

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório de Atividades

Projeto:

Análise de Imagens de Relâmpagos por meio de Técnica Fractal  
(Versão Preliminar / Distribuição Restrita)

ANA PAULA SANTOS NOVAES

Iniciação Científica em Ciência Espacial/Geofísica Espacial,  
orientada pelo Dr. Odim Mendes Júnior.

PIBIC - DGE/CEA/INPE

São José dos Campos

janeiro,2002

# **ANÁLISE DE IMAGENS DE RELÂMPAGOS POR MEIO DE TÉCNICA FRACTAL**

Ana Paula Santos Novaes<sup>1</sup> ( UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq )

Dr. Odim Mendes Júnior<sup>2</sup> ( DGE/CEA/INPE )

## **RESUMO**

O projeto de Iniciação Científica que vem sendo realizado tem por objetivo desenvolver e implementar uma metodologia de análise das descargas elétricas atmosféricas por meio da Técnica Fractal, dando maior ênfase a ramificação e a tortuosidade do canal. O estudo da eletrodinâmica das descargas é importante para o entendimento do fenômeno Relâmpago; para seu uso em aplicações gerais; e como forma de prevenir ou monitorar seus efeitos no meio ambiente, devido inclusive o risco que apresenta para as instalações de forma geral e à própria vida. Nessa fase inicial, foram realizadas atividades de embasamento teórico sobre o fenômeno relâmpago, desde a formação das nuvens Cumulonimbus até a ocorrência de relâmpagos, e a teoria fractal, sendo visto seus conceitos básicos na visão de vários teóricos. Procedeu-se também a escolha de ferramentas de auxílio ao processo de análise das descargas, estando em fase de estudo o programa computacional denominado HARFA, capaz de determinar a dimensão fractal de imagens associadas ao fenômeno em estudo, no caso, o comportamento espacial do relâmpago. Na fase atual do trabalho, realizam-se a aquisição de dados para análise; aprofundamento no conhecimento da técnica fractal; e testes para a análise de imagens-padrão com o HARFA. Procedeu-se ainda a busca de novos recursos computacionais capazes de aprimorar estas análises. A metodologia de trabalho segue da seguinte forma: tendo em mãos as documentações visuais (gravações VHS) dos relâmpagos, procede-se a captura das imagens em padrão *AVI*, utilizando programas computacionais de tratamento e análise gráfica. Separam-se então os quadros de imagens em padrão *TIFF* (resolução temporal de 17,6 ms), criando uma base de informações para utilização nas análises realizadas utilizando a técnica fractal. Aplicam-se nestas imagens um tratamento utilizando a ferramenta HARFA para determinar a dimensão fractal. Estes procedimentos, e outros que ainda deverão ser desenvolvidos, constituirão uma nova metodologia para estudo da morfologia dos relâmpagos, característica associada a parâmetros atmosféricos. Os resultados parciais obtidos foram: desenvolvimento da habilidade em lidar com a técnica fractal, definição dos critérios de tratamento das imagens, obtenção de resultados quantitativos preliminares em exemplos, como o triângulo de Sierpinski, e a análise de um caso físico. Na fase de prosseguimento do trabalho, tratar-se-ão as descargas selecionadas e classificadas para a obtenção de caracterizações fractais, considerando a ramificação.

<sup>1</sup> Aluna do Curso de Engenharia Ambiental, UNITAU. E-mail: [anapaula@dge.inpe.br](mailto:anapaula@dge.inpe.br)

<sup>2</sup> Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial. E-mail: [odim@dge.inpe.br](mailto:odim@dge.inpe.br)

# Sumário

<b>1 Relatório de Atividades: Análise de Relâmpagos por meio da Técnica Fractal</b>	<b>1</b>
1.1 Problema Científico . . . . .	1
1.2 Trabalho Proposto . . . . .	1
1.3 Recursos Computacionais . . . . .	2
1.4 A importância do trabalho . . . . .	2
1.5 As etapas da iniciação científica . . . . .	2
1.5.1 O embasamento teórico . . . . .	2
1.5.2 Escolha de ferramentas de apoio . . . . .	3
1.5.3 Aquisição dos dados a serem analisados . . . . .	3
1.5.4 Resultados obtidos . . . . .	3
1.5.5 Conclusões . . . . .	3
1.6 Etapas do projeto realizadas . . . . .	3
1.7 Atividades em desenvolvimento . . . . .	4
1.8 Resultados esperados . . . . .	4
1.9 Cronograma 2001-2002 . . . . .	4

# Capítulo 1

## Relatório de Atividades: Análise de Relâmpagos por meio da Técnica Fractal

### 1.1 Problema Científico

A análise dos Relâmpagos necessita de métodos e estudos complexos, que possibilitem uma maior compreensão do fenômeno. O objetivo do estudo a ser realizado é de analisar o relâmpago por meio da técnica fractal, que é pouco utilizada, mas que seu emprego vem aumentando em larga escala dentro do ambiente científico.

### 1.2 Trabalho Proposto

O trabalho que foi proposto para análise do fenômeno relâmpago é a utilização do conceito de técnica fractal, para que seja possível medir sua dimensão, partindo conceito que o relâmpago possui forma irregular, e em consequência, sua dimensão não pode ser analisada pela geometria tradicional. Para isso, o conhecimento de conceitos teóricos sobre as propriedades elétricas da matéria, a formação de relâmpagos e a técnica fractal serviram de embasamento

para que tal estudo possa ser realizado com veracidade. A escolha de ferramentas computacionais de eficácia também foi realizada. Essa foi a primeira etapa do projeto.

A segunda etapa será a análise de imagens de relâmpagos por técnica fractal, e a utilização de softwares que auxiliem o estudo.

### **1.3 Recursos Computacionais**

Para atender a solução do problema proposto, foram pesquisados novos programas computacionais e houve a utilização de programas já conhecidos, como o  $\text{\LaTeX}$ . Os programas que foram pesquisados forma o Harfa, um software capaz de fazer a análise da dimensão fractal da figura, pelo método de contagem de caixas, e o Point, que proporciona a demarcação dos pontos da trajetória da figura. O Point possibilita que o cálculo da angulação de cada mudança de direção do fenômeno seja feita, pois os pontos são marcados com referência aos eixos  $x$  e  $y$ . O  $\text{\LaTeX}$  foi utilizado como um editor de texto avançado para confecção do material teórico. Um aprofundamento no ambiente Linux também foi efetuado.

### **1.4 A importância do trabalho**

A importância prática desse trabalho é contribuir para uma maior compreensão do fenômeno relâmpago através da utilização da técnica fractal, e poder aumentar o poder dessa ferramenta para estudo desse tipo, facilitando o estudo dos próximos pesquisadores que a queiram utilizar.

### **1.5 As etapas da iniciação científica**

#### **1.5.1 O embasamento teórico**

Para a realização desse projeto, houve um embasamento teórico de conceitos básico de física atmosférica e de técnica fractal, assim como de recursos computacionais que seriam utilizados.

### **1.5.2 Escolha de ferramentas de apoio**

Nesta etapa, houve a escolha de ferramentas computacionais para o auxílio do projeto. Essas ferramentas foram os programas Harfa e Point que foram instalados em ambiente **MS-Windows**, mas por meio de pesquisas pode-se constatar que é possível seu funcionamento em ambiente **Linux**.

### **1.5.3 Aquisição dos dados a serem analisados**

A aquisição dos dados está em fase de andamento. Nesse primeiro momento, foram utilizada imagens do acervo do projeto para teste, e em segunda fase do projeto, novas imagens serão adquiridas através da captura de imagens gravadas em **VHS**.

### **1.5.4 Resultados obtidos**

Os resultados que puderam ser obtidos mostraram-se coerentes com a literatura especializada em dimensão fractal. Porém, as pesquisas continuam, com o objetivo de aprimorar os resultados já obtidos.

### **1.5.5 Conclusões**

O aprimoramento teórico e computacional forneceram a estudante conhecimentos diferenciados que podem ser utilizados em diversas áreas profissionais. O estudo da metodologia de iniciação científica, assim como a responsabilidade do projeto desenvolveram na estudante maior auto-confiança e sentimento de trabalho em equipe.

## **1.6 Etapas do projeto realizadas**

- Estudo e fundamentação na física do relâmpago;
- Apresentação e estudo da Técnica Fractal, que será utilizada para as análises;
- Escolha de softwares que possam atender às necessidades do projeto;

- Realização de testes dos software com imagens do acervo do projeto.

## 1.7 Atividades em desenvolvimento

- Estudos dos software escolhidos e possíveis trocas dos mesmos por outros de maior eficácia;
- Análise fractal das imagens com o objetivo de validar suas informações.

## 1.8 Resultados esperados

Desenvolvimento e aprimoramento da técnica fractal, com o objetivo de medir a dimensão dos relâmpagos com maior precisão.

## 1.9 Cronograma 2001-2002

2001-2002												
Etapa	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
1				•	•	•	•					
2					•	•	•					
3						•	•					
4							•	•				
5								•	•			
6										•	•	
7											•	•

Tabela 1.1: Cronograma das etapas do trabalho

Etapas do Projeto de Análise Fractal:

1. Fundamentação;
2. Apresentação e estudo da técnica fractal;

3. Escolha de softwares para auxiliar o projeto;
4. Realização de testes com os softwares para aprovação dentro do projeto;
5. Utilização dos softwares juntamente com os conceitos para efetuar as análises;
6. Validação e Resultados;
7. Conclusões e Relatórios.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS  
(Versão Preliminar / Distribuição Restrita)

Análise de Imagens de Relâmpagos por meio de Técnica Fractal

ANA PAULA SANTOS NOVAES

Iniciação Científica em Ciência Espacial/Geofísica Espacial,  
orientada pelo Dr. Odím Mendes Júnior.

PIBIC - DGE/CEA/INPE

São José dos Campos

janeiro,2002

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>As Propriedades Elétricas da Matéria . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1.1	Cargas Elétricas . . . . .	3
2.1.2	Lei de Coulomb . . . . .	4
2.1.3	Campo Elétrico . . . . .	5
2.1.4	Linhas de Campo Elétrico . . . . .	8
2.1.5	Características Elétricas da Matéria . . . . .	9
<b>2.2</b>	<b>O Fenômeno Relâmpago . . . . .</b>	<b>10</b>
2.2.1	A Atmosfera . . . . .	10
2.2.2	Nuvens de tempestade . . . . .	12
2.2.3	O Relâmpago . . . . .	13
2.2.4	Líder escalonado ou canal de relâmpago . . . . .	15
<b>2.3</b>	<b>A Teoria Fractal . . . . .</b>	<b>16</b>
2.3.1	Dimensão Fractal . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Recursos disponíveis para análise</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Harfa . . . . .</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Point . . . . .</b>	<b>25</b>

<b>4 Resultados obtidos</b>	<b>26</b>
4.1 Resultados do Harfa . . . . .	26
4.2 Resultados do Point . . . . .	26
<b>5 Conclusões Preliminares</b>	<b>31</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>32</b>
<b>A O Harfa passo a passo</b>	<b>34</b>

# Lista de Figuras

2.1	Exemplo de atração e repulsão . . . . .	4
2.2	Esfera condutora . . . . .	6
2.3	Distribuição contínua de cargas . . . . .	7
2.4	Linhas de campo elétrico . . . . .	8
2.5	Camadas da atmosfera . . . . .	11
2.6	Estágio de uma nuvem Cumulonimbus . . . . .	13
2.7	Etapas de um relâmpagos . . . . .	15
2.8	Contagem de caixas . . . . .	19
2.9	Contagem de caixas . . . . .	20
2.10	Divisão pelo método da salsicha . . . . .	23
4.1	Figura analisada pelo Harfa . . . . .	27
4.2	Resultado da figura . . . . .	28
4.3	Relâmpago analisado pelo Harfa . . . . .	28
4.4	Resultado da figura . . . . .	29
A.1	Interface do Harfa . . . . .	35
A.2	Figura analisada . . . . .	36
A.3	Resultado da separação de cores . . . . .	37
A.4	Janela de opções do Harfa . . . . .	38

A.5	Separação de pixels . . . . .	39
A.6	Resultado gráfico da análise fractal . . . . .	39
A.7	Relâmpago utilizado na análise . . . . .	40
A.8	Separação de cores . . . . .	41
A.9	Janela de opções . . . . .	42
A.10	Resultado gráfico de análise fractal . . . . .	42

# Lista de Tabelas

4.1 Pares ordenados demarcados de um relâmpago com auxílio do Point . . . . .	30
---	----

## **Resumo**

Os relâmpagos estão sendo muito estudados nos dias atuais. Isso se deve ao fato de haver necessidade de prevenir alguns de seus males ao meio ambiente, assim como aumentar o **conhecimento** do homem sobre o assunto. Pra isso, contamos com o estudo das propriedades **elétricas da matéria**, na qual será dado um maior embasamento para que o fenômeno possa ser estudado melhor. Pode ser visto com mais detalhes todas as propriedades físicas que atuam nos relâmpagos, desde a formação das nuvens, a precipitação das mesmas e as descargas **elétricas**, que são denominadas de relâmpagos. Para analisar as descargas, foi empregado a **Técnica Fractal**, que pode determinar a dimensão das descargas, por meio de ferramenta computacionais como os programas Harfa e Point.

# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos, facilitado pelos avanços tecnológicos, o estudo de fenômenos atmosféricos vem aumentando devido à necessidade de prevenir supostos desastres que poderiam causar mal ao homem, e perturbações ao meio ambiente. Um desses fenômenos que são estudados com maior extensão e profundidade na atualidade são os relâmpagos. Eles causam fascínio e medo na humanidade desde a antiguidade, sendo que vários estudiosos já se deixaram levar por sua beleza e seu mistério, empenhando em seu entendimento (MacGorman e Rust, 1998). A descoberta e o estudo de partículas ínfimas da matéria que possuem cargas elétricas— os prótons e os elétrons— possibilitaram uma compreensão fundamental da eletricidade atmosférica e sobre o que forma um relâmpago (Alonso e Finn, 1972).

Considerando o assunto descargas elétricas atmosféricas, uma abordagem muito interessante de pesquisa é das morfologias descargas. Essa análise deve propiciar a identificação de características que se esperam associadas à física da descarga.

Nos dias atuais, conta-se com ferramentas mais específicas e de maior precisão para efetuar tais estudos. Essas ferramentas são variadas, sendo que uma dessas, que ainda é pouco utilizada, é o Técnica Fractal, que permite medir, com uma maior objetividade aspectos relacionados a essa morfologia como ramificação e tortuosidade da descarga.

Pode-se contar também com o auxílio de computadores pessoais e programas, que foram evoluindo com o passar das décadas e que tornam viáveis a solução de problemas que seriam mais demorados e complicados sem o seu uso.

O objetivo desse trabalho é implementar uma metodologia de análise por Técnica Fractal das descargas elétricas atmosféricas e permitir, assim, análise relacionada à tortuosidade e ramificação do canal.

**Este trabalho desenvolve-se seguindo as etapas seguintes:**

No capítulo 2, para embasamento físico do problema, apresentam-se considerações sobre a natureza elétrica da matéria; uma revisão sobre relâmpagos; e uma descrição básica sobre os fractais.

No capítulo 3, dão-se exemplos dos objetos de estudo (isto é, os dados de estudo), apresentam-se as ferramentas de análise e descrevem-se as metodologias de análises.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados das análises e discussões dos resultados que serão realizadas em etapas seguintes.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões preliminares do trabalho, que se tornarão válidas e concretas na etapa seguinte da realização desse trabalho.

## Capítulo 2

# CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O estudo de relâmpagos requer embasamento teórico e treino em ferramentas **que devem** ser utilizadas. Para o embasamento teórico, apresentam-se os aspectos principais **sobre** são o **campo elétrico** e suas propriedades (Serway, 1996), que servirão de base para o entendimento **da eletrodinâmica atmosférica**, já que a atmosfera possui natureza elétrica intrínseca e, como se sabe, os relâmpagos constituem-se de cargas elétricas em sua ocorrência (Saba, 1997).

Também serão apresentados aspectos da teoria fractal, que será utilizada como ferramenta **no estudo** da tortuosidade e das ramificações das descargas, permitindo dar objetividade a **análise**.

## 2.1 As Propriedades Elétricas da Matéria

### 2.1.1 Cargas Elétricas

A matéria constitui-se de partículas eletricamente carregadas. Essas partículas foram chamadas de elétrons - que possuem cargas negativas, simbolizada pela letra  $e$ , que possui uma massa de valor  $9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , e carga elétrica de  $-1.6021917 \times 10^{-19}$ ; os prótons, que possuem cargas positivas simbolizada pela letra  $p$ , possuindo uma massa de  $1.67261 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , e **carga** elétrica de  $+1.6021917 \times 10^{-19}$ ; sendo que os nêutrons, não possuem cargas, mas **massa** de  $1.67492 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . A descoberta destas partículas se deu após várias experiências realizadas, por cientistas que chegaram a conclusão sobre essas propriedades da matéria. Um

exemplo clássico que pode ser mostrado é a fricção de um bastão de vidro em tecido tipo seda, onde há a geração de um pequeno campo elétrico, capaz de atrair pequenos corpos, como pedaços de papel, por exemplo, pois se houvesse necessidade de atração de corpos maiores, teria que gerar um campo mais potente (Serway, 1996). Na figura 2.1, pode-se exemplificar um caso como o acima mencionado, em que são utilizados bastões de borracha e vidro, mostrando a atração de um bastão de borracha, que possui carga negativa, por um bastão de vidro, que possui carga positiva, e mostra também um bastão de borracha com carga negativa, sendo repelido por outro bastão de borracha também com carga negativa.

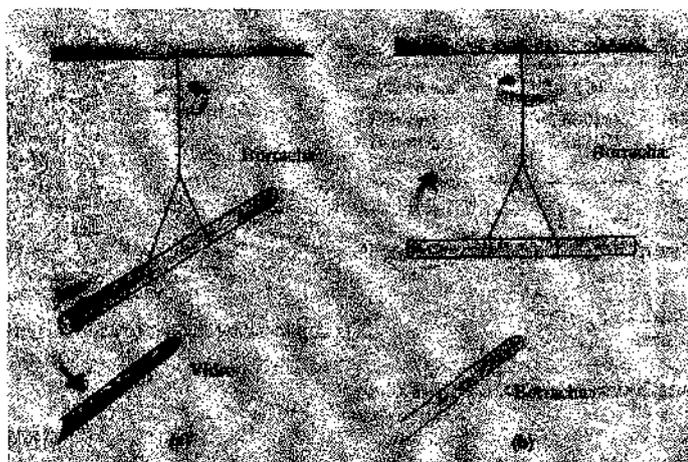


Figura 2.1: Exemplo de atração e repulsão.

FONTE: Serway (1996)

As carga mencionadas acima atraem-se quando possuem sinais opostos e repelem-se quando possuem sinais iguais. A carga não é criada no universo, ela já existe em diversos corpos, e podendo apenas ser transferida de um corpo a outro. Por meio de vários métodos, que não serão vistos agora, pode-se demonstrar que ela se conserva.

### 2.1.2 Lei de Coulomb

Entre duas partículas eletricamente carregadas existem forças inter-atuantes. Um pesquisador chamado *Coulomb* estudou como são essas forças e estabeleceu uma lei para sua atuação. **Essa lei ficou conhecida como *Lei de Coulomb* e que é muito usada em cargas puntiformes. Esta lei estabelece que:**

- A força é inversamente proporcional ao quadrado da separação espacial,  $r$ , entre uma partícula e outra e atua ao longo da reta que as une;
- A força é proporcional ao produto das cargas  $q_1$  e  $q_2$ ;
- A força é atrativa se as cargas tiverem sinais opostos e repulsivas se tiverem mesmo sinal.

Com base nesta lei, a força de Coulomb é formulada como:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}, \quad (2.1)$$

em que  $\epsilon_0 = 8.5442 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$

### 2.1.3 Campo Elétrico

Uma carga faz atuar sobre uma carga de prova qualquer, em um ponto do espaço, há atuando sobre este ponto, uma força elétrica. Ao agente físico nessa região do espaço ao redor da carga de prova, dá-se o nome de Campo elétrico, indicado pela letra  $E$  que é de natureza vetorial. A unidade de medida do vetor  $\vec{E}$  é o N/C (Newtons por Coulomb) O sentido da força  $\vec{F}$  no campo é de acordo com o sinal da carga ( $q$ ). Se  $q$  é positivo,  $\vec{F}$  tem o mesmo sinal do campo; se é negativo, possui sentido oposto ao do campo, e adireção é ao longo da linha que os une.

Para calcular o campo elétrico, é utilizada a fórmula:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (2.2)$$

Essa fórmula é utilizada para calcular um campo elétrico, atuando em uma carga de prova, admitindo que esta seja bem pequena de modo a não perturbar a distribuição de cargas em sua volta que é responsável pelo campo elétrico. Por exemplo, se uma prova de carga muito pequena  $q$  for colocada nas vizinhanças de uma esfera uniformemente carregada, como mostra a figura 2.2, a carga sobre a esfera metálica, que provoca o campo elétrico, permanecerá uniformemente distribuída.

Com o campo total dado pela equação:

$$\vec{E} \approx \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^3} \vec{r}_i \quad (2.6)$$

Se a separação entre os elementos de carga for pequena, a distribuição pode ser considerada contínua.

Então podemos adotar a equação que é a soma de Riemman, resultando na integral :

$$\equiv K \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^3} \vec{r}_i = K \int \frac{dq}{r^3} \vec{r} \quad (2.7)$$

O campo elétrico de uma distribuição contínua de cargas é a soma vetorial de todos os elementos de carga  $\Delta q$  da distribuição de cargas (Serway, 1996), que pode ser exemplificado pela figura 2.3.

