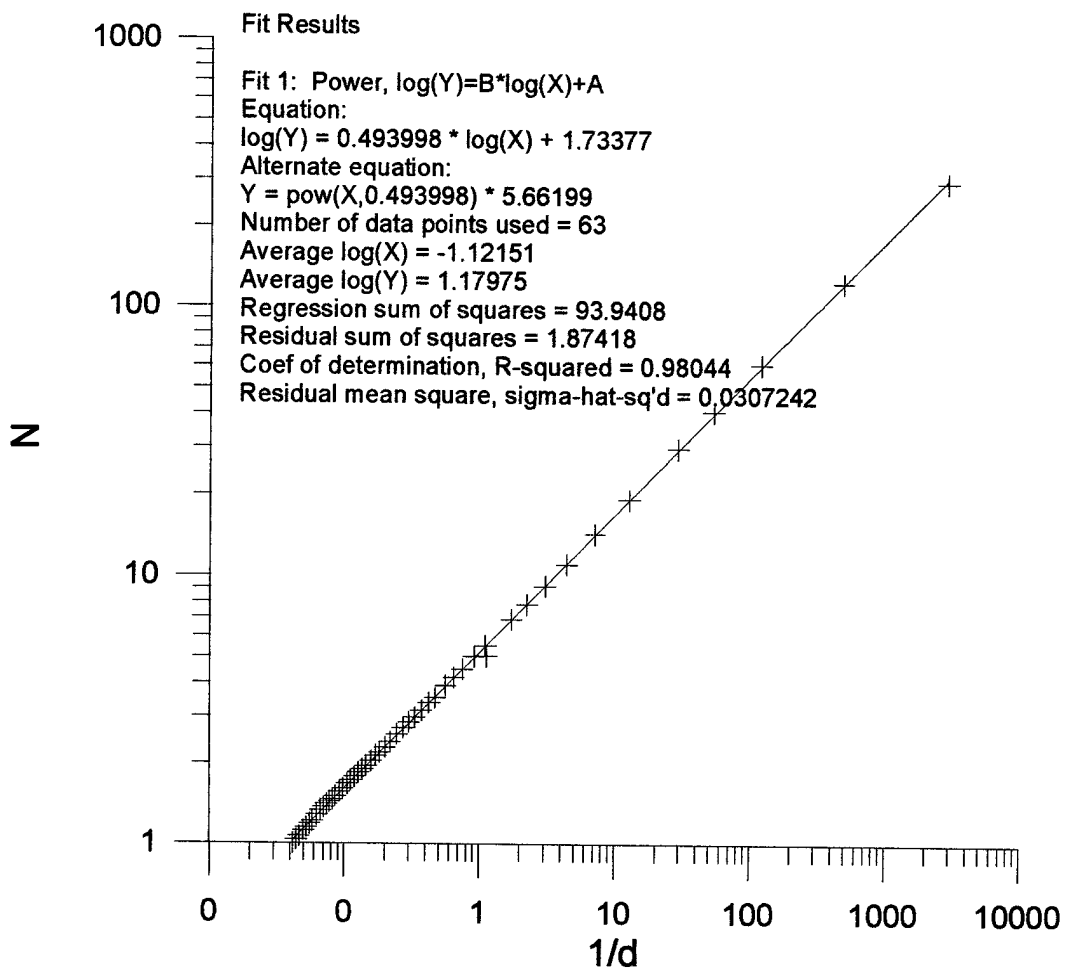


Fig. 5 – Grafico do ajuste linear para o relâmpago 1 (canal esquerdo), resultando índice fractal igual a 1,50.