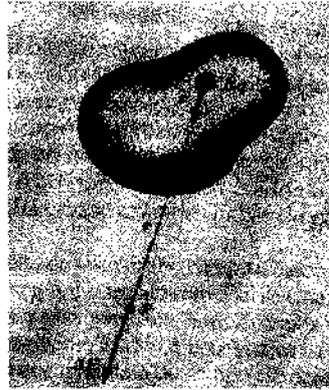


Figura 2.3: Distribuição contínua de cargas.

FONTE: Serway (1996)

Esta distribuição das cargas poderá estar sobre uma linha, uma superfície ou em um volume. Para efetuar os cálculos, será necessário utilizar o conceito de densidade de carga, usualmente convencionada como  $\rho$ . Se o caso for uma linha de comprimento, então sua densidade será:

$$\rho = \frac{Q}{l} \quad (2.8)$$

Se for uma superfície, será dado por:

$$\rho = \frac{Q}{A} \quad (2.9)$$

E por fim, se tivermos um volume, a densidade será:

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (2.10)$$

### 2.1.4 Linhas de Campo Elétrico

Linhas de campo elétrico são uma abstração que auxilia, na forma de diagramas, a visualização da configuração de um campo elétrico. A sua construção possui todo um padrão, que corresponde ao tipo de campo e do sinal da carga deste campo. É constituído por linhas, que apontam na mesma direção do campo elétrico (Serway, 1996). A figura 2.4 pode mostrar o exemplo de linhas de campo elétrico de uma carga puntiforme.

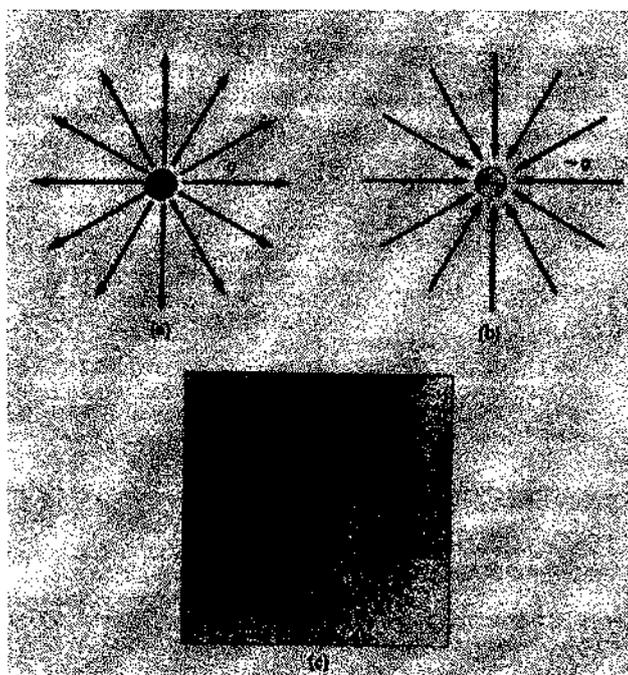


Figura 2.4: Linhas de campo elétrico

FONTE: Serway (1996)

- As linhas partem das cargas positivas, e terminam em cargas negativas,
- O número de linhas que saem de uma carga positiva ou que chegam em uma carga negativa, é proporcional ao módulo da carga;

- Não há cruzamento de linhas de campo.
- **O campo é contínuo, existindo em todas as distâncias.**

Este modo de visualizar serve para ilustrar como seria um campo elétrico, já que sua construção seria bem mais detalhada.

### 2.1.5 Características Elétricas da Matéria

A matéria, em geral, pode ser condutora de eletricidade ou não. De acordo com essas propriedades, os materiais podem ser classificados em condutores, isolantes e dielétricos (Serway, 1996).

Os materiais condutores são aqueles que conduzem bem a energia elétrica. Alguns exemplos de materiais condutores: água com sais, cobre, e a maioria dos metais que encontramos na natureza. Já os materiais que são isolantes, não conduzem energia elétrica. Alguns exemplos que se pode citar são a cortiça, a madeira, a goma-laca, o vidro, entre outros.

Em meio a esses dois tipos de materiais, encontra-se, os dielétricos, que constituem uma terceira classe de materiais, eles não são bons condutores, mas também não isolam completamente.

Essas propriedades da matéria pode ser aplicado na atmosfera. O ar que está presente na atmosfera pode ser considerado um meio condutor de eletricidade sendo assim um condutor. É através do ar que as partículas carregadas eletricamente (tanto partículas positivas quanto as negativas) são transportadas da nuvem para o solo e vice-versa, de uma nuvem para outra, e até dentro da própria nuvem.

O ar é também responsável pela separação de cargas dentro de uma nuvem, colocando as positivas no topo e as negativas na parte baixa.

Outra matéria presente na atmosfera que possui propriedade elétrica condutora é a água, tanto em forma líquida quanto na forma congelada contribuindo para a eletrodinâmica atmosférica.

Pode-se dizer que na água é que ficam armazenada as partículas carregadas eletricamente transportadas e separadas pelo ar.

## 2.2 O Fenômeno Relâmpago

### 2.2.1 A Atmosfera

A atmosfera terrestre, em termos de temperatura, é formada por quatro camadas distintas (Richard e Walker, 1975). Cada uma possui uma propriedade e um modo de se comportar, que será visto a seguir.

- **TROPOSFERA:** é camada inferior da atmosfera; sua temperatura cresce cerca de  $6.5^{\circ}\text{C}$  por km; possui uma espessura média de 12km de altura, nos pólos este valor fica reduzido a 9km e na linha do equador aumenta para 16km. É na troposfera que ocorre a formação de nuvens de precipitação.
- **ESTRATOSFERA:** é a parte da atmosfera em que a temperatura se mantém constante por cerca de 20km acima da troposfera, e aumenta após esta distância, até uma altura de 50Km. Nesta região, há absorção de raios ultravioletas pelo ozônio, o que causa o aquecimento da Terra.
- **MESOSFERA:** é a parte da atmosfera em que a temperatura volta a diminuir cerca de 50km a 90km de altitude.
- **TERMOSFERA:** é a região da atmosfera em que a temperatura volta novamente a aumentar. Esta camada encontra-se a partir de 90km de altitude. O aumento da temperatura resulta da absorção da radiação solar por átomos de oxigênio e nitrogênio. A figura 2.5 mostra as três divisões da atmosfera.

Quanto à propriedade elétrica, existem dois tipos de atmosfera: a quase neutra, que é pouco ionizada, e a ionosfera (altitude 70km) que possui alta densidade elétrica, já que, experimentalmente comprova-se que, a atmosfera possui em sua formação, partículas eletricamente carregadas.

Existem várias maneiras da atmosfera se tornar ionizada. Um tipo de ionização que é conhecido é a ionização por materiais radioativos, que ionizam a atmosfera próxima ao solo, pois estes materiais liberam raios betas e gama. Já acima do solo, nos primeiros 100m, o gás radônio emitindo partículas alfa constitui a principal fonte ionizadora do ar. Outra fonte de

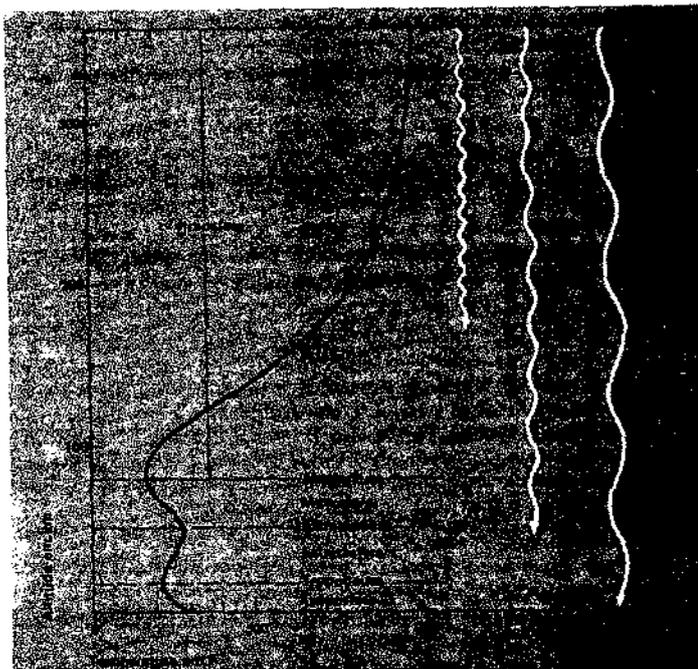


Figura 2.5: Camadas da atmosfera

FONTE: Goody e Walker (1975)

ionização considerável é realizada pelos raios cósmicos galácteos, cuja ionização é máxima em torno de 15km de altura.

Esses fatores contribuem para manter um campo elétrico ao redor da Terra.

Dizemos que o campo elétrico é de tempo bom quando não há perturbação em sua direção, que é **vertical**, ou seja, quando não há interferência gerada pela eletrificação das nuvens de **tempestade** (Saba, 1997).

Foram desenvolvidas várias teses a respeito da condutividade da atmosfera, e uma destas hipóteses representa a ionosfera (Fronteira Superior), a atmosfera (meio dielétrico) e a superfície da Terra (Fronteira Superior) como um enorme capacitor elétrico. As tempestades seriam os geradores que forneceriam corrente elétrica suficiente para manter as cargas elétricas nessas superfícies e, esse é o campo elétrico atmosférico vertical.

### 2.2.2 Nuvens de tempestade

As nuvens são formadas por gotículas de água e gelo, que estão suspensas na atmosfera. Elas distinguem-se entre si pelo seu tamanho, pela sua grande extensão vertical e por apresentarem fortes correntes verticais de ar. Podem também ser de dois tipos: isoladas, também conhecidas como locais ou convectivas que formam tempestades organizadas sendo estas mais intensas, como por exemplo os sistemas convectivos de meso-escala.

Dentro dessas nuvens existem cargas elétricas assim como na atmosfera.

De estudos realizados, verifica-se que na parte superior de uma nuvem estão as cargas positivas e na parte inferior estão situadas as negativas.

O transporte destas partículas dentro da nuvem é feito por correntes de ar. Há ainda um terceiro centro de cargas abaixo do centro negativo, ainda que pouco estudado, mas provavelmente criado a partir da captura de íons do ar ascendente pela nuvem.

Esses três centros formam uma estrutura tripolar, caracterizando a distribuição básica das cargas dentro da nuvem.

Por mecanismos de convecção e precipitação, uma nuvem de cumulonimbos (ou de tempestade) faz a separação de cargas e altera o campo elétrico de tempo bom. Esse tipo de nuvem possui três estágios diferentes de formação e evolução, que são:

- Estágio cúmulos: é o estágio de crescimento da nuvem, que é ocasionado por suprimento de ar úmido;
- Estágio maduro: estágio onde as gotas de água já estão bastante grandes e pesadas e a corrente ascendente que existe já não conseguem mais suportar o peso, havendo assim a precipitação;
- Estágio dissipativo: há a dissipação da nuvem decorrida da ocorrência de correntes ascendentes e ventos para baixo. A figura 2.6 mostra os estágios de uma nuvem cumulonimbos.

A figura 2.6 mostra os estágios de uma nuvem Cumulonimbos.

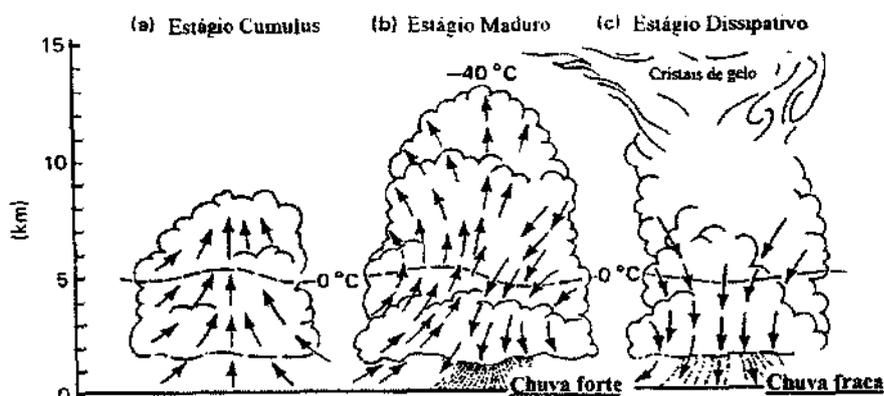


Figura 2.6: Estágio de uma nuvem Cumulonimbus.

FONTE: Lutgens e Tarbuck (1982)

O estágio maduro de um cumulonimbus pode ser considerado seu período de maior atividade, onde costuma ocorrer o fenômeno do relâmpago. Um relâmpago geralmente surge de uma nuvem do tipo cumulonimbus, porém o relâmpago pode originar-se de outros mecanismos de separação de cargas, tais como tempestades de areia, tempestade de neve e explosões nucleares (Saba, 1997)

### 2.2.3 O Relâmpago

Relâmpago é a descarga elétrica originada, em geral, nas nuvens Cumulonimbus, neutralizando cargas elétricas acumuladas, que podem ser positivas e negativas. Já as descargas possuem três tipos de polaridades: positiva, negativa e bipolar. A ocorrência do relâmpago se dá quando o campo elétrico dentro da nuvem se torna tão intenso que quebra a rigidez dielétrica do ar, que é de aproximadamente 400km/V. Este campo elétrico é gerado pela presença de cargas positivas e negativas dentro da nuvem (Gin, 1992).

Existem vários tipos de relâmpagos: nuvem-solo, solo-nuvem, intranuvem, relâmpagos de nuvem de tempestade para cima, e ainda outros tipos com menos importância como relâmpago fita, o tipo cadeia e o tipo bola. O relâmpago nuvem-solo é mais enfatizado, pelo perigo que oferece.

Este ainda pode ser positivo, negativo e bipolar. Os relâmpagos positivos foram considerados mais raros, embora pesquisas recentes mostrem que não são tão raros assim. Fatores como altitude das cargas positivas próximas ao topo das nuvens e a variação da velocidade dos ventos horizontais com a altura podem influenciar em sua ocorrência.

Este tipo de relâmpago transfere cargas positivas próxima ao topo da nuvem para o solo. Eles são os mais associados a incêndios em florestas, conforme estudos realizados por pesquisadores dos EUA. Os relâmpagos descendentes negativos transferem cargas negativas da região de cargas negativas dentro da nuvem para o solo. A maioria dos relâmpagos nuvem-solo, cerca de 90%, é negativa. E, por fim, temos os bipolares, que transferem cargas de ambos sinais para o solo e originam-se em regiões de separação de cargas dentro da nuvem.

Um relâmpago, ao ocorrer, apresenta etapas (Saba, 1997) distintas, descritas a seguir. Em primeiro lugar, parece ocorrer uma pré-descarga localizada, não necessariamente visualizável, e surge o canal da descarga, que é denominado de líder escalonado. Ele é pouco perceptível a olho nu, sendo que às vezes, nem chega a ser percebido. É um canal ionizado, que procura o melhor caminho para descarregar suas partículas elétricas. Geralmente se dirige em direção ao solo, possui um movimento tortuoso e é através dele que irão ocorrer outras várias descargas, utilizando seu canal. Possui fraca intensidade luminosa.

Em seguida, próxima a superfície (aproximadamente 100 metros) há uma intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e um ponto do solo. Essa intensificação dá origem à descarga conectante. Esta descarga parte de algum objeto do solo (ex: árvore) e segue em direção ao líder escalonado. Quando esta descarga conecta-se ao líder escalonado, cria-se um pulso de sinal elétrico, transforma-se em uma descarga forte e com intensa luminosidade, que é denominada de descarga de retorno. Pode-se dizer que em média ocorrem três descargas de retorno por relâmpago. Após a descarga de retorno inicial, a seguir a um intervalo de tempo (valor típico de 40 microssegundos), pode ocorrer uma outra descarga que, em geral, não se caracteriza por ramificação.

Essa descarga é denominada de líder contínuo. Ela pode repetir-se após pequeno intervalo de tempo (em geral, menor que 500 microssegundos). Sobrepostas a elas, outras descargas podem caracterizar-se, mas que são de menor intensidade. A figura 2.7 mostra as várias etapas de um relâmpago. Então podemos concluir que ocorrem  $n$  descargas até que todas as cargas

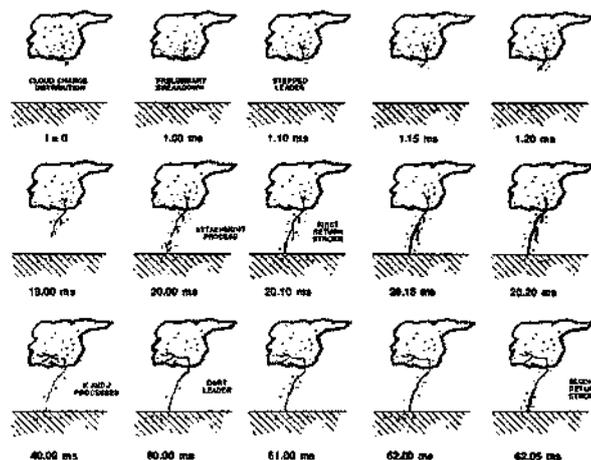


Figura 2.7: Etapas de um relâmpago.

FONTE: Uman (1987)

negativas ou positivas, dependendo do tipo da descarga, sejam extraídas da nuvem.

Em nosso estudo, daremos mais ênfase ao líder escalonado ou canal, que é de nosso maior interesse. Ele é a descarga inicial, e como geralmente não pode ser visto a olho nu, pode ser fotografado e filmado para que seja estudado, por câmeras especiais. O canal também estabelece o trajeto que o relâmpago irá realizar.

#### 2.2.4 Líder escalonado ou canal de relâmpago

Tem-se por definição que o líder escalonado ocorre em passos através do ar, em um trajeto irregular, ao longo do qual, em geral, ocorrem as descargas de relâmpago (Uman, 1987).

Quando começa o processo do relâmpago, consequência da ruptura dielétrica dentro da nuvem, devido a separação e acúmulo de cargas, uma série de elétrons é deslocado para a base da nuvem, depois para o ar circundante e então para o solo. Assim que os elétrons saem da nuvem, colidem com moléculas de ar, que a ionizam e produzem um canal condutor, facilitando o trajeto para outros elétrons.

Esse líder escalonado é muito indistinto e geralmente não é visível a olho nu. Assim que a ponta do líder escalonado aproxima-se do solo, uma corrente de carga contária emerge de um

ponto no solo e encontram-se com o líder escalonado. Com esse encontro, um número maior de descargas dirige-se para o solo, já associado a maior luminosidade e maior intensidade de corrente elétrica, estas descargas são chamadas de descargas de retorno, que produz a maioria da luz que vemos em um relâmpago.

Estas etapas são muito rápidas, ocorrendo em intervalos de dezenas de milésimos de segundos, e por isso não são resolvidas a olho nu. Em seguida, pode ocorrer o processo de líder contínuo, que são as demais descargas que ocorrem utilizando o mesmo canal ionizado inicial. O líder contínuo é vagamente perceptível a olho nu, pois vemos alguns raios de luz a mais.

Ao longo do caminho do líder escalonado, algumas cargas seguem novos caminhos devido à influência de cargas na atmosfera ao redor do canal, formando as ramificações que são vistas em relâmpagos. Os ramos do canal que não conectam ao solo, normalmente, não são tão brilhante quanto aquela parte do canal abaixo do ponto de junção com a ramificação. Isto se deve ao fato de que menos elétrons passam através deles do que através do canal.

Geralmente, em um mesmo canal de relâmpago ocorrem demais descargas repetidamente. À medida que as cargas do líder propagam-se ao longo do canal rumo ao solo, variações do campo elétrico e também magnético são produzidas.

Ao todo, um líder escalonado transporta 10 ou mais Coulombs de carga e alcança um ponto perto do solo em dezenas de milissegundos, dependendo da tortuosidade de seu caminho. A corrente média do líder escalonado é cerca de 1 kA e é transportada em um núcleo central do canal com alguns centímetros de diâmetro.

As cores de um relâmpago podem variar de acordo com o estado da atmosfera, podendo, além da cor branca, ser amarelo, roxo, laranja ou mesmo verde. A tortuosidade e ramificação apresentadas no canal ionizado da descarga, são o objeto de estudo desse trabalho, pois essas características associam-se ainda de uma forma não bem explorada, às características eletrodinâmicas da atmosfera.

## 2.3 A Teoria Fractal

Usualmente, depara-se com uma geometria que trabalha com formas regulares, que possuem dimensões definidas e inteiras. Tal geometria é chamada de Euclidiana, pois foi estudada

e formulada por Euclides. Na geometria Euclidiana, um ponto possui dimensão zero, uma reta tem dimensão um e um plano, que contém dois eixos como  $x$  e  $y$ , possui dimensão dois.

Mas pode-se observar, na natureza principalmente, não existem formas regulares, para as quais usava-se no cálculo a geometria tradicional. Essas formas naturais são fragmentadas, com perímetros irregulares.

Partindo dessas características, por meio de análises inovadoras, chegou-se novas abordagens na geometria, criando a Teoria Fractal.

A discussão sobre os fractais começou por volta de 1830. Desde essa época, estudiosos como matemáticos e outros cientistas, tentam explicar e entender o que são fractais. Dentre esses mestres, podemos citar Von Koch, Georg Cantor e Sierpinski. Von Koch criou em seus estudos a teoria do floco de neve, em que por meio de um segmento de reta, são construídos triângulos de modo que não exista uma tangente os tocando, mostrando que a divisão em perímetro é infinita. Georg Cantor (1845-1918) também formulou vários exemplos para explicar o conceito de fractal.