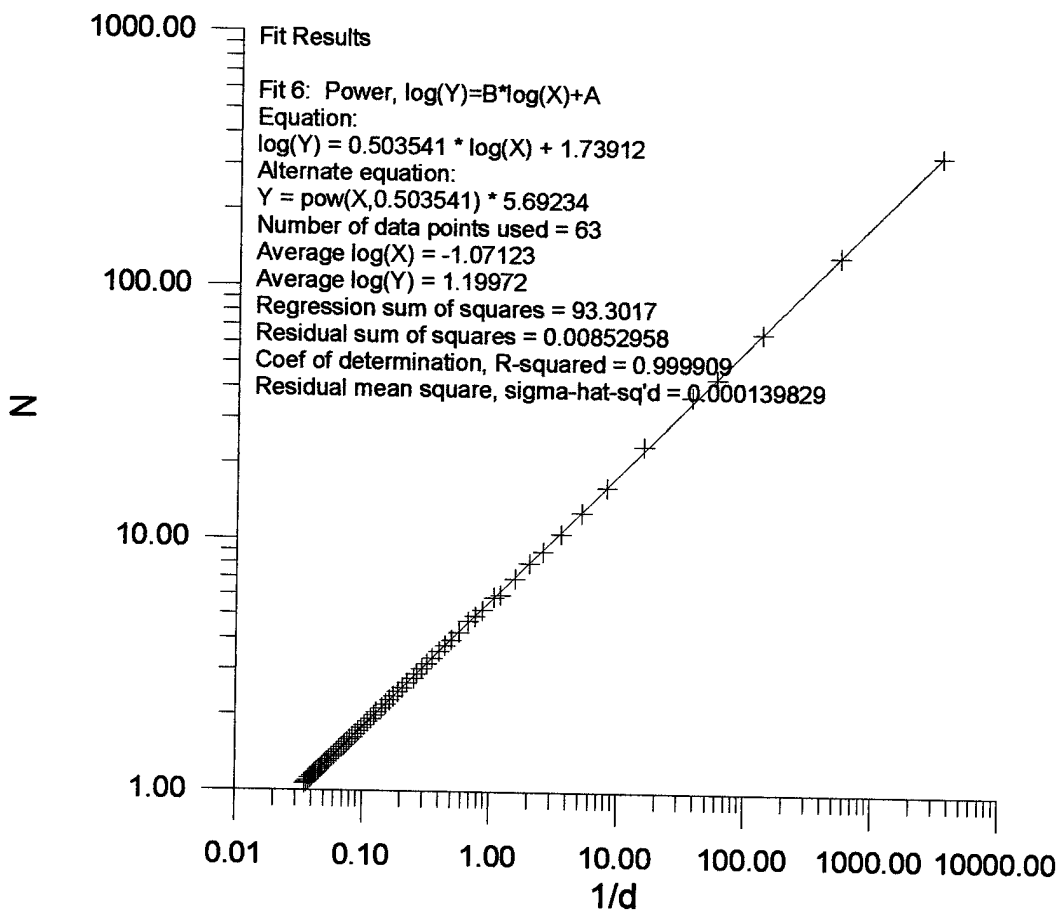


Fig. 6 – Gráfico do ajuste linear para o relâmpago 1 (canal direito), resultando índice fractal igual a 1,50.