Exemplo que pode ser citado é a conhecida Poeira de Cantor, em que a partir de um segmento de reta, com dimensão igual a um, faz-se divisões, em três partes, retirando-se o terço médio, e prosseguindo assim com as partes restantes, surgindo no final a Poeira. Segundo Soares (2002) Cantor provou também em suas investigações que a reta  $R$  tem o mesmo cardinal que o plano  $R^2$ , colocando em causa o seu conceito de dimensão. Waclaw Sierpinski (1822-1969) desenvolveu duas estruturas fractais, o Carpete de Sierpinski e o Triângulo de Sierpinski. O Carpete de Sierpinski foi gerado dividindo-se um quadrado em 9 partes auto-similares e retirando o quadrado central, sendo que essa operação repete-se em cada um dos 8 quadrados restantes, tendendo ao infinito. O Triângulo de Sierpinski é dividido em quatro partes auto-similares formadas a partir do ponto médio de cada lado e com retirada do triângulo central. Repete-se essa operação em cada um dos triângulos restantes, tendendo o infinito.

Na época em conceitos foram formulados e publicados, esse conceitos não eram bem aceitos entre a comunidade científica, sendo que não foi dado muito crédito aos cientistas que os produziam. Porém com o passar do tempo, um pesquisador, que era pouco conhecido na época, fez ressurgir as teorias que falavam sobre "fractal". Na década de 70, este pesquisador, chamado Benoit Mandelbrot, definiu de uma forma mais ampla todas as hipóteses que haviam

sido formuladas anos atrás. Esse pesquisador passou a ser conhecido como pai dos fractais, sendo autor dos conceitos mais recentes sobre o assunto. Em seu livro, publicado sobre o assunto, ele começa com a seguinte citação: "Montanhas não são cones; Nuvens não são esferas; Os cães não latem regularmente; Nem os raios caem em linha reta". Essa forma de pensar abre todo um campo de investigações científicas de fenômeno aparentemente usuais.

### 2.3.1 Dimensão Fractal

#### Dimensão de Hausdorff

Como já foi visto anteriormente, dimensão Fractal pode ser caracterizada como uma dimensão de objetos que possuem formas irregulares e atendem a propriedade científica.

Para entender melhor este conceito, pode-se utilizar o teorema formulado pelo alemão Felix Hausdorff (1918) que definiu melhor dimensão fractal. Para maior entendimento, considera-se o seguinte enunciado: dado um conjunto  $A$  composto por vários pontos, que está contido em um espaço  $p$ , recoberto por cubos que possuem lados  $\epsilon$  define-se a Dimensão de Hausdorff ou Dimensão Fractal como:

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(\frac{1}{\epsilon})} \quad (2.11)$$

Essa expressão é utilizada tanto em cálculos de dimensão inteiras como para cálculo de conjuntos mais complexos, como é o caso dos fractais. Pode-se definir  $N$  como o número mínimo de hiper-cubos ( caixas ) de lados  $\epsilon$  que são necessário para cobrir todo o conjunto de pontos  $A$ .

Esses híper-cubos podem ser utilizados para cobrir um segmento de reta ou um plano. Se o tamanho da caixa for igual a  $\epsilon = 1$ ; o número de caixas que serão necessárias para cobrir o segmento será  $N(\epsilon) = 1$ ; se  $\epsilon = \frac{1}{2}$ ;  $N(\epsilon) = 2$ , e assim por diante. A figura 2.8 mostra o processo de contagem de caixas.

Este método para cálculo também pode ser empregado em superfícies planas, mas neste caso, para obter um valor correto para  $D_0$ ,  $\epsilon \rightarrow 0$ . A figura 2.9 a seguir exemplifica esse caso.

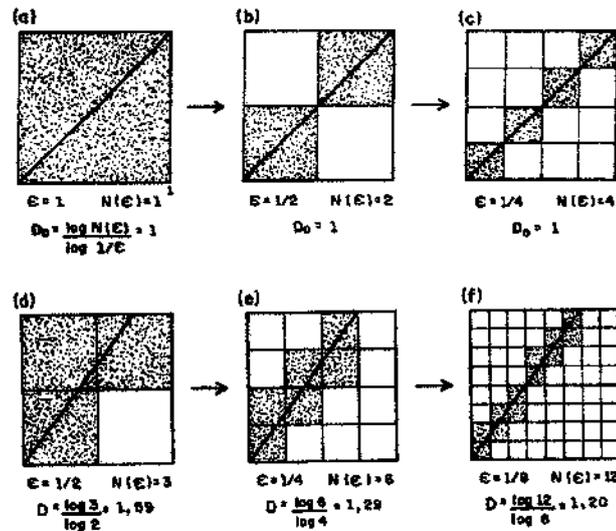


Figura 2.8: Contagem de caixas aplicada a um segmento de reta.

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

Os termos dimensão fractal, dimensão de Hausdorff e capacidade equivalem à mesma idéia sobre os fractais. Os cálculos de dimensão fractal são feitos, em geral, por algoritmos (instruções para execução de uma tarefa) e fazem o uso direto da definição de contagem de caixas. Os microcomputadores pessoais, atualmente poderosos e rápidos viabilizam as tarefas de cálculos.

Para que os cálculos realizados com algoritmos obtenham sucesso, é necessário que os algoritmos empregados sejam de plena eficácia. Mas mesmo com os melhores algoritmos existentes, o cálculo de dimensão fractal não pode ser efetuado em dimensões maiores que dois, utilizando o método de contagem de caixas, devido a diversos fatores, não discutidos aqui (Ferrara e Prado, 1995). Neste caso outros métodos são empregados como o Método dos Vizinhos Próximos, em que nos algoritmos de contagem de caixas o volume é mantido fixo (tamanho da caixa) e então se analisa como a densidade (número de pontos) em cada caixa varia ao longo do atrator (região ao redor do limite do fractal onde há presença de pixel). Em seguida o atrator também é coberto por caixas que são definidas para conter o mesmo número de pontos. Então a dimensão fractal é obtida pelo estudo da variação do raio dos aglomerados ao longo do atrator (Ferrara e Prado, 1995).

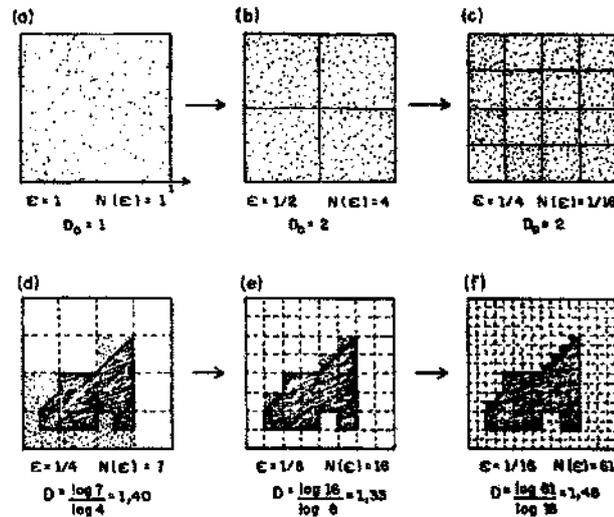


Figura 2.9: Contagem de caixas aplicada a uma superfície plana.

FONTE: (Ferrara e Prado, 1995)

Pode-se identificar também outro tipo de fractal, os denominados Fractais Gordos, que constituem uma outra classe de fractais cujo estudo é difícil se forem utilizados apenas as definições de dimensão fractal.

Estes fractais possuem medida positiva e dimensão fractal inteira. A consequência é que o conceito de dimensão fractal mais utilizado não os distingue dos não fractais. Um exemplo de Fractal Gordo pode ser obtido através de uma versão modificada do Conjunto de Cantor (Ferrara e Prado, 1995). Tal conjunto tem dimensão de Hausdorff igual a 1, mas é diferente de um segmento de reta. Como equivale a um conjunto de Cantor usual, é considerado um fractal.

Dentre essas dimensões pode-se citar as dimensões generalizadas, em que a escala do fractal varia com a medida irregular, possuindo assim regiões mais densas. No caso destes fractais, o conceito de Dimensão de Hausdorff não é empregado, pois não consegue ser suficiente para analisar esta estrutura que é mais complexa (Ferrara e Prado, 1995). Ainda dentro do conceito de dimensão fractal, pode-se citar as descobertas de Spadotto et al. (1997), para determinar a dimensão fractal e também a dimensão inteira, facilitando a didática de cálculo da dimensão. Nesse caso, admite-se a existência de grandezas dimensionais denominadas de aparentes, para

diferenciar das já estabelecidas pela física tradicional. Assim, uma aplicação de uma nova terminologia levaria a conceituar uma massa aparente sobre um volume aparente originando uma densidade aparente. Spadotto et al. (1997) contribuíram também com a divulgação de aplicações de fractais, quando definiram unidade fractal (UF) e matriz fractal (MF) e uma fórmula genérica para determinar a dimensão fractal.

No trabalho realizado por Spadotto e Seraphin (1997) enfatizou-se que a dimensão fractal pode ser determinada pela fórmula genérica  $D = \frac{TODO}{PARTE}$  ou  $D = \frac{MF}{UF}$ , ou seja, uma relação do todo com uma parte de um sistema fractal. A partir da fórmula genérica, desenvolveu-se a expressão a seguir :

$$D = \frac{\log V_2}{\log M}, \quad (2.12)$$

em que:

- $D$  = dimensão fractal sem unidade de medida.
- $V_2$  = quantidade qualquer no fractal formado
- $M$  = quantidade qualquer no gerador do fractal
- $b = 1$ , quando se determina a partir de uma reta; 2, quando a dimensão é determinada a partir de um plano; 3, quando é determinada a partir de um volume.
- $d_2$  = densidade aparente

Segundo Spadotto e Seraphin (1997), pode-se determinar a dimensão fractal, sem que os modelos utilizados tenham que ser transformados em euclidianos ou inteiros. Essa fórmula pode ser empregada em cálculo de modelos de fractais clássicos, sendo necessário apenas alguns ajustes, que já foram desenvolvidos por pesquisadores, mostrando que os resultados obtidos estão de acordo com a literatura especializada.

### Dimensão pelo Método de Divisão Escalar

O método de cálculo de dimensão pelo divisor escalar 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 a 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

$$L(r) = cr^{1-D} \quad (2.13)$$

ou

$$\log L(r) = \log C + (1 - D) \log r, \quad (2.14)$$

em que  $D$  é a dimensão do fractal calculado. O dimensionamento que deve ser entendido para que seja possível reescrever a equação como:

$$l r = \left( \frac{r}{r_0^{1-D}} \right), \quad (2.15)$$

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  $(r_1, l(r_1))$  e aplicando no dobro do logaritmo, obtendo assim uma linha regressiva. A inclinação de  $D$  também é estimada.

### Dimensão Calculada pelo Método da "Salsicha"

O método da "salsicha" é considerado próprio para a análise de imagens em que são utilizadas o método das caixas. Na estrutura a ser analisada é aplicado um teste padrão de pixel, em que a estrutura é ampliada pela dilatação de discos, cujos raios aumentam em cada estágio, isto é, em cada ponto do molde é feito um exame com o centro do disco de pixel.

Em cada etapa o número,  $n_r$ , de pixel do presente método é anotado e os pontos  $(r, n_r)$  são traçados na função logarítmica. Admite-se que  $b$  seja a inclinação da linha de regressão resultante, em que a dimensão pode ser dada por:  $\hat{D} = 2 - b$ .

Pelo fato que os discos digitais de quadriculação não podem ser apresentados exatamente, é útil descrever algo aproximação do disco em que se torna razoável utilizar os discos aproximados que são sugeridos pelos analisadores de imagem.

$$r = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}, \quad (2.16)$$

em que  $A$  é a área da figura correspondente do pixel. Para a figuras 2.10, os raios  $\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ ,  $\left(\frac{4}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ ,  $\left(\frac{9}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ , e  $\left(\frac{12}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$  são expressados como múltiplos da distância do pixel. Para sistemas de curvas pode ser considerado um sistema de correção de curvas em que para cada extremidade da curva o valor  $\alpha_r \left(\frac{1}{4\pi}\right)^{\left(1 - \alpha\right)}$  da área da estrutura tem que ser subtraído quando o raio  $r$  é dilatado. Aqui,  $\alpha$  é uma estimativa da aproximação da dimensão fractal desconhecida. Se o limite investigado consistir em limites de partículas, então o limite 8 interno deve ser construído e analisado. Os testes em fractal matemático dados em uma quadriculação mostram que os resultados aceitáveis podem ser obtidos se tamanhos de discos de 5 – 10 fossem utilizados. As dimensões teóricas são estimadas aproximadamente em 1.5 e os melhores resultados podem ser obtidos se o método dado em (5) for usado assim como o valor mais frequente, a modalidade, e o algoritmo para computar a dimensão de imagens binárias pelo método da "salsicha".

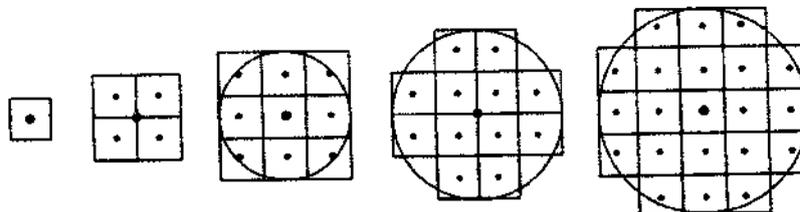


Figura 2.10: Divisão pelo método da salsicha.

FONTE: Stoyan e Stoyan (1994)

## Capítulo 3

# Recursos disponíveis para análise

A análise do fenômeno será feita com o auxílio de algumas ferramentas computacionais, que são capazes de realizar a análise fractal com uma certa precisão. Nesta primeira etapa da pesquisa pode-se contar com dois programas computacionais, que estão ainda em avaliação para que possam ser bem empregados. Os programas a serem estudados são o Harfa e o Point, ambos programas gratuitos que serão melhor descritos a seguir.

### 3.1 Harfa

O Harfa é um programa que pode ser utilizado para fazer análise fractal e análise harmônica de imagens digitalizadas. A análise harmônica consiste em representar a imagem em 1 dimensão ou em 2 dimensões. A análise fractal pode determinar a dimensão fractal da imagem com a utilização de gráficos que fornecem a dimensão fractal desejada.

Nesse trabalho, será utilizado com maior ênfase a análise fractal, em que torna-se possível a análise da dimensão do fractal. Será utilizada o método da contagem de caixas, onde será possível determinar quantas vezes será dividido o fractal, podendo estabelecer quantas caixas serão utilizadas. Para tal análise, conta-se com várias ferramentas que o software oferece. com recursos disponíveis no software que serão melhor apresentados através de exemplos.

## 3.2 Point

O Point é um programa capaz de demarcar, com certa exatidão, os pontos de uma imagem digitalizada que pode ser um relâmpago, que é o objetivo desse estudo. Os pontos são marcados com base nos eixos  $x$  e  $y$ , estabelecendo um par ordenado que pode ser representado no plano cartesiano. A delimitação de seus ponto possibilita que sejam calculadas as mudanças de ângulos que ocorrem nas ramificações de uma descarga, facilitando assim um estudo mais detalhado da tortuosidade tanto do canal, como das ramificações do relâmpago.

## Capítulo 4

# Resultados obtidos

### 4.1 Resultados do Harfa

Em uma primeira análise, utilizando o Harfa como ferramenta de estudo, pode-se obter um resultado satisfatório para a dimensão fractal do triângulo de Sierpinski, em que obteve-se o valor de 1.54 na dimensão. Pelo método tradicional, onde os conceitos foram empregados, encontro-se o resultado de 1.58 na dimensão, aproximadamente. Com base nesses dados, foi realizado o cálculo da dimensão fractal de um relâmpago, em que obteve um resultado de aproximadamente 1.01, próximo à dimensão de uma linha.

A eficácia na utilização dessa ferramenta ainda está em discussão, podendo ainda haver modificação no tipo de software que será utilizado, de acordo com as necessidades. As figuras A.2, A.6, A.7 e A.10 a seguir mostram os resultados que foram obtidos em uma primeira análise para teste.

### 4.2 Resultados do Point

Como já foi descrito, o programa possibilita a demarcação dos pontos da imagem, mas ainda está em fase de estudo para que seja empregado como ferramenta de auxílio no projeto. Em um primeiro teste, pode-se demarcar os seguintes pontos: A partir destes pontos, será realizado um estudo mais detalhado para que se possa identificar se há veracidade nas informações e

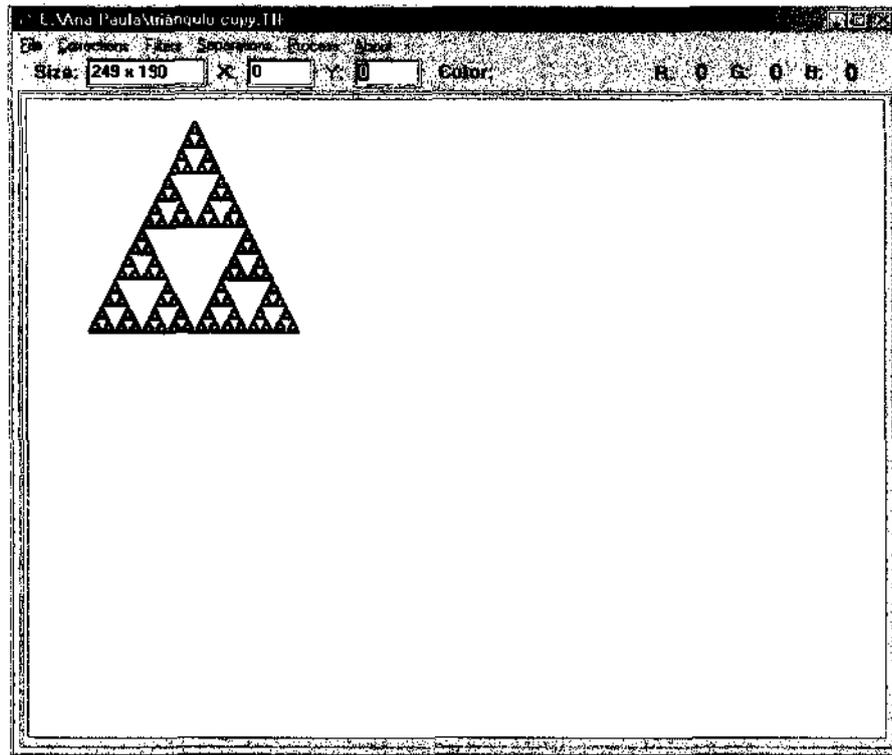


Figura 4.1: Triângulo de Sierpinski que foi utilizada para análise no Harfa.

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

se estas serão válidas para esse trabalho.

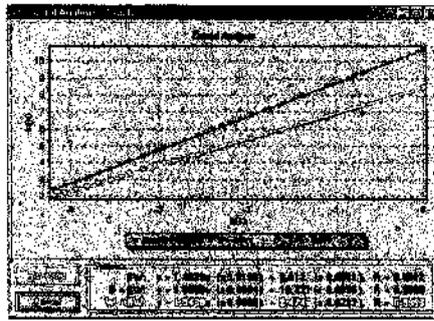


Figura 4.2: Resultado da análise da figura em gráfico.

FONTE: (Ferrara e Prado, 1995)

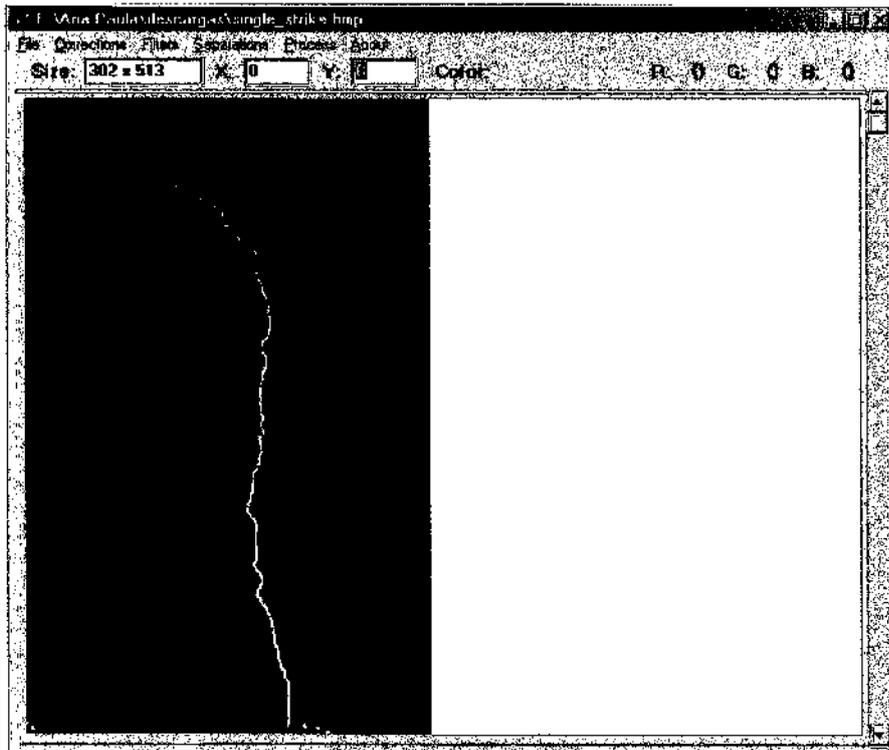


Figura 4.3: Relâmpago que foi utilizado para análise no Harfa.

FONTE: (créditos a serem atribuídos)

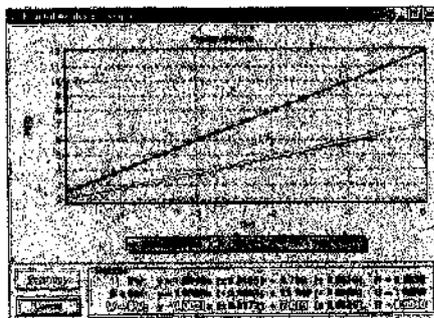


Figura 4.4: Resultado da análise da figura de relâmpago.

FONTE: (créditos a serem atribuídos)

Tabela 4.1: Pares ordenados demarcados de um relâmpago com auxílio do Point

X	Y	X	Y	X	Y
83	508	174	372	165	202
87	500	174	380	167	197
87	493	178	372	171	192
89	488	178	367	172	187
92	483	182	360	172	180
95	476	183	353	172	170
98	469	184	346	172	160
98	464	183	339	175	152
102	459	180	331	176	157
101	464	177	325	173	141
106	453	180	317	175	134
111	449	178	308	178	129
116	446	177	302	181	123
121	444	175	290	184	117
126	441	175	282	185	111
131	438	177	275	186	101
136	434	176	266	188	195
141	433	178	260	189	89
147	428	175	254	192	82
149	423	176	247	193	76
150	416	174	239	196	70
155	413	170	229	196	61
160	407	170	224	196	50
165	403	170	216	196	44
170	402	167	209	194	39

## Capítulo 5

# Conclusões Preliminares

No decorrer das etapas desse trabalho, que foram realizadas até o presente momento, houve um maior embasamento dos conceitos que deverão ser empregados para a solução do problema proposto. Por meio de um estudo mais detalhado das Propriedades Elétricas da Matéria, pode haver uma maior compreensão do fenômeno Relâmpago, em que também pode-se aprofundar os conhecimentos, pela leitura detalhada sobre o assunto. Houve também a apresentação da Técnica Fractal, como a principal ferramenta para a solução do problema que foi proposto, na qual pode-se ter um entendimento quase que completo. A utilização de recursos computacionais e o contato com programas ainda desconhecidos, puderam também enriquecer o estudo que se segue.

# Referências Bibliográficas

- Alonso, M.; Finn, E. J. **Física: Um Curso Univrsitário**. Editora Edgar Blucher, 1972. v. 2, Cap. 14, p. 1-5.
- Ferrara, N. F.; Prado, C. P. C. **Caos : Uma Introdução**. Edgar Blucer, 1995. Cap. 3, p. 253-280.
- Gin, R. B. B. **Estudo Coordenado de um Sistema de Tempestade sobre a América do Sul**. São José dos Campos. 141 p. INPE-5388-TDI/477. Mestrado em Ciência Espacial / Geofísica Espacial – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Abril 1992.
- Goody, R. M.; Walker, J. C. G. **Atmosféras Planetárias**. SãoPaulo: Edgar Blucher, 1975. Cap. 3, p. 40-64.
- Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The Atmosphere**. 2. ed. Englenwood Cliffs, 1982.
- MacGorman, D. R.; Rust, W. D. **The Eletrical Nature Of Storms**. Oxford Oxford University, 1998.
- Richard, M.; Walker, J. C. G. **Atmosferas Planetárias**. Edgard Blücher, 1975.
- Saba, M. M. F. **Estudo de Condutividade, Campo Elétrico e Relâmpagos Associados a Nuvens de Tempestade**. São José dos Campos. Tese – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Junho 1997.
- Serway, R. A. **Física 3 Para Cientistas E Engenheiros**. Livros Técnicos e Científicos, 1996.

- Soares, R. Dimensão Fractal. internet, Janeiro 2002. Online: <http://www.terravista.pt/-BaiaGatas/1243/home.htm>.
- Spadotto, A. J.; Guerrini, J. A.; Rezende, M. A. Desenvolvimento de um Método Didático para Determinação da Dimensão Fractal. In: Reunião Anual da S B P C. **Reunião Anual da S B P C**. Belo Horizonte: Anais Belo Horizonte, 1997. p. 19.
- Spadotto, A. J.; Seraphin, O. J. Determinação da dimensão fractal pela fórmula Spadotto e pelo método MC-D. revista online, 1997. Online: <http://www.fca.enesp.br/posgradua/-Energia/revista/v12n4-97/spadotto.pdf>.
- Stoyan, D.; Stoyan, H. **Fractal Randon Shapes And Point Fields : Methods Of Geometrica Statistics**. John Wiley and Sons, 1994. Cap. 3, p. 3-44.
- Uman, M. A. **All About Lightning**. New York, Dover, 1987. Cap. 6, p. 47-53.

## Apêndice A

### O Harfa passo a passo

O Harfa proporciona a análise de imagens digitalizadas por técnica fractal. Os resultados podem ser obtidos após um trabalho que é feito na imagem em que a mesma é transformada pelo processo chamado de "separations" em tons de cinza, pois quando uma imagem é colorida, ela possui três números de pixel – o RGB – dificultando ou tornando menos precisa a análise, e quando ela se torna "cinza" fica com um padrão de cor, que vai do preto até o branco.

Após a transformação, deve-se escolher o processo que será utilizado. No caso desse estudo, utiliza-se o método da contagem de caixas. Uma caixa de escolha de dados será aberta, que deve ser usada para medir a intensidade (quantidade de pixels) da cor que se deseja (cor que vai do branco até o preto) que é determinada por um número que vai de 0 até 255, respectivamente. A intensidade deve ser escolhida clicando com o cursor sobre o desenho, podendo escolher também, conforme a necessidade, se a intensidade deve ser maior ou menor que aquele número, ou seja, os pixels que devem estar dentro da análise.

O botão denominado "perform thresholding" deve ser ativado para que os pixels que estão dentro da faixa de intensidade sejam separados dos demais e então pode ser feita a análise fractal da figura.

Ainda é possível escolher se a análise será feita por passos "discrete" (quantidade de vezes que será dividida a figura em caixas) ou por logaritmos "contínuos".

Nos exemplos mostrados foi utilizado o método "discrete". Após preenchida todas as opções, deve-se ativar o botão "start" para que a análise seja efetuada, resultando em um

gráfico.

Nesse gráfico, são encontrados valores de três dimensões diferentes: aquelas que contém pixels branco e pretos; preto + branco e preto; e branco + preto e branco. No caso das análises realizadas nos exemplos, foi levado em consideração o resultado dos pixels BRANCO + BRANCO E PRETO, mas isso deve ser analisado de acordo com a necessidade da análise.

A seguir, pode-se observar as figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, ??, A.7, A.8, A.9 e A.10 as várias etapas com o auxílio do Harfa.

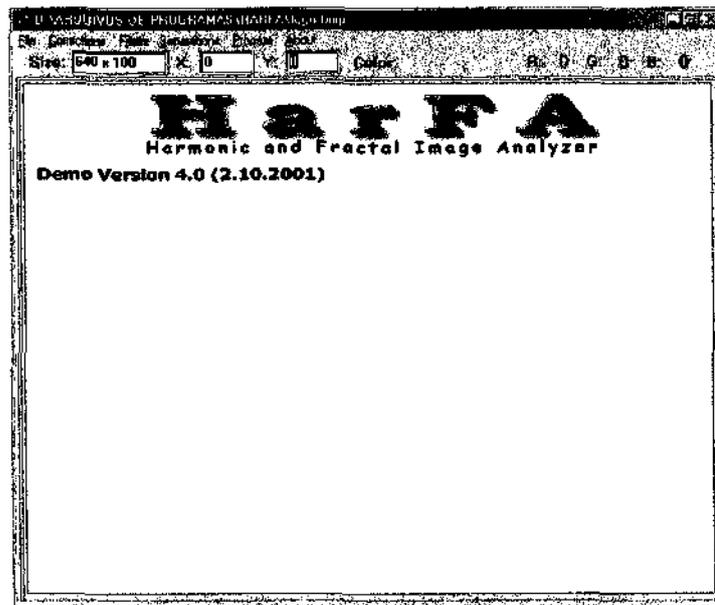


Figura A.1: Interface do Harfa

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

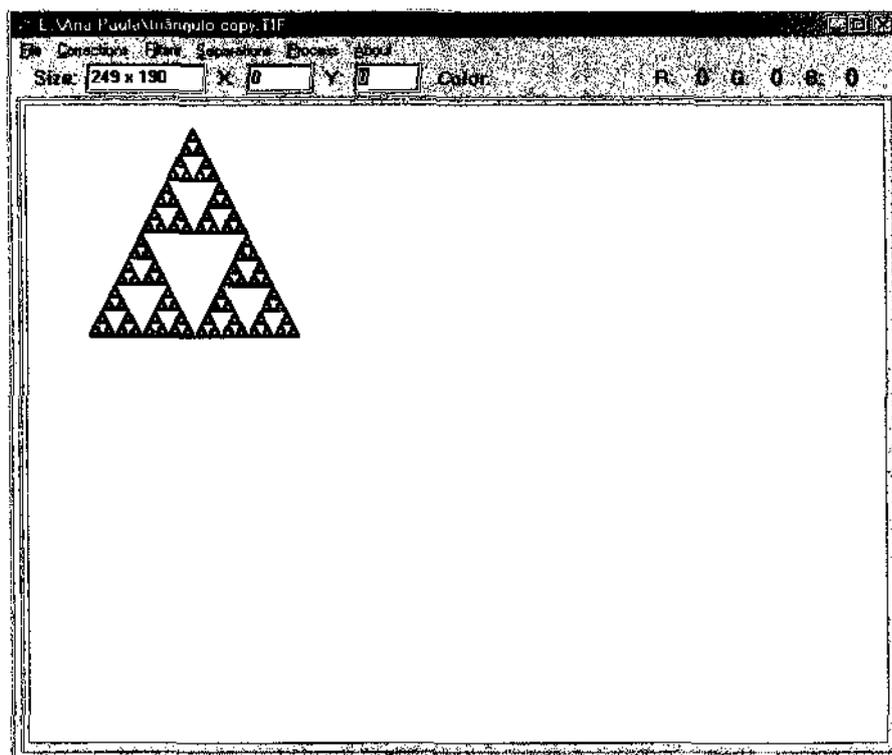


Figura A.2: Figura analisada  
FONTE: Ferrara e Prado (1995)

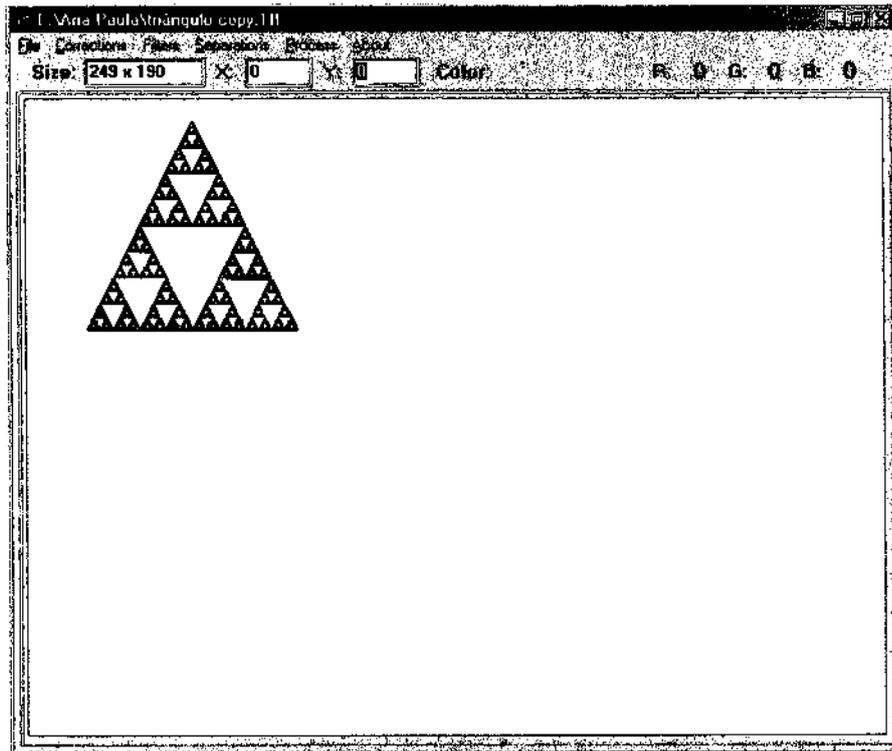


Figura A.3: Resultado da separação de cores

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

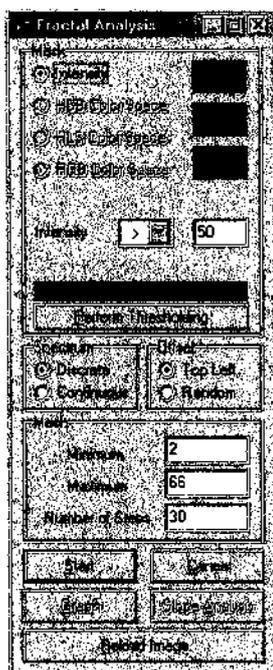


Figura A.4: Janela de opções do Harfa

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

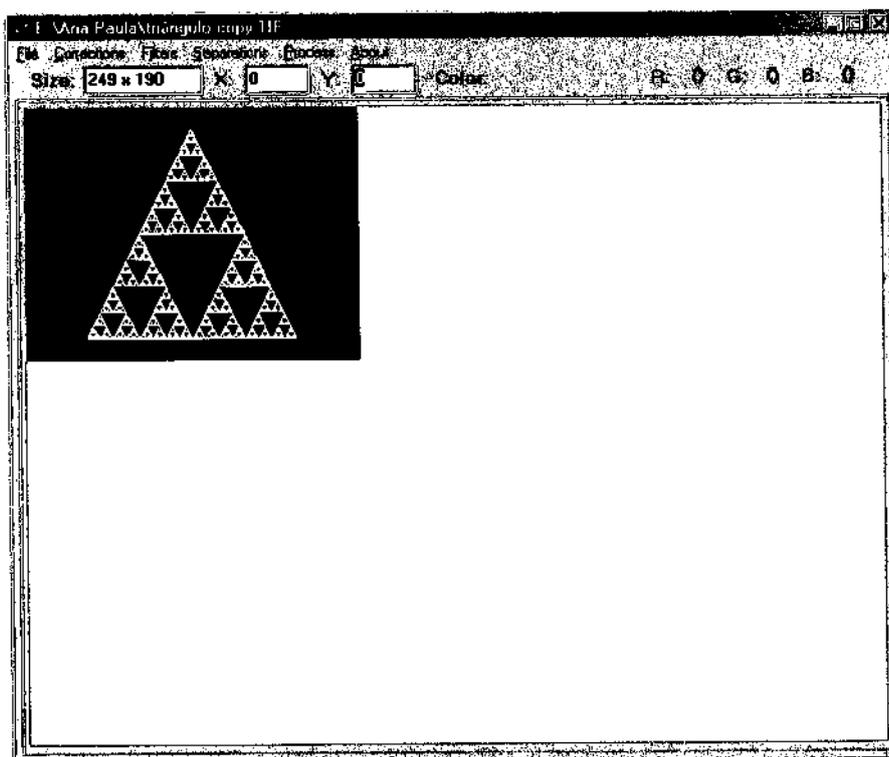


Figura A.5: Separação de pixels

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

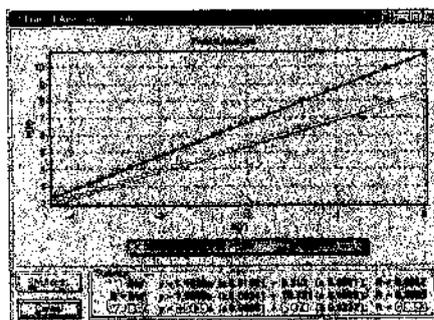


Figura A.6: Resultado gráfico da análise fractal

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

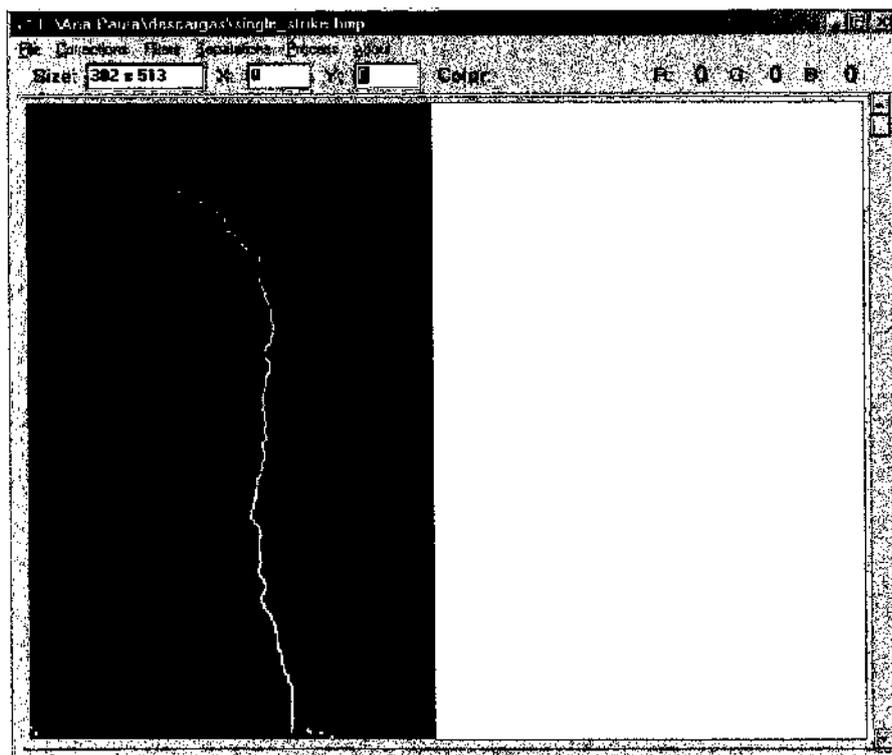


Figura A.7: Relâmpago utilizado na análise

FONTE: (créditos a serem atribuídos)

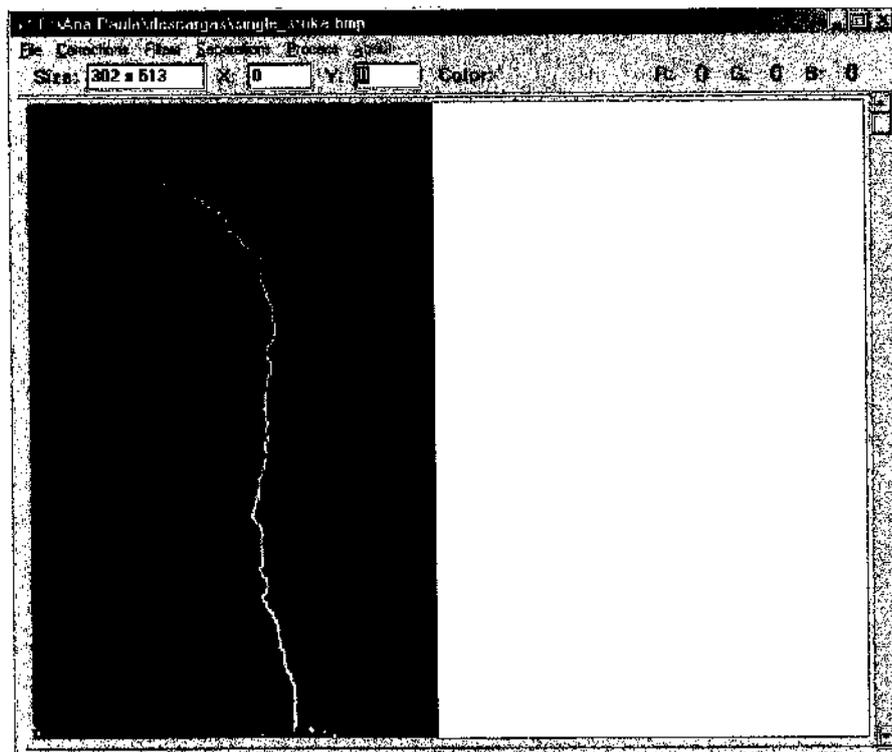


Figura A.8: Separação de cores  
FONTE: (créditos a serem atribuídos)

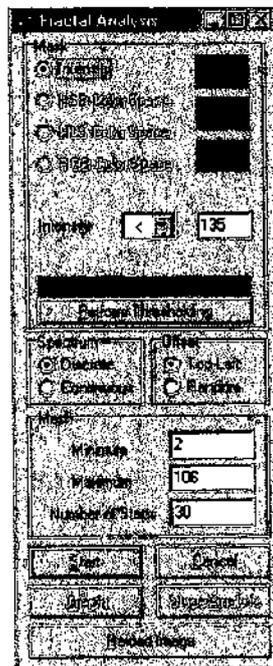


Figura A.9: Janela de opções

FONTE: (créditos a serem atribuídos)

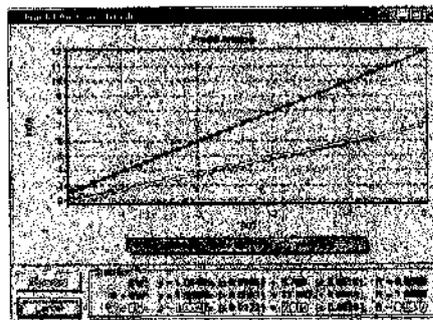


Figura A.10: Resultado gráfico de análise fractal de um relâmpago

FONTE: (créditos a serem atribuídos)