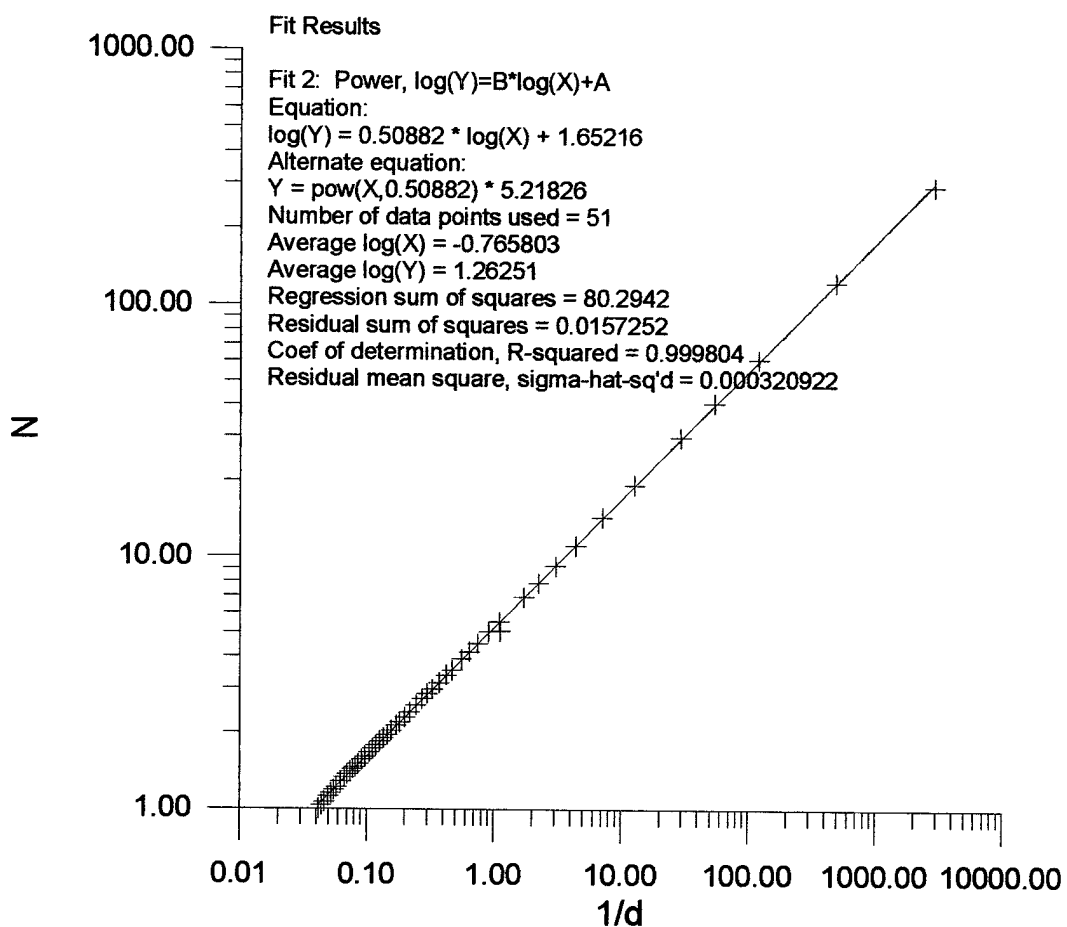


Fig. 7 – Gráfico do ajuste linear do relâmpago bifurcado (ramo solo), resultando índice fractal igual a 1,51.



## *CAPÍTULO 6*

### *6 – CONCLUSÕES PRELIMINARES*

Estabeleceu-se as primeiras etapas de uma metodologia de análise da tortuosidade do canal ionizado do relâmpago, considerando a fase da emissão luminosa da descarga de retorno, que é o momento em que a conexão elétrica entre a nuvem e solo é feita. O desenvolvimento foi feito com o uso da técnica de análise pelo método da régua escalar ou divisor linear.

Por meio da metodologia já implementada, pode-se examinar 3 eventos de relâmpagos, obtendo um índice fractal 1,50, que é menor que os índices obtidos em laboratórios experimentais.

Como perspectivas para o prosseguimento do trabalho, estão (a) a melhoria desse procedimento de análise, (b) a complementação com análise de outros aspectos do canal, como os passos da descarga e as mudanças de direção, (c) a integração com os procedimentos de análise pela técnica das caixas de contagem já desenvolvido, e (d) a aplicação a um número maior de eventos de relâmpagos.

**BIBLIOGRAFIA**

- Ferrara, N. F.; Prado, C. P. C. **Caos: uma introdução**. São Paulo, Edgar Blücher, 1995.
- Mendes, O. Jr.; Domingues, M. O. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 24(1):3-19, 2003.
- Stoyan, D.; Stoyan, H. **Fractal random shapes and point fields: methods of geometric statistics**. John Wiley and Sons, 1994.
- Uman, M. A. **The lightning discharge**. Orlando, Academic, 1987. pp.377.