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Conceitos Fundamentais</b>	<b>3</b>
2.1	As Propriedades Elétricas da Matéria . . . . .	3
2.1.1	Cargas Elétricas . . . . .	3
2.1.2	Lei de Coulomb . . . . .	4
2.1.3	Campo Elétrico . . . . .	5
2.1.4	Características Elétricas da Matéria . . . . .	9
2.2	O Fenômeno Relâmpago . . . . .	10
2.2.1	A Atmosfera . . . . .	10
2.2.2	Nuvens de tempestade . . . . .	11
2.2.3	O Relâmpago . . . . .	13
2.2.4	Líder escalonado ou canal primordial do relâmpago . . . . .	15
2.2.5	Ramificação do Relâmpago . . . . .	16
2.2.6	Tortuosidade do Relâmpago . . . . .	17
2.3	A Teoria Fractal . . . . .	17
2.3.1	Dimensão Fractal . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Metodologias e Recursos de análise</b>	<b>25</b>
3.1	Dados . . . . .	25
3.2	Harfa . . . . .	26
3.3	Digitalizador de Imagens . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Resultados obtidos</b>	<b>28</b>
4.1	Obtenção da Dimensão Fractal . . . . .	28
4.2	Obtenção do caminho digitalizado . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>35</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>37</b>
<b>A</b>	<b>A ferramenta Harfa</b>	<b>39</b>

A.1 Interface do Harfa . . . . .	40
A.2 Figura analisada . . . . .	41
A.3 Resultado da separação de cores . . . . .	42
A.4 Janela de opções do Harfa . . . . .	42
A.5 Separação de pixels . . . . .	43
A.6 Resultado gráfico da análise fractal . . . . .	43
A.7 Relâmpago utilizado na Análise Dinâmica . . . . .	44

# Lista de Tabelas

4.1 Pares ordenados demarcados de um relâmpago digitalizado. . . . .	34
--	----

## Resumo

O projeto de Iniciação Científica que vem sendo realizado tem por objetivo desenvolver e implementar uma metodologia de análise das descargas elétricas atmosféricas por meio da Técnica Fractal, dando maior ênfase a ramificação e a tortuosidade do canal. O estudo da eletrodinâmica das descargas é importante para o entendimento do fenômeno Relâmpago; para seu uso em aplicações gerais; e como forma de prevenir ou monitorar seus efeitos no meio ambiente, devido inclusive o risco que apresenta para as instalações de forma geral e à própria vida. Nessa fase inicial, foram realizadas atividades de embasamento teórico sobre o fenômeno relâmpago, desde a formação das nuvens Cumulonimbus até a ocorrência de relâmpagos, e a teoria fractal, sendo visto seus conceitos básicos na visão de vários teóricos. Procedeu-se também a escolha de ferramentas de auxílio ao processo de análise das descargas, estando em fase de estudo o programa computacional denominado HARFA, capaz de determinar a dimensão fractal de imagens associadas ao fenômeno em estudo, no caso, o comportamento espacial do relâmpago. Na fase atual do trabalho, realizam-se a aquisição de dados para análise; aprofundamento no conhecimento da técnica fractal; e testes para a análise de imagens-padrão com o HARFA. Procedem-se ainda a busca de novos recursos computacionais capazes de aprimorar estas análises. A metodologia de trabalho segue da seguinte forma: tendo em mãos as documentações visuais (gravações VHS) dos relâmpagos, procede-se a captura das imagens em padrão AVI, utilizando programas computacionais de tratamento e análise gráfica. Separam-se então os quadros de imagens em padrão TIFF (resolução temporal de 17,6 ms), criando uma base de informações para utilização nas análises realizadas utilizando a técnica fractal. Aplicam-se nestas imagens um tratamento utilizando a ferramenta HARFA para determinar a dimensão fractal. Estes procedimentos, e outros que ainda deverão ser desenvolvidos, constituirão uma nova metodologia para estudo da morfologia dos relâmpagos, característica associada a parâmetros atmosféricos. Os resultados parciais obtidos foram: desenvolvimento da habilidade em lidar com a técnica fractal, definição dos critérios de tratamento das imagens, obtenção de resultados quantitativos preliminares em exemplos, como

o triângulo de Sierpinski, e a análise de um caso físico. Na fase de prosseguimento do trabalho, tratar-se-ão as descargas selecionadas e classificadas para a obtenção de caracterizações fractais, considerando a ramificação.

# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos, facilitado pelos avanços tecnológicos, o estudo de fenômenos atmosféricos vem aumentando devido à necessidade de prevenir supostos desastres naturais que poderiam causar perturbações severas ao meio ambiente e prejuízos à Humanidade. Um desses fenômenos que são estudados com maior extensão e profundidade na atualidade são os *relâmpagos*, que constituem um processo de descargas elétricas na atmosferaplanetária. Esse fenômeno parece ocorrer em outros planetas, como Vênus e Júpiter. Os relâmpagos causam fascínio e medo na humanidade desde a antiguidade, sendo que vários estudiosos já se deixaram levar por sua beleza e seu mistério, empenhando em seu entendimento (MacGorman e Rust, 1998). A descoberta e o estudo de partículas ínfimas da matéria que possuem cargas elétricas— os prótons e os elétrons— possibilitaram uma compreensão fundamental da eletricidade atmosférica e sobre o que forma um relâmpago (Alonso e Finn, 1972). Considerando o assunto descargas elétricas atmosféricas, uma abordagem muito interessante de pesquisa é a pesquisa da morfologias das descargas. Essa análise deve propiciar a identificação de características que se esperam associadas à física da descarga e a sua interação com a atmosfera.

Nos dias atuais, contam-se com ferramentas mais específicas e de maior precisão para efetuar tais estudos da morfologia e da eletrodinâmica das descargas. Essas ferramentas são variadas, sendo que uma dessas, que ainda é pouco utilizada, é a Técnica Fractal, que permite medir e, assim, classificar com uma maior objetividade aspectos relacionados a essa morfologia, como a ramificação e a tortuosidade da descarga. Pode-se contar também com o

auxílio de computadores pessoais e programas, que foram evoluindo com o passar das décadas e que tornam viáveis a solução de problemas que seriam mais demorados e complicados sem o seu uso.

O objetivo desse trabalho é implementar uma metodologia de análise por Técnica Fractal das descargas elétricas atmosféricas e permitir, desta forma, em primeiro momento, análise relacionada à ramificação, e, posteriormente, à tortuosidade do canal.

Este trabalho desenvolve-se seguindo as etapas seguintes:

No capítulo 2, para embasamento físico do problema, apresentam-se considerações gerais sobre a natureza elétrica da matéria, uma revisão sobre relâmpagos e uma descrição básica sobre os fractais.

No capítulo 3, dão-se exemplos dos objetos de estudo (isto é, os dados de estudo), apresentam-se as ferramentas de análise e descrevem-se as metodologias de análises.

No capítulo 4, apresentam-se, preliminarmente, os resultados das análises e discussões dos resultados que serão realizadas em etapas seguintes.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões preliminares do trabalho, que serão entendidas, verificadas e redigidas de uma forma mais conclusiva nas etapas seguintes da realização desse trabalho.

## Capítulo 2

# Conceitos Fundamentais

O estudo de relâmpagos requer embasamento teórico e treino em ferramentas que devem ser utilizadas. Para o embasamento teórico, apresentam-se os aspectos principais sobre o que é o campo elétrico e quais suas propriedades (Serway, 1996; Alonso e Finn, 1972), que servirão de base para o entendimento da eletrodinâmica planetária, já que a atmosfera possui natureza elétrica intrínseca e, como se sabe, os relâmpagos constituem-se de cargas elétricas em sua ocorrência (Mendes e Domingues, 2002; Saba, 1997). Também são apresentados aspectos da teoria fractal, utilizada como ferramenta no estudo das ramificações e da tortuosidade das descargas, permitindo dar objetividade a análise.

### 2.1 As Propriedades Elétricas da Matéria

#### 2.1.1 Cargas Elétricas

A matéria constitui-se de partículas eletricamente carregadas. Essas partículas foram chamadas de elétrons - que possuem cargas negativas, simbolizada pela letra  $e$ , que possui uma massa de valor  $9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$  e carga elétrica de  $-1.6021917 \times 10^{-19}$ ; os prótons, que possuem cargas positivas simbolizada pela letra  $p$ , possuindo uma massa de  $1.67261 \times 10^{-27} \text{ kg}$  e carga elétrica de  $+1.6021917 \times 10^{-19}$ ; sendo que os nêutrons, com massa de  $1.67492 \times 10^{-27} \text{ kg}$  não possuem cargas. A descoberta dessas partículas se deu após vários experimentos realizados por cientistas, que chegaram a conclusão sobre essas propriedades da matéria. Um exemplo

clássico que pode ser mostrado é a fricção de um bastão de vidro em tecido tipo seda, onde há a geração de um pequeno campo elétrico, capaz de atrair pequenos corpos, como pedacinhos de papel, por exemplo (Serway, 1996). Se houvesse necessidade de atração de corpos maiores (mais pesados), ter-se-ia que gerar um campo mais potente (Serway, 1996; Alonso e Finn, 1972). Na figura 2.1, pode-se exemplificar um caso como o acima mencionado, em que são utilizados bastões de borracha e vidro, mostrando a atração de um bastão de borracha, que possui carga negativa, por um bastão de vidro, que possui carga positiva, e mostra também um bastão de borracha com carga negativa, sendo repelido por outro bastão de borracha também com carga negativa.

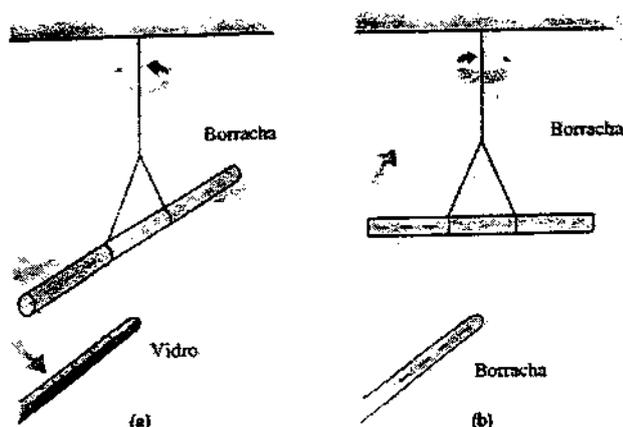


Figura 2.1: Exemplo de atração e repulsão.

FONTE: Serway (1996)

As carga mencionadas acima atraem-se quando possuem sinais opostos e repelem-se quando possuem sinais iguais. A carga não é criada no universo, ela já existe em diversos corpos, podendo apenas ser transferida de um corpo a outro. Por meio de vários métodos, que não serão vistos agora, pode-se demonstrar que a carga total se conserva.

### 2.1.2 Lei de Coulomb

Entre duas partículas eletricamente carregadas existem forças inter-atuantes. Um pesquisador chamado *Coulomb* estudou como são essas forças e estabeleceu uma lei para sua atuação (Alonso e Finn, 1972). Essa lei ficou conhecida como *Lei de Coulomb* e que é muito usada em

cargas puntiformes. Essa lei estabelece que:

- A força é inversamente proporcional ao quadrado da separação espacial,  $r$ , entre uma partícula e outra e atua ao longo da reta que as une;
- A força é proporcional ao produto das cargas  $q_1$  e  $q_2$ ;
- A força é atrativa se as cargas tiverem sinais opostos e repulsivas se tiverem mesmo sinal.

Com base nesta lei, a força de Coulomb é formulada como:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}_{12}, \quad (2.1)$$

em que permissividade elétrica no vácuo é  $\epsilon_0 = 8.85442 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ , sendo  $C$  a unidade em Coulomb.

### 2.1.3 Campo Elétrico

Uma carga faz atuar sobre uma carga de prova qualquer, em um ponto do espaço, uma força elétrica. Ao agente físico nessa região do espaço ao redor da carga de prova, que produz essa força de interação, dá-se o nome de Campo elétrico, indicado pela letra  $\vec{E}$ , que é de natureza vetorial. A unidade de medida da grandeza  $\vec{E}$  é o N/C (Newtons por Coulomb) O sentido da força  $\vec{F}$  no campo é de acordo com o sinal da carga ( $q$ ). Se  $q$  é positivo,  $\vec{F}$  tem o mesmo sinal do campo; se é negativo, possui sentido oposto ao do campo. A adireção é ao longo da linha que une o centro elétrico da carga ao ponto no espaço.

Para calcular o campo elétrico, é utilizada a fórmula:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2.2)$$

Essa fórmula é utilizada para calcular um campo elétrico, atuando em uma carga de prova, admitindo que esta seja bem pequena de modo a não perturbar a distribuição de cargas em sua volta, que é responsável pelo campo elétrico. Por exemplo, se uma prova de carga muito pequena  $q$  for colocada nas vizinhanças de uma esfera uniformemente carregada, como mostra

a figura 2.2, a carga sobre a esfera metálica, que provoca o campo elétrico, permanecerá uniformemente distribuída.

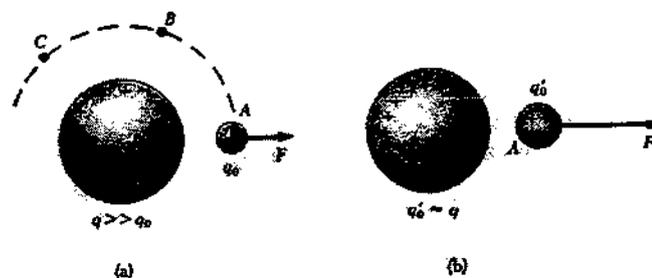


Figura 2.2: Esfera condutora: (a) esfera condutora em que a carga permanece uniforme (b) esfera condutora deixa de ser uniforme

FONTE: Serway (1996)

Quando a carga de prova  $q_0$  é muito grande em relação ao tamanho das cargas distribuídas que estão gerando o campo elétrico (distribuição contínua de cargas), deve-se admitir que haverá mudança no campo elétrico, surgindo um vetor unitário  $\vec{v}$  que dirige-se de uma carga  $q$  para uma carga  $q_0$ , dentro do campo elétrico. Devido a essa mudança, o vetor unitário pode ser expresso por:

$$\vec{E} = K \frac{q}{r^3} \vec{r} \quad (2.3)$$

Para calcular o campo elétrico de um grupo de cargas, é necessário fazer a soma vetorial de todas as cargas. Isto pode ser obtido pela expressão:

$$\vec{E} = \sum_i \frac{q_i}{r_i^3} \vec{r}_i \quad (2.4)$$

Em algumas situações, as cargas podem estar muitas juntas, então admite-se que elas estão distribuídas continuamente. Para calcular uma distribuição contínua de cargas, procede-se da seguinte maneira: divide-se a carga em pequenos pedaços, que se chama de  $\Delta q$ , em seguida, aplica-se a lei de Coulomb a esta pequena parte, e calcula-se o campo elétrico:

$$\Delta \vec{E} = K \frac{\Delta q}{r^3} \vec{r} \quad (2.5)$$

Com o campo total dado pela equação:

$$\vec{E} \approx \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^3} \vec{r}_i \quad (2.6)$$

Se a separação entre os elementos de carga for pequena, a distribuição pode ser considerada contínua. Então podemos adotar a equação que é a soma de Riemman, resultando na integral

$$\approx K \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^3} \vec{r}_i = K \int \frac{dq}{r^3} \vec{r} \quad (2.7)$$

O campo elétrico de uma distribuição contínua de cargas é a soma vetorial de todos os elementos de carga  $\Delta q$  da distribuição de cargas (Serway, 1996), que pode ser exemplificado pela figura 2.3.



Figura 2.3: Distribuição contínua de cargas.

FONTE: Serway (1996)

Essas distribuições de cargas poderão estar sobre uma linha, sobre uma superfície ou em um volume. Para efetuar os cálculos, será necessário utilizar o conceito de densidade de carga, usualmente convencionada como  $\rho$ . Se o caso for uma linha de comprimento, então sua densidade será:

$$\rho = \frac{Q}{l}; \quad (2.8)$$

se for uma superfície, será dado por:

$$\rho = \frac{Q}{A}; \quad (2.9)$$

e, por fim, se tivermos um volume, a densidade será:

$$\rho = \frac{Q}{V}. \quad (2.10)$$

Ja as linhas de campo elétrico são uma abstração que auxilia, na forma de diagramas, a visualização da configuração de um campo elétrico. A sua construção possui todo um padrão, que corresponde ao tipo de campo e do sinal da carga deste campo. É constituído por linhas, que apontam na mesma direção do campo elétrico (Serway, 1996; Alonso e Finn, 1972). A figura 2.4 pode mostrar o exemplo de linhas de campo elétrico de uma carga puntiforme, sendo que:

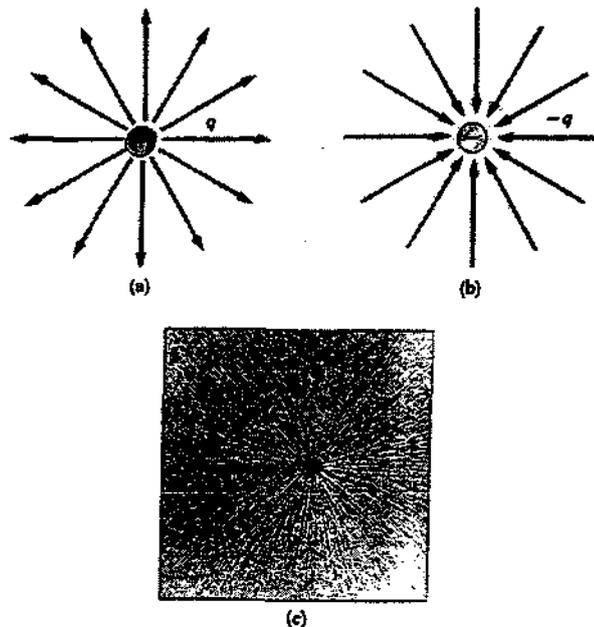


Figura 2.4: Linhas de campo elétrico

FONTE: Serway (1996)

- As linhas partem das cargas positivas, e terminam em cargas negativas,
- O número de linhas, que saem de uma carga positiva ou que chegam em uma carga negativa, é proporcional ao módulo da carga;
- Não há cruzamento de linhas de campo.

- O campo é contínuo, existindo em todas as distâncias.

Este modo de visualizar serve para ilustrar como seria um campo elétrico, já que sua construção seria bem mais detalhada.

#### 2.1.4 Características Elétricas da Matéria

A matéria, em geral, pode ser condutora de eletricidade ou não. De acordo com essas propriedades, os materiais podem ser classificados em condutores, isolantes e dielétricos (Serway, 1996). Os materiais condutores são aqueles que conduzem bem a energia elétrica. Alguns exemplos de materiais condutores: água com sais, cobre, e a maioria dos metais que encontramos na natureza. Já os materiais que são isolantes, não conduzem energia elétrica. Alguns exemplos que se pode citar são a cortiça, a madeira, a goma-laca, o vidro, entre outros. Em meio a esses dois tipos de materiais, encontra-se, os dielétricos, que constituem uma terceira classe de materiais, eles não são bons condutores, mas também não isolam completamente.

Essas propriedades da matéria pode ser aplicado na atmosfera (Mendes e Domingues, 2002). O ar que está presente na atmosfera pode ser considerado um meio condutor de eletricidade sendo assim um condutor. É através do ar que as partículas carregadas eletricamente (tanto partículas positivas quanto as negativas) são transportadas da nuvem para o solo e vice-versa, de uma nuvem para outra, e até dentro da própria nuvem. O ar é também responsável pela separação de cargas dentro de uma nuvem, colocando, por mecanismos variados, as positivas no topo e as negativas na parte baixa. Outra matéria presente na atmosfera que possui propriedade elétrica condutora é a água, tanto em forma líquida quanto na forma congelada contribuindo para a eletrodinâmica atmosférica. Pode-se dizer que na água, no seu estado congelado, é que ficam armazenadas as partículas carregadas eletricamente transportadas e separadas pelo ar.

## 2.2 O Fenômeno Relâmpago

### 2.2.1 A Atmosfera

A atmosfera terrestre, em termos de temperatura, é formada por quatro camadas distintas (Richard e Walker, 1975). Cada uma possui uma propriedade e um modo de se comportar, que será visto a seguir.

- **TROPOSFERA:** é camada inferior da atmosfera; sua temperatura cresce cerca de  $6.5^{\circ}\text{C}$  por km; possui uma espessura média de 12km de altura, nos pólos este valor fica reduzido a 9km e na linha do equador aumenta para 16km. É na troposfera que ocorre a formação de nuvens de precipitação.
- **ESTRATOSFERA:** é a parte da atmosfera em que a temperatura se mantém constante por cerca de 20km acima da troposfera, e aumenta após esta distância, até uma altura de 50Km. Nesta região, há absorção de raios ultravioletas pelo ozônio, o que causa o aquecimento da Terra.
- **MESOSFERA:** é a parte da atmosfera em que a temperatura volta a diminuir cerca de 50km a 90km de altitude.
- **TERMOSFERA:** é a região da atmosfera em que a temperatura volta novamente a aumentar. Esta camada encontra-se a partir de 90km de altitude. O aumento da temperatura resulta da absorção da radiação solar por átomos de oxigênio e nitrogênio. A figura 2.5 mostra as três divisões da atmosfera.

Quanto à propriedade elétrica, existem dois tipos de atmosfera: a quase neutra, que é pouco ionizada, e a ionosfera (altitude 70km) que possui alta densidade elétrica, já que, experimentalmente comprova-se que, a atmosfera possui em sua formação, partículas eletricamente carregadas. Existem várias maneiras da atmosfera se tornar ionizada. Um tipo de ionização que é conhecido é a ionização por materiais radioativos, que ionizam a atmosfera próxima ao solo, pois estes materiais liberam raios betas e gama. Já acima do solo, nos primeiros 100m, o gás radônio emitindo partículas alfa constitui a principal fonte ionizadora do ar. Outra fonte de ionização considerável é realizada pelos raios cósmicos galácticos, cuja ionização é máxima

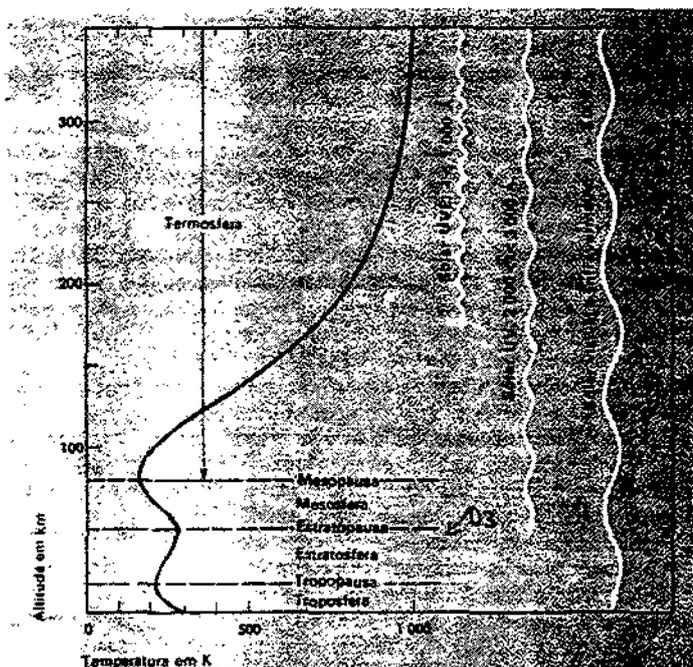


Figura 2.5: Camadas da atmosfera

FONTE: Goody e Walker (1975)

em torno de 15km de altura. Esses fatores contribuem para manter um campo elétrico ao redor da Terra.

Dizemos que o campo elétrico é de tempo bom quando não há perturbação em sua direção, que é vertical e para baixo, ou seja, quando não há interferência gerada pela eletrificação das nuvens de tempestade (Saba, 1997).

Foram desenvolvidas várias idéias a respeito da condução elétrica na atmosfera, Uma dessas hipóteses representa a ionosfera (Fronteira Superior), a atmosfera (meio dielétrico) e a superfície da Terra (Fronteira Superior) como um enorme capacitor elétrico. As tempestades seriam os geradores que forneceriam corrente elétrica suficiente para manter as cargas elétrica nessas superfícies e, esse é o campo elétrico atmosférico vertical (Mendes e Domingues, 2002).

### 2.2.2 Nuvens de tempestade

As nuvens são formadas por gotículas de água e gelo, que estão suspensas na atmosfera. Elas distinguem-se entre si pelo seu tamanho, pela sua grande extensão vertical e por apre-

sentarem fortes correntes verticais de ar. Podem também ser de dois tipos: isoladas, também conhecidas como locais ou convectivas que formam tempestades organizadas sendo estas mais intensas, como por exemplo os sistemas convectivos de meso-escala. Dentro dessas nuvens existem cargas elétricas assim como na atmosfera. De estudos realizados, verifica-se que na parte superior de uma nuvem estão as cargas positivas e na parte inferior estão situadas as negativas. O transporte destas partículas dentro da nuvem é feito por correntes de ar. Há ainda um terceiro centro de cargas abaixo do centro negativo, ainda que pouco estudado, mas provavelmente criado a partir da captura de íons do ar ascendente pela nuvem. Esses três centros formam uma estrutura tripolar, caracterizando a distribuição básica das cargas dentro da nuvem (Mendes e Domingues, 2002).

Por mecanismos de convecção e precipitação, uma nuvem Cumulonimbus (ou vulgarmente chamada de nuvem de tempestade) faz a separação de cargas e altera o campo elétrico de tempo bom. Esse tipo de nuvem possui três estágios diferentes de formação e evolução, que são:

- Estágio cúmulos: é o estágio de crescimento da nuvem, que é ocasionado por suprimento de ar úmido;
- Estágio maduro: estágio onde as gotas de água já estão bastante grandes e pesadas e a corrente ascendente que existe já não conseguem mais suportar o peso, havendo assim a precipitação;
- Estágio dissipativo: há a dissipação da nuvem decorrida da ocorrência de correntes ascendentes e ventos para baixo. A figura 2.6 mostra os estágios de uma nuvem cumulonimbus.

A figura 2.6 mostra os estágios de uma nuvem Cumulonimbus.

O estágio maduro de uma Cumulonimbus pode ser considerado seu período de maior atividade, onde costuma ocorrer o fenômeno do relâmpago. Um relâmpago geralmente surge de uma nuvem do tipo cumulonimbus, porém o relâmpago pode originar-se de outros mecanismos de separação de cargas, tais como tempestades de areia, tempestade de neve e explosões nucleares (Mendes e Domingues, 2002)

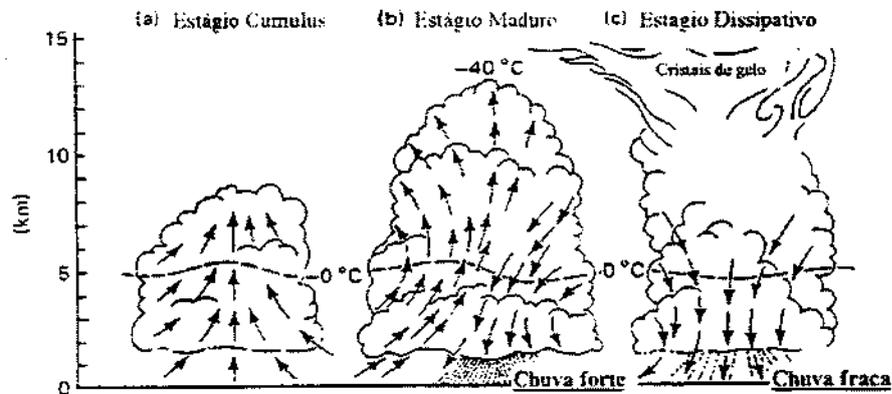


Figura 2.6: Estágio de uma nuvem Cumulonimbus.

FONTE: Lutgens e Tarbuck (1982)

### 2.2.3 O Relâmpago

Relâmpago é a descarga elétrica originada, em geral, nas nuvens Cumulonimbus, neutralizando cargas elétricas acumuladas, que podem ser positivas e negativas. Já as descargas podem caracterizar três tipos de relâmpagos, de acordo com a polaridade das descargas: positivo, negativo e bipolar. A ocorrência do relâmpago se dá quando o campo elétrico dentro da nuvem se torna tão intenso que quebra a rigidez dielétrica do ar, que é de aproximadamente  $400\text{km/V}$ . Este campo elétrico é gerado pela presença de cargas positivas e negativas dentro da nuvem (Mendes e Domingues, 2002; Gin, 1992).

Existem vários tipos de relâmpagos: nuvem-solo, solo-nuvem, intranuvem, relâmpagos de nuvem de tempestade para cima, e ainda outros tipos com menos importância como relâmpago fita, o tipo cadeia (ou colar) e o tipo bola. O relâmpago nuvem-solo é mais enfatizado, pelo perigo que oferece no cotidiano na superfície. Este ainda pode ser positivo, negativo e bipolar. Os relâmpagos positivos foram considerados mais raros, embora pesquisas recentes mostrem que não são tão raros assim. Fatores como altitude das cargas positivas próximas ao topo das nuvens e a variação da velocidade dos ventos horizontais com a altura podem influenciar em sua ocorrência (Mendes e Domingues, 2002; Takagi et al., 1986).

Este tipo de relâmpago transfere cargas positivas próxima ao topo da nuvem para o solo.

Eles são os mais associados a incêndios em florestas, conforme estudos realizados por pesquisadores dos EUA. Os relâmpagos descendentes negativos transferem cargas negativas da região de cargas negativas dentro da nuvem para o solo. A maioria dos relâmpagos nuvem-solo, cerca de 90%, é negativa. E, por fim, temos os bipolares, que transferem cargas de ambos sinais para o solo e originam-se em regiões de separação de cargas dentro da nuvem.

Um relâmpago, ao ocorrer, apresenta etapas (Mendes e Domingues, 2002; Uman, 1987) distintas, descritas a seguir. Em primeiro lugar, parece ocorrer uma pré-descarga localizada, não necessariamente visualizável, e surge o canal da descarga, que é denominado de líder escalonado. Ele é pouco perceptível a olho nu, sendo que às vezes, nem chega a ser percebido. É um canal ionizado, que procura o melhor caminho para descarregar suas partículas elétricas. Geralmente se dirige em direção ao solo, possui um movimento tortuoso e é através dele que irão ocorrer outras várias descargas, utilizando seu canal. Possui fraca intensidade luminosa. Em seguida, próxima a superfície (aproximadamente 100 metros) há uma intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e um ponto do solo. Essa intensificação dá origem à descarga conectante. Esta descarga parte de algum objeto do solo (ex: árvore) e segue em direção ao líder escalonado. Quando esta descarga conecta-se ao líder escalonado, cria-se um pulso de sinal elétrico, transforma-se em uma descarga forte e com intensa luminosidade, que é denominada de descarga de retorno. Pode-se dizer que em média ocorrem três descargas de retorno por relâmpago. Após a descarga de retorno inicial, a seguir a um intervalo de tempo (valor típico de 40 microssegundos), pode ocorrer uma outra descarga que, em geral, não se caracteriza por ramificação. Essa descarga é denominada de líder contínuo. Ela pode repetir-se após pequeno intervalo de tempo (em geral, menor que 500 microssegundos). Sobrepostas a elas, outras descargas podem caracterizar-se, mas que são de menor intensidade. A figura 2.7 mostra as várias etapas de um relâmpago. Então podemos concluir que ocorrem  $n$  descargas até que todas as cargas negativas ou positivas, dependendo do tipo da descarga, sejam extraídas da nuvem.

Neste estudo, dar-se-á mais ênfase ao líder escalonado ou canal, primordial da descarga. Essa é a descarga inicial, e como geralmente não pode ser visto a olho nu, pode ser fotografado e filmado para que seja estudado, por câmeras especiais. O canal também estabelece o trajeto que o relâmpago irá realizar.

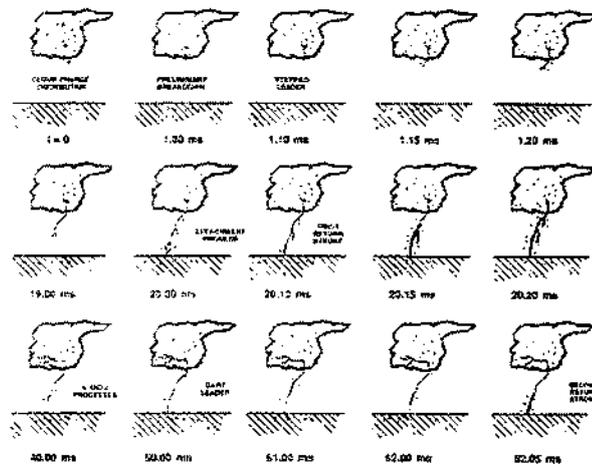


Figura 2.7: Etapas de um relâmpago.

FONTE: Uman (1987)

#### 2.2.4 Líder escalonado ou canal primordial do relâmpago

Tem-se da constataçãosexperimental que o líder escalonado ocorre em passos através do ar, em um trajeto irregular, ao longo do qual, em geral, ocorrem as descargas de relâmpago (Mendes e Domingues, 2002; Uman, 1987).

Quando começa o processo do relâmpago, consequência da ruptura dielétrica dentro da nuvem, devido à separação e ao acúmulo de cargas, uma série de elétrons é deslocado para a base da nuvem, depois para o ar circundante e, então, para o solo. Assim que os elétrons saem da nuvem, colidem com moléculas de ar, que a ionizam e produzem um canal condutor, facilitando o trajeto para outros elétrons.

Esse líder escalonado é muito indistinto e geralmente não bem resolvido a olho nu. Assim que a ponta do líder escalonado aproxima-se do solo, uma corrente de carga contária emerge de um ponto no solo, em geral mais ressaltado ou saliente, e encontra-se com o líder escalonado. Com esse encontro, um número maior de descargas dirige-se para o solo, já associado a maior luminosidade e maior intensidade de corrente elétrica, estas descargas são chamadas de descargas de retorno, que produz a luz de maior intensidade de que se vê em um relâmpago. Essas etapas são muito rápidas, ocorrendo em intervalos de dezenas de milésimos de segundos, e por isso não resolvidas facilmente a olho nu. Em seguida, pode ocorrer o processo de líder

contínuo, que são as demais descargas que ocorrem utilizando o mesmo canal ionizado inicial. O líder contínuo é vagamente perceptível a olho nu, pois faz-se com um acréscimo de luz. Geralmente, em um mesmo canal de relâmpago ocorrem demais descargas repetidamente. À medida que as cargas do líder propagam-se ao longo do canal rumo ao solo, variações do campo elétrico e também magnético são produzidas. Ao todo, um líder escalonado transporta 10 ou mais Coulombs de carga e alcança um ponto perto do solo em dezenas de milissegundos, dependendo da tortuosidade de seu caminho. A corrente média do líder escalonado é cerca de 1 kA e é transportada em um núcleo central do canal com alguns centímetros de diâmetro. As cores de um relâmpago podem variar de acordo com o estado da atmosfera, podendo, além da cor branca, ser amarelo, roxo, laranja ou mesmo verde. Outra característica que presente no líder escalonado é ramificação e a tortuosidade, que serão melhor descritas adiante. A ramificação e a tortuosidade apresentadas no canal ionizado da descarga, são o objeto de estudo deste trabalho, pois essas características associam-se ainda de uma forma não bem explorada, às características eletrodinâmicas da atmosfera.

### 2.2.5 Ramificação do Relâmpago

A ramificação do relâmpago consiste em mais uma característica deste fenômeno, até o presente momento pouco explorada, e receberá contribuição deste trabalho. Ao longo do caminho do líder escalonado, algumas cargas elétricas desprendem-se do canal do relâmpago e seguem novos caminhos devido à influência de cargas presentes na atmosfera ao redor do canal. Estas cargas desprendidas formam a ramificação do canal, que são vistas nos relâmpagos. Logo abaixo das nuvens Cumulonimbus, pode-se observar uma ramificação mais concentrada, que é denominada de alimentadora do canal (Borovsky, 1998). As ramificações do canal, em geral, não tocam o solo, e não apresentam o forte brilho que pode ser visto no canal ou líder escalonado. A causa deste fato deve-se a menor presença de elétrons passando através das ramificações do que através do líder. Logo, as ramificações são formações que se separam do trecho principal, o líder escalonado. Outra característica da ramificação do relâmpago é a dissipação de energia eletrostática. Esta energia é utilizada pela ramificação para formação e aquecimento do mesmo. A ramificação possui menor orientação vertical que o líder, seguindo uma trajetória mais horizontal. Também pode-se verificar o comprimento menor que o canal

(Borovsky, 1998). Segundo um estudo realizado por Lupò et al. (2000), verificou-se que há também um espaço eletromagnético ao redor da ramificação de um relâmpago. Para determinar o valor da dimensão deste espaço eletromagnético, foi utilizada a técnica fractal, em que o valor obtido para sua dimensão foi de aproximadamente 2,16. O valor citado de dimensão foi obtido a partir do método de contagem de caixas, que será melhor apresentado na Seção 2.3.

### 2.2.6 Tortuosidade do Relâmpago

A tortuosidade do relâmpago está ligada ao desenvolvimento do canal da descarga, sendo a tortuosidade produzida pela variação da direção de propagação e em geral, com variação do comprimento do canal. Do passo, Hill (1968), verificou que a medida do segmento do canal de um relâmpago nuvem-solo está entre 5 a 70 metros de comprimento, em que mudanças de sentido para segmentos sucessivos parecem distribuídas aleatoriamente e independentes do comprimento. A mudança da direção do canal possui a média com valor absoluto de  $16^\circ$ , aproximadamente. Associado com a tortuosidade, encontra-se o Espaço Eletromagnético, em que a tortuosidade causa certos efeitos na dimensão do espaço eletromagnético ao redor do relâmpago. A fim de caracterizar o espaço eletromagnético, a técnica fractal foi empregada com o objetivo de calcular a dimensão deste espaço. O valor encontrado foi de aproximadamente 1.522 (Lupò et al., 2000).

## 2.3 A Teoria Fractal

Usualmente, depara-se com uma geometria que trabalha com formas regulares, que possuem dimensões definidas e inteiras. Tal geometria é chamada de Euclidiana, pois foi estudada e formulada por Euclides. Na geometria Euclidiana, um ponto possui dimensão zero, uma reta tem dimensão um e um plano, que contém dois eixos como  $x$  e  $y$ , possui dimensão dois. Mas pode-se observar, na natureza principalmente, não existem formas regulares, para as quais usava-se no cálculo a geometria tradicional. Essas formas naturais são fragmentadas, com perímetros irregulares. Partindo dessas características, por meio de análises inovadoras, chegou-se a novas abordagens na geometria, criando a Teoria Fractal (Takayasu, 1990; Ferrara

e Prado, 1995; Gleick, 1990).

A discussão sobre os fractais começou por volta de 1830. Desde essa época, estudiosos como matemáticos e outros cientistas, tentam explicar e entender o que são fractais. Dentre esses mestres, podemos citar Von Koch, Georg Cantor e Sierpinski. Von Koch criou em seus estudos a teoria do floco de neve, em que por meio de um segmento de reta, são construídos triângulos de modo que não exista uma tangente os tocando, mostrando que a divisão em perímetro é infinita. Georg Cantor (1845-1918) também formulou vários exemplos para explicar o conceito de fractal (Ferrara e Prado, 1995; Gleick, 1990)

Exemplo que pode ser citado é a conhecida Poeira de Cantor, em que a partir de um segmento de reta, com dimensão igual a um, faz-se divisões, em três partes, retirando-se o terço médio, e prosseguindo assim com as partes restantes, surgindo no final a Poeira. Segundo Soares (2002), Cantor provou também em suas investigações que a reta  $R$  tem o mesmo cardinal que o plano  $R^2$ , colocando em causa o seu conceito de dimensão. Waclaw Sierpinski (1822-1969) desenvolveu duas estruturas fractais, o Carpete de Sierpinski e o Triângulo de Sierpinski. O Carpete de Sierpinski foi gerado dividindo-se um quadrado em 9 partes auto-similares e retirando o quadrado central, sendo que essa operação repete-se em cada um dos 8 quadrados restantes, tendendo ao infinito. O Triângulo de Sierpinski é dividido em quatro partes auto-similares formadas a partir do ponto médio de cada lado e com retirada do triângulo central. Repete-se essa operação em cada um dos triângulos restantes, tendendo o infinito. Na época em conceitos foram formulados e publicados, esse conceitos não eram bem aceitos entre a comunidade científica, sendo que não foi dado muito crédito aos cientistas que os produziam. Porém com o passar do tempo, um pesquisador, que era pouco conhecido na época, fez ressurgir as teorias que falavam sobre "fractal". Na década de 70, este pesquisador, chamado Benoit Mandelbrot, definiu de uma forma mais ampla todas as hipóteses que haviam sido formuladas anos atrás. Esse pesquisador passou a ser conhecido como pai dos fractais, sendo autor dos conceitos mais recentes sobre o assunto. Em seu livro, publicado sobre o assunto, ele começa com a seguinte citação: "Montanhas não são cones; Nuvens não são esferas; Os cães não latem regularmente; Nem os raios caem em linha reta". Essa forma de pensar abre todo um campo de investigações científicas de fenômenos aparentemente usuais (Soares, 2002).

### 2.3.1 Dimensão Fractal

#### Dimensão de Hausdorff

Como já foi visto anteriormente, dimensão Fractal pode ser caracterizada como uma dimensão de objetos que possuem formas irregulares e atendem a propriedades específicas, como a auto-similaridade. Para entender melhor este conceito, pode-se utilizar o teorema formulado pelo alemão Felix Hausdorff (1918) que definiu melhor a dimensão fractal. Para maior entendimento, considera-se o seguinte enunciado (Ferrara e Prado, 1995): dado um conjunto  $A$  composto por vários pontos, que está contido em um espaço  $p$ , recoberto por cubos que possuem lados  $\epsilon$  define-se a Dimensão de Hausdorff ou Dimensão Fractal como:

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(\frac{1}{\epsilon})}. \quad (2.11)$$

Essa expressão é utilizada tanto em cálculos de dimensão inteiras como para cálculo de conjuntos mais complexos, como é o caso dos fractais. Pode-se definir  $N$  como o número mínimo de hiper-cubos (caixas) de lados  $\epsilon$  que são necessário para cobrir todo o conjunto de pontos  $A$ . Esses hiper-cubos podem ser utilizados para cobrir um segmento de reta ou um plano. Se o tamanho da caixa for igual a  $\epsilon = 1$ ; o número de caixas que serão necessárias para cobrir o segmento será  $N(\epsilon) = 1$ ; se  $\epsilon = \frac{1}{2}$ ;  $N(\epsilon) = 2$ , e assim por diante. A figura 2.8 mostra o processo de contagem de caixas.

Este método para cálculo também pode ser empregado em superfícies planas, mas neste caso, para obter um valor correto para  $D_0$ ,  $\epsilon \rightarrow 0$ . A figura 2.9 a seguir exemplifica esse caso.

Os termos dimensão fractal, dimensão de Hausdorff e capacidade equivalem à mesma idéia sobre os fractais. Os cálculos de dimensão fractal são feitos, em geral, por algoritmos (instruções para execução de uma tarefa) e fazem o uso direto da definição de contagem de caixas. Os microcomputadores pessoais, atualmente poderosos e rápidos viabilizam as tarefas de cálculos. Para que os cálculos realizados com algoritmos obtenham sucesso, é necessário que os algoritmos empregados sejam de plena eficácia. Mas mesmo com os melhores algoritmos existentes, o cálculo de dimensão fractal não pode ser efetuado em dimensões maiores que

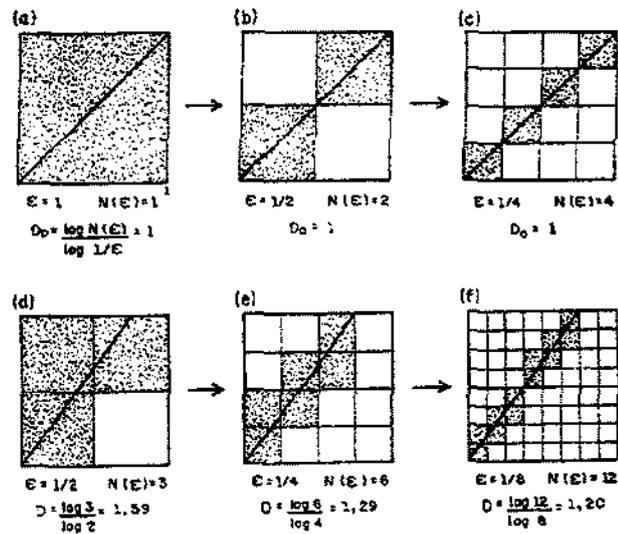


Figura 2.8: Contagem de caixas aplicada a um segmento de reta.

FONTE: Ferrara e Prado (1995)

dois, utilizando o método de contagem de caixas, devido a diversos fatores, não discutidos aqui (Ferrara e Prado, 1995). Neste caso outros métodos são empregados como o Método dos Vizinhos Próximos, em que nos algoritmos de contagem de caixas o volume é mantido fixo (tamanho da caixa) e então se analisa como a densidade (número de pontos) em cada caixa varia ao longo do atrator (região ao redor do limite do fractal onde há presença de pixel). Em seguida o atrator também é coberto por caixas que são definidas para conter o mesmo número de pontos. Então a dimensão fractal é obtida pelo estudo da variação do raio dos aglomerados ao longo do atrator (Ferrara e Prado, 1995).

Pode-se identificar também outro tipo de fractal, os denominados Fractais Gordos, que constituem uma outra classe de fractais cujo estudo é difícil se forem utilizados apenas as definições de dimensão fractal. Esses fractais possuem medida positiva e dimensão fractal inteira. A consequência é que o conceito de dimensão fractal mais utilizado não os distingue dos não fractais. Um exemplo de Fractal Gordo pode ser obtido através de uma versão modificada do Conjunto de Cantor (Ferrara e Prado, 1995). Tal conjunto tem dimensão de Hausdorff igual a 1, mas é diferente de um segmento de reta. Como equivale a um conjunto de Cantor usual, é considerado um fractal.

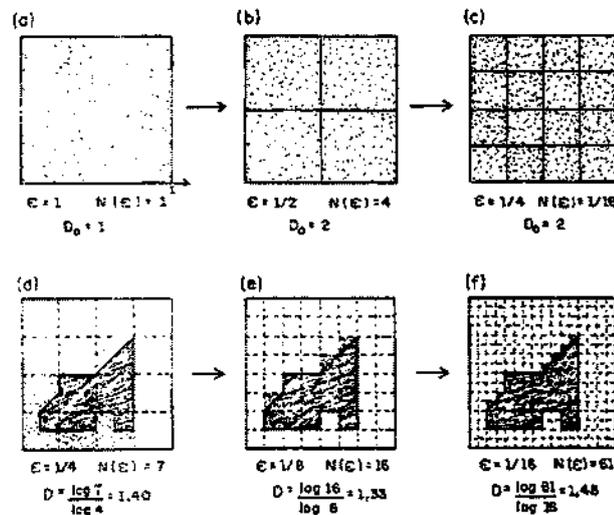


Figura 2.9: Contagem de caixas aplicada a uma superfície plana.

FONTE: (Ferrara e Prado, 1995)

Dentre essas dimensões pode-se citar as dimensões generalizadas, em que a escala do fractal varia com a medida irregular, possuindo assim regiões mais densas. No caso destes fractais, o conceito de Dimensão de Hausdorff não é empregado, pois não consegue ser suficiente para analisar esta estrutura que é mais complexa (Ferrara e Prado, 1995). Ainda dentro do conceito de dimensão fractal, pode-se citar as descobertas de Spadotto et al. (1997), para determinar a dimensão fractal e também a dimensão inteira, facilitando a didática de cálculo da dimensão. Nesse caso, admite-se a existência de grandezas dimensionais denominadas de aparentes, para diferenciar das já estabelecidas pela física tradicional. Assim, uma aplicação de uma nova terminologia levaria a conceituar uma massa aparente sobre um volume aparente originando uma densidade aparente. Spadotto et al. (1997) contribuíram também com a divulgação de aplicações de fractais, quando definiram unidade fractal (UF) e matriz fractal (MF) e uma fórmula genérica para determinar a dimensão fractal.

No trabalho realizado por Spadotto e Seraphin (1997) enfatizou-se que a dimensão fractal pode ser determinada pela fórmula genérica  $D = \frac{TODO}{PARTE}$  ou  $D = \frac{MF}{UF}$ , ou seja, uma relação do todo com uma parte de um sistema fractal. A partir da fórmula genérica, desenvolveu-se

a expressão a seguir :

$$D = \frac{\log V_2}{\log M}, \quad (2.12)$$

em que:

- $D$  = dimensão fractal sem unidade de medida.
- $V_2$  = quantidade qualquer no fractal formado
- $M$  = quantidade qualquer no gerador do fractal
- $b = 1$ , quando se determina a partir de uma reta; 2, quando a dimensão é determinada a partir de um plano; 3, quando é determinada a partir de um volume.
- $d_2$  = densidade aparente

Segundo Spadotto e Seraphin (1997), pode-se determinar a dimensão fractal, sem que os modelos utilizados tenham que ser transformados em euclidianos ou inteiros. Essa fórmula pode ser empregada em cálculo de modelos de fractais clássicos, sendo necessário apenas alguns ajustes, que já foram desenvolvidos por pesquisadores, mostrando que os resultados obtidos estão de acordo com a literatura especializada.

### Dimensão pelo Método de Divisão Escalar

O método de cálculo de dimensão pelo divisor 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 a 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

$$L(r) = cr^{1-D} \quad (2.13)$$

ou

$$\log L(r) = \log C + (1 - D) \log r, \quad (2.14)$$

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

$$lr = l_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{1-D}, \quad (2.15)$$

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 uma 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.

### Dimensão Calculada pelo Método da "Salsicha"

O método da "salsicha" ou da dilatação do contorno, é considerado ainda mais adequado para a análise de imagens do que o método das caixas. A estrutura a ser analisada constitui-se de padrões pixels. A estrutura é ampliada pela dilatação de discos, cujos raios aumentam em cada estágio, isto é, cada ponto do padrão de pixels é tornado o centro do disco e a área de pixels é dada pela união de todos os discos.

Em cada etapa o número de pixels,  $n_r$ , do presente método é anotado e os pontos  $(r, n_r)$  são traçados no papel bi-logarítmico. Tem-se que  $b$  é a inclinação da reta obtida pela regressão linear resultante, do conjunto de pontos  $(r, n_r)$ , assim, a dimensão pode ser dada por:  $\hat{D} = 2 - b$  (não demonstrado aqui).

Pelo fato que os discos demarcados digitalmente não podem ser apresentados exatamente, torna-se necessário mencionar a aproximação do disco que torna razoável utilizar os discos

aproximados obtidos pelos analisadores de imagem.

$$r = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}, \quad (2.16)$$

em que  $A$  é a área da figura correspondente em número de pixels. Para a figuras 2.10, os raios  $\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ ,  $\left(\frac{4}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ ,  $\left(\frac{9}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$ , e  $\left(\frac{12}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$  são expressos como múltiplos da distância do pixel. Para sistemas de curvas, pode ser considerad um sistema de correção de curvas, em que, para cada extremidade da curva, o valor  $\alpha_r \left(\frac{1}{4\pi}\right)^{\left(1 - \alpha\right)}$  da área da estrutura tem que ser subtraído quando o raio  $r$  é dilatado. Aqui,  $\alpha$  é uma estimativa apriori da dimensão fractal desconhecida. Se o conjunto investigado consiste em contornos de partículas, então as 8 fronteiras internas devem ser construídas e analisadas. Tem-se que testes dos fractais matemáticos, obtidos pelo proedimento de varredura de quadriculados mostram que os resultados aceitáveis podem ser obtidos se 5 – –10 tamanhos de discos forem utilizados. As dimensões teóricas maiores que 1.5 são em geral substimadas. Para melhores resultados um aprimoramento deve ser executado (não apresentado aqui).

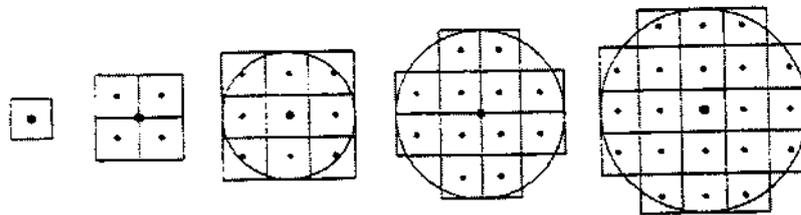


Figura 2.10: Divisão pelo método da salsicha.

FONTE: Stoyan e Stoyan (1994)

## Capítulo 3

# Metodologias e Recursos de análise

A análise da morfologia das descargas elétricas atmosféricas requer a coleta de dados e o seu processamento. No caso deste trabalho, imagens dos relâmpagos é que são utilizadas. Após, com o uso do software HARFA (Harmonic and Fractal Analyser), selecionado entre outros softwares por ser mais adequado, faz-se a determinação da dimensão fractal relacionada ao objeto em estudo, as ramificações nas descargas atmosféricas. A obtenção dos dados, o tratamento destes e a metodologia desenvolvida de análise serão descritas nas seções a seguir.

### 3.1 Dados

A obtenção de dados é uma fase muito importante neste trabalho, pois é com base na qualidade e classificação prévia dessas imagens que as análises serão feitas. Portanto, há uma sequência de procedimentos a ser seguida, para otimizar as análises e minimizar os possíveis erros que possam ocorrer. Inicialmente, com o auxílio de uma câmera de vídeo, que pode ser normal (30 quadros por segundo) ou de aquisição rápida (500 quadros por segundo), faz-se a gravação das imagens dos relâmpagos ocorridos em períodos de atividade elétrica atmosférica. Após a gravação das imagens, realizada em padrão VHS, são utilizados recursos computacionais para digitalização e tratamento destas imagens. Por meio de um software profissional de aquisição de imagens (ADOBE INC.), realiza-se a captura das imagens que realmente interessam ao trabalho. Os equipamentos utilizados nesta captura são um microcomputador,

um video-cassete e uma televisão. Os arquivos capturados são gerados em padrão AVI e em seguida, este arquivo é trabalhado e separados em quadros, gerados em padrão TIFF (próprio para análise ou impressão). Estes quadros são compostos de dois campos, de linhas pares e ímpares respectivamente. No tratamento faz-se a separação dos campos, interpolando as linhas, o que recupera a melhor resolução da imagem, que é de 17.6 milissegundos. Se necessário para garantir a melhor qualidade da informação, a imagem pode ser tratada com uma série de recursos específicos. A figura 3.1 exemplifica uma imagem após ter recebido tratamento. Na figura (a), observa-se a descarga com precisão de 30 milissegundos, com os campos ímpares e pares compondo a imagem. Nas figuras (b) e (c), os campos foram separados em ímpares e pares respectivamente, com uma precisão de 17.6 milissegundos, em que observa-se na figura (b) o aparecimento do relâmpago e na figura (c) a visualização do relâmpago não foi possível.

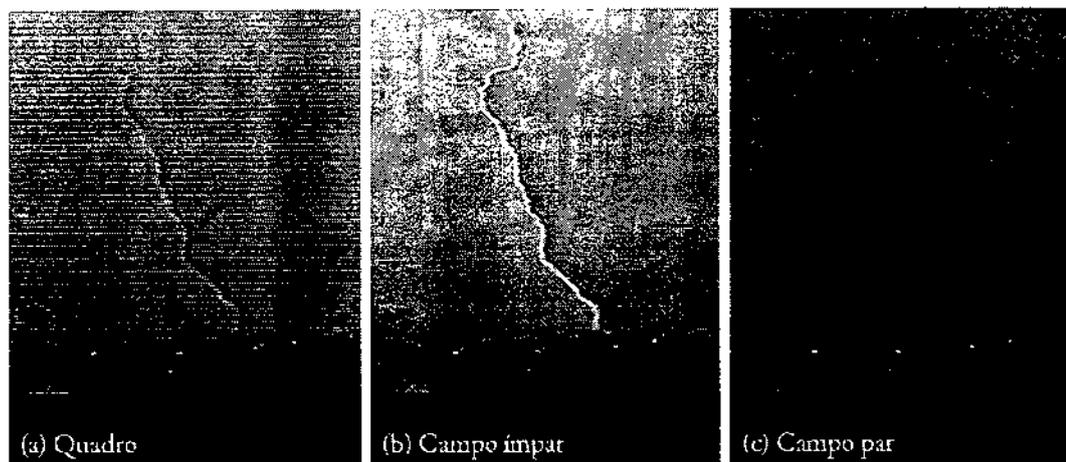


Figura 3.1: Exemplo de uma imagem tratada: (a) mostra-se a descarga em uma precisão de 30 milissegundos; (b) e (c) mostram os campos separados, pares e ímpares respectivamente, melhorando a precisão para 17.6 milissegundos.

## 3.2 Harfa

O Harfa é um programa que pode ser utilizado para fazer análise fractal e análise harmônica de imagens digitalizadas (maiores detalhes encontram-se no Apêndice A). A análise harmônica

consiste em representar a imagem em 1 dimensão ou em 2 dimensões. A análise fractal pode determinar a dimensão fractal da imagem por meio da técnica de contagem de caixas. O Harfa foi escolhido por ser de fácil uso, permitir controles de parâmetros e possibilitar a criação de uma metodologia própria para a análise de relâmpago. Os passos para a obtenção da dimensão fractal no Harfa são:

- abertura da figura a ser analisada, que está salva em padrão TIFF ou BMP;
- transformação da imagem em tons de cor cinza;
- utilização da Análise Dinâmica para estabelecer um patamar, em que observa-se um intervalo de dimensão fractal;
- informação dada pelo patamar serve de parâmetro para estabelecer a provável dimensão fractal;
- emprego da Análise por contagem de caixas, utilizando os valores do intervalo patamar para escolha da intensidade de tons de cinza;
- resultado gráfico da dimensão fractal por análise de contagem de caixas é formado, sendo possível verificar a dimensão fractal da imagem.

Ressalta-se que cada evento deve ser analisado de forma específica, pelas suas características físicas e por seus padrões numéricos.

### 3.3 Digitalizador de Imagens

As imagens de relâmpagos ainda podem ser digitalizadas por programas capazes de demarcar o canal e fornecer as coordenadas, em um sistema referencial arbitrário, de pontos ao longo do canal e das ramificações. Esses recursos serão utilizados em fase mais adiante deste trabalho, para análise da tortuosidade do canal.

## Capítulo 4

# Resultados obtidos

Apresentam-se de forma preliminar os resultados de análise do canal do relâmpago: (a) quanto à ramificação, com o programa Harfa e (b) quanto à tortuosidade, com um processo de digitalização do canal. Uma análise sucinta também é apresentada.

### 4.1 Obtenção da Dimensão Fractal

Em uma primeira análise como um teste padrão, utilizando o Harfa como ferramenta de estudo, pode-se obter um resultado satisfatório para a dimensão fractal do triângulo de Sierpinski (uma figura padrão com comportamento fractal), em que se encontra o valor de  $1.58 \pm 0.01$  na dimensão (maiores detalhes no Apêndice A). As figuras A.1 a A.7, no apêndice mostram os procedimentos executados e o resultado obtido na análise do triângulo de Sierpinski. Pelo método teórico, resolvendo conforme os conceitos matemáticos, encontra-se o resultado de 1.58 na dimensão. Em uma segunda etapa de análise preliminar, foram escolhidas duas imagens diferentes para análise. Uma imagem consiste na galharia de um arbusto (figura 4.1) e a outra imagem é de um relâmpago ramificado (figura 4.4). Na figura da galharia do arbusto, utilizando o método de contagem de caixas, pode-se caracterizar um resultado satisfatório, quando a intensidade de pixels em tons de cinza (0 a 255) escolhida foi de  $\leq 112$ . Analisando pelo *Fractal Analyses-Range*, denominado aqui como "Análise Dinâmica Fractal", pode-se observar a formação de um patamar, onde a formação da galharia (nitidez) se es-

taciona aproximadamente para valores de intensidade entre 102 a 114, onde a imagem está bem definida. Nesse intervalo, a dimensão fractal caracteriza-se em 1,6 um valor médio. O gráfico capaz de oferecer estas informações é denominado de "Espectro Fractal" (figura A.7), em que a dimensão fractal corresponde a uma figura em que houve mascaramento de pixels (pixels abaixo do valor arbitrado tornam-se preto intenso (255) e acima branco (0) intenso, ou vice-versa). Após o valor de intensidade de 114, manchas e pontos começam a descaracterizar o objeto de estudo, o que produz distorção nos resultados. O valor verificado nas caixas que contêm os pixels Pretos e pixels Pretos e Brancos, que definem a ramagem e a sua fronteira, é igual a 1,6084, com uma incerteza de  $\pm 0.0066$ . Quanto as caixas somente com pixels Preto e Branco, que definem a fronteira da ramagem, o resultado da dimensão foi de 1,4450, com uma incerteza de  $\pm 0,0324$  (figura 4.2), as dimensões não tem que ser idênticas, mas consistentes. De mesmo modo, a imagem do relâmpago também apresentou uma dimensão considerada satisfatória para uma intensidade  $\leq 60$ , pela nitidez com que o canal se apresenta. Na análise dinâmica, o patamar estabeleceu-se nos valores de intensidade entre 50 e 60 (figura 4.6). Após o valor de intensidade de 60, há uma diminuição progressiva da qualidade da imagem em relação a ramificação, descaracterizando a ramificação do relâmpago. O resultado obtido na Análise Fractal por contagem de caixas para Branco + Preto e Branco (canal e fronteira) foi de 1.4770, com uma incerteza de  $\pm 0.0079$  e para Preto e Branco, que é a fronteira do canal 1.3859, com incerteza de  $\pm 0.3859$  (figura 4.5).

A ferramenta mostra-se eficaz, capaz de estabelecer um valor médio e o erro, estabelecendo uma forma objetiva de analisar as ramificações. Com isso, como resultado, conseguiu-se uma ferramenta capaz de classificar objetivamente os relâmpagos quanto às ramificações. Ressalta-se, assim, que toda uma metodologia envolvendo filmagem, aquisição de imagem, processamento de características de objetos de estudo documentados visualmente, e procedimento da obtenção da dimensão fractal, foi implementada neste trabalho. Isto provê novos recursos de classificação dos relâmpagos (isto é, caracteriza uma nova ferramenta de investigação), permitindo estudar futuramente a relação da morfologia da descarga atmosférica com o estado da atmosférica.

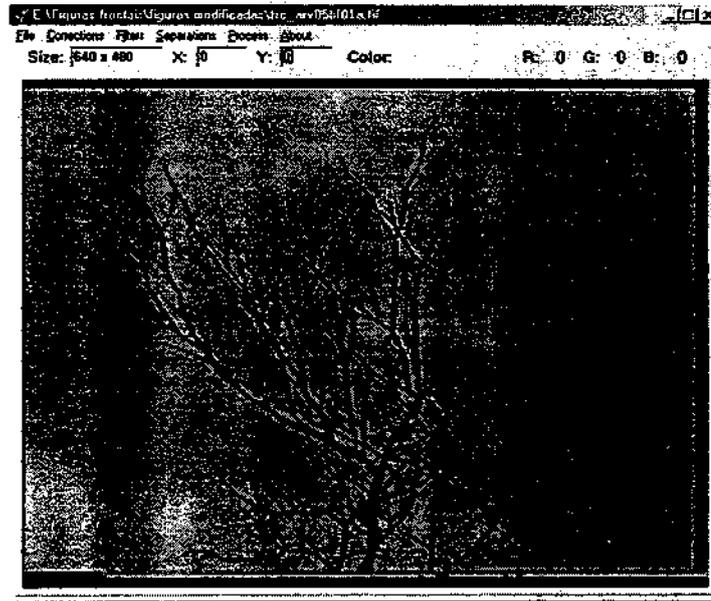


Figura 4.1: Galharia de arbusto utilizada para análise de dimensão fractal no Harfa.

## 4.2 Obtenção do caminho digitalizado

Com a digitalização do canal, pode-se obter uma tabela, que demarca em pares ordenados o canal do relâmpago, tomando como base, os eixos de referências  $x, y$  arbitrados convenientemente. Desta forma é possível estabelecer a mudança de direção do canal, bem como o comprimento de passo do canal. Essa informação permitirá discutir aspectos da eletrodinâmica da descarga atmosférica. Outra técnica fractal a ser utilizada em breve com essa informação é a técnica da divisão escalar do canal principal.

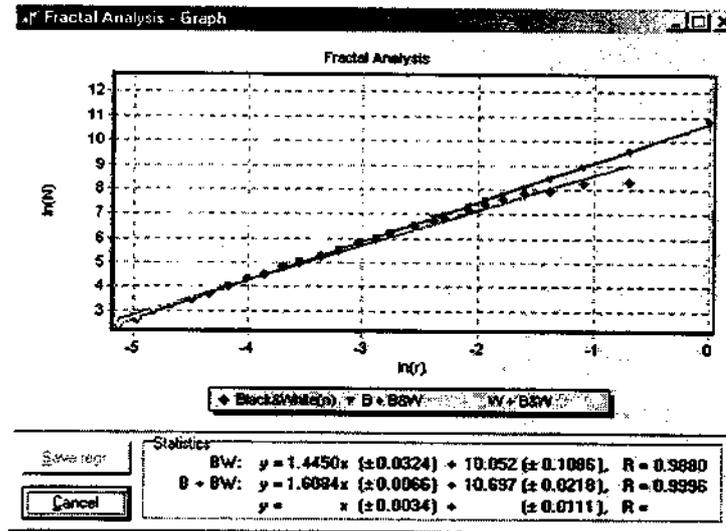


Figura 4.2: Resultado da análise da galharia de um arbusto, em que a inclinação da reta ajustada da a dimensão fractal.

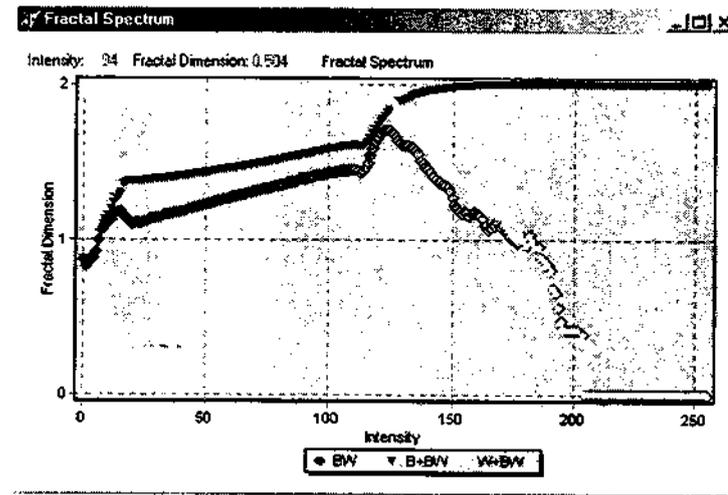


Figura 4.3: Resultado de análise da galharia, por meio Análise Dinâmica Fractal, para estimar o erro envolvido na cálculo da dimensão fractal.

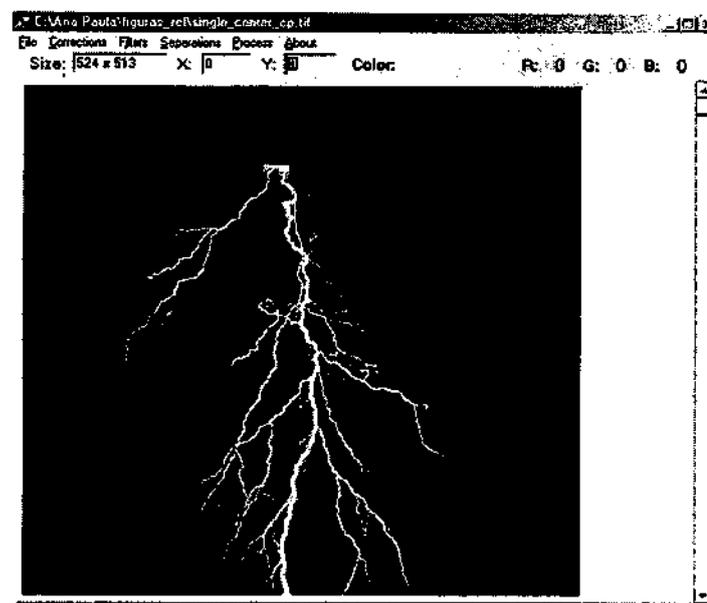


Figura 4.4: Relâmpago ramificado utilizado na análise de dimensão fractal no Harfa.

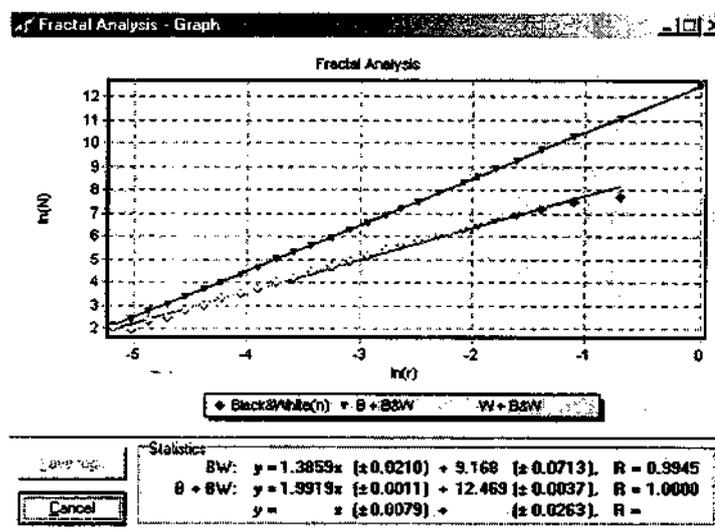


Figura 4.5: Resultado da análise do relâmpago ramificado, em que a inclinação da reta ajustada dá a dimensão fractal.

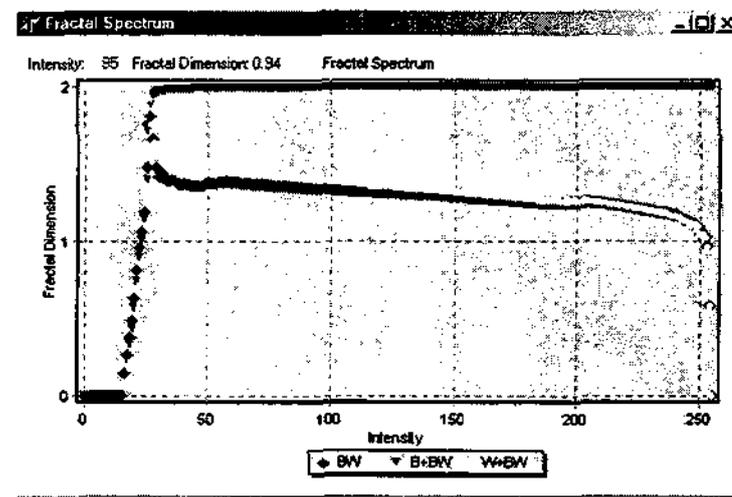


Figura 4.6: Resultado da análise do relâmpago ramificado, por meio da Análise Dinâmica Fractal.

Tabela 4.1: Pares ordenados demarcados de um relâmpago digitalizado.

X	Y	X	Y	X	Y
83	508	174	372	165	202
87	500	174	380	167	197
87	493	178	372	171	192
89	488	178	367	172	187
92	483	182	360	172	180
95	476	183	353	172	170
98	469	184	346	172	160
98	464	183	339	175	152
102	459	180	331	176	157
101	464	177	325	173	141
106	453	180	317	175	134
111	449	178	308	178	129
116	446	177	302	181	123
121	444	175	290	184	117
126	441	175	282	185	111
131	438	177	275	186	101
136	434	176	266	188	195
141	433	178	260	189	89
147	428	175	254	192	82
149	423	176	247	193	76
150	416	174	239	196	70
155	413	170	229	196	61
160	407	170	224	196	50
165	403	170	216	196	44
170	402	167	209	194	39

## Capítulo 5

# Conclusões

Caracterizou-se neste trabalho uma metodologia para análise fractal dos relâmpagos. A ferramenta Harfa, selecionada entre outras, mostra-se prática no manuseio, com um algoritmo computacional ágil, e com cálculos matemáticos escorregios (incluindo tanto o valor da determinação da dimensão fractal, quanto o erro de medida envolvido). Portanto, a par com uma metodologia implementada de análise fractal (aquisição de imagens, tratamento e processamento), conta-se com uma ferramenta consistente para um estudo objetivo dos relâmpagos quanto a propriedade da ramificação. Essa determinação do índice fractal permitirá classificar os relâmpagos, em um estudo da morfologia, de forma relacioná-las oportunamente com o estado físico da atmosfera.

Com esse trabalho de iniciação científica, introduziu-se o estudante no conhecimento criativo científico, na prática de atitude e da crítica científica e em um exercício de capacitação profissional.

Importância deste estudo: É a primeira vez que se faz um estudo sistemático da análise de morfologia no Brasil, sendo que as características dos relâmpagos identificadas associam-se à estados da eletrodinâmica atmosférica. OS resultados deste estudo auxiliam nas forças internacionais de entendimento do fenômeno relâmpago

Pesquisas para continuação do trabalho:

- Aprimoramento da metodologia de análise fractal;

- Aplicação da análise a eventos de relâmpagos de interesse.

## Referências Bibliográficas

- Alonso, M.; Finn, E. J. **Física: Um Curso Universitário.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1972. v. 2, Cap. 14, p. 1-5.
- Borovsky, E. J. Lightning energetics: Estimates of energy dissipation in channels, channel-radii, and channel-heating risetimes. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D10, p. 11537-11553, 1998.
- Ferrara, N. F.; Prado, C. P. C. **Caos : Uma Introdução.** São Paulo: Edgar Blücher, 1995. Cap. 3, p. 253-280.
- Gin, R. B. B. **Estudo Coordenado de um Sistema de Tempestade sobre a América do Sul.** São José dos Campos. 141 p. INPE-5388-TDI/477. Mestrado em Ciência Espacial / Geofísica Espacial - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Abril 1992.
- Gleick, J. **Caos, a criação de uma nova ciência.** Campus, 1990.
- Goody, R. M.; Walker, J. C. G. **Atmosféras Planetárias.** São Paulo: Edgar Blücher, 1975. Cap. 3, p. 40-64.
- Hill, R. D. Analysis of irregular paths of Lightning Channel. **Journal of Geophysical Research**, , n. 73, p. 1897-1906, 1968.
- Lupò, G.; Petrarca, C.; Tucci, V.; Vitelli, M. EM Fields associated with lightning channels: on the effect of tortuosity and branching. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compability**, v. 42, n. 4, p. 394-404, 2000.
- Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The Atmosphere.** 2. ed. Englenwood Cliffs, 1982.

- MacGorman, D. R.; Rust, W. D. **The Eletrical Nature of Storms.** Oxford University, 1998.
- Mendes, O. J.; Domingues, M. O. Introdução à Eletrodinâmica Atmosférica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 01-17, março 2002.
- Richard, M.; Walker, J. C. G. **Atmosferas Planetárias.** Edgard Blücher, 1975.
- Saba, M. M. F. **Estudo de Condutividade, Campo Elétrico e Relâmpagos Associados a Nuvens de Tempestade.** São José dos Campos. Tese – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Junho 1997.
- Serway, R. A. **Física 3 Para Cientistas E Engenheiros.** Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- Soares, R. Dimensão Fractal. internet, Janeiro 2002. Online: <http://www.terravista.pt/-BaiaGatas/1243/home.htm>.
- Spadotto, A. J.; Guerrini, J. A.; Rezende, M. A. Desenvolvimento de um Método Didático para Determinação da Dimensão Fractal. In: Reunião Anual da S B P C. **Runião Anual da S B P C.** Belo Horizonte: Anais Belo Horizonte, 1997. p. 19.
- Spadotto, A. J.; Seraphin, O. J. Determinação da dimensão fractal pela fórmula Spadotto e pelo método MC-D. Revista online, 1997. Online: <http://www.fca.ensp.br/posgradua/-Energia/revista/v12n4-97/spadotto.pdf>.
- Stoyan, D.; Stoyan, H. **Fractal Random Shapes And Point Fields : Methods of Geometric Statistics.** John Wiley and Sons, 1994. Cap. 3, p. 3-44.
- Takagi, N.; Takeuti, T.; Nakai, T. On the occurrence of positive ground flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 9905-9909, 1986.
- Takayasu, H. **Fractals in the Physical Sciences.** Jonh Wiley and Sons, 1990.
- Uman, M. A. **All About Lightning.** New York, Dover, 1987. Cap. 6, p. 47-53.

## Apêndice A

### A ferramenta Harfa

O programa Harfa faz a análise da dimensão fractal de imagens digitalizadas por meio da técnica de contagem de caixas. Os resultados podem ser obtidos após um trabalho que é feito na imagem em que a mesma é transformada pelo processo chamado de separação em tons de cinza. Quando uma imagem é colorida, ela possui três números de pixel no padrão, que devem ser isoladas e/ou convertidos – o RGB –. É quando ela se torna monocromática, tons de cinza, que fica sendo um padrão de cor, que vai do preto até o branco.

Após a transformação, deve-se escolher o processo que será utilizado. No caso deste estudo, utiliza-se o método da contagem de caixas. Uma caixa de escolha de dados será aberta, que deve ser usada para medir a intensidade (quantidade de pixels) da cor que se deseja ( cor que vai do branco até o preto), que é determinada por um número que vai de 0 até 255. A intensidade deve ser escolhida manualmente ou selecionada com o acionamento do mouse com o cursor sobre o desenho. Pode-se escolher também, conforme a necessidade, se a intensidade deve ser maior ou menor que aquele número, ou seja, os pixels que devem estar dentro da análise.

O botão denominado "executar mascaramento" deve ser ativado para que os pixels que estão dentro da faixa de intensidade sejam separados dos demais, de forma a ser feita a análise da dimensão fractal do objeto de interesse na imagem. Ainda é possível escolher se a análise será feita por passos discretos (quantidade de vezes que será dividida a figura em caixas) ou por logaritmos "contínuos".

Nos exemplo mostrados, utilizou-se o método discreto. Após preenchida todas as opções, deve-se ativar o botão iniciar para que a análise seja efetuada, resultando em um gráfico.

Nesse gráfico, encontram-se valores de três dimensões diferentes: aquela da análise de caixas que contém pixels Branco e Pretos; Preto + Branco e Preto; e Branco + Preto e Branco. No caso das análise realizadas nos exemplos, foi levado em consideração o resultado dos pixels BRANCO + BRANCO E PRETO, mas isso deve ser analisado de acordo com a necessidade da análise, isto é, com a escolha do objeto fractal. Outro recurso ajuda na escolha da intensidade ideal, é a Análise Dinâmica, que calcula todas as intensidades, de 0 a 255, resultando em um gráfico, que mostra pela nitidez so objeto na imagem, o valor mais propício para a intensidade que deverá ser utilizada na para caracterizar a dimensão fractal (figura A.7) . A seguir, pode-se observar as figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, as várias etapas com o auxílio do Harfa. A análise prévia foi feita utilizando o triângulo de Sierpinski, em que uma dimensão de aproximadamente 1.58, com uma incerteza de  $\pm 0.01$  pode ser observada.

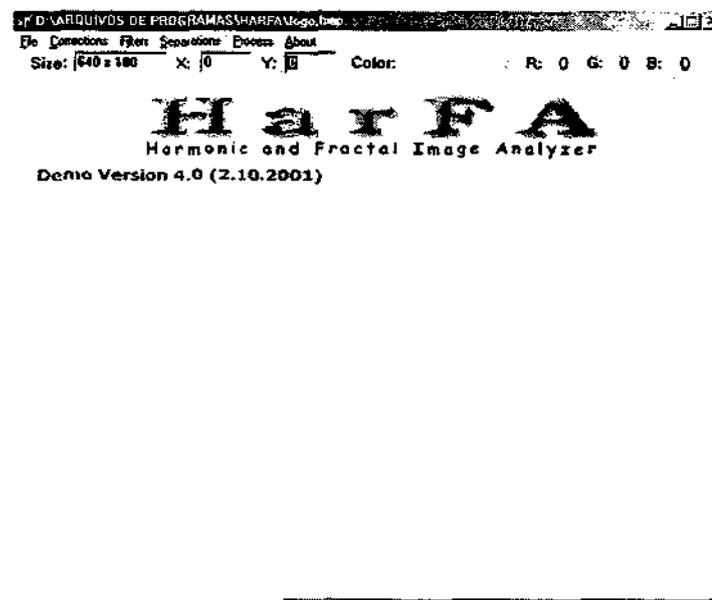


Figura A.1: Interface do Harfa

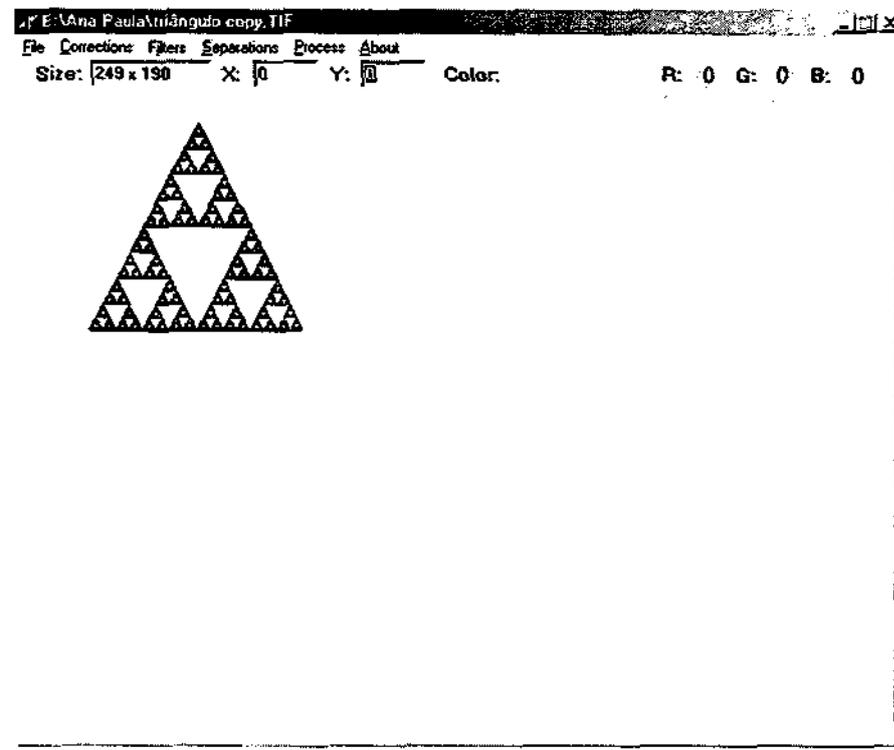


Figura A.2: Harfa com a figura a ser analisada: o triângulo de Sierpinski.

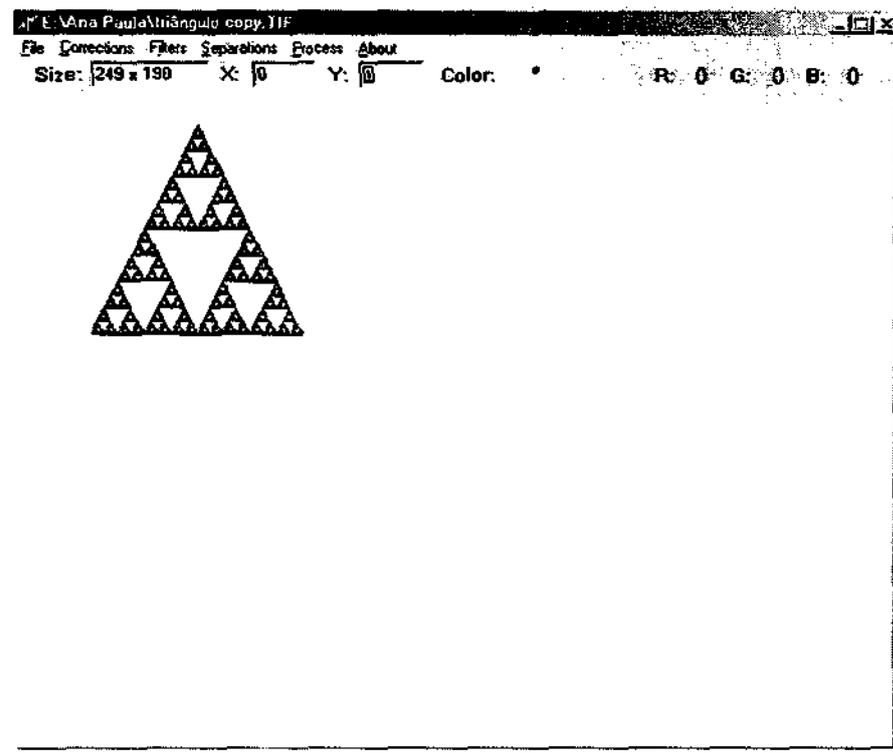


Figura A.3: Resultado da separação de cores e conversão em tons de cinza.

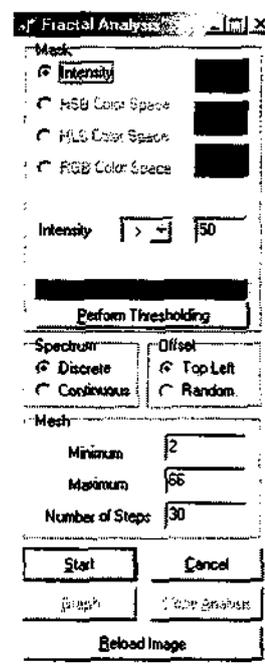


Figura A.4: Janela de opções para análise fractal por técnica de contagem de caixas do Harfa.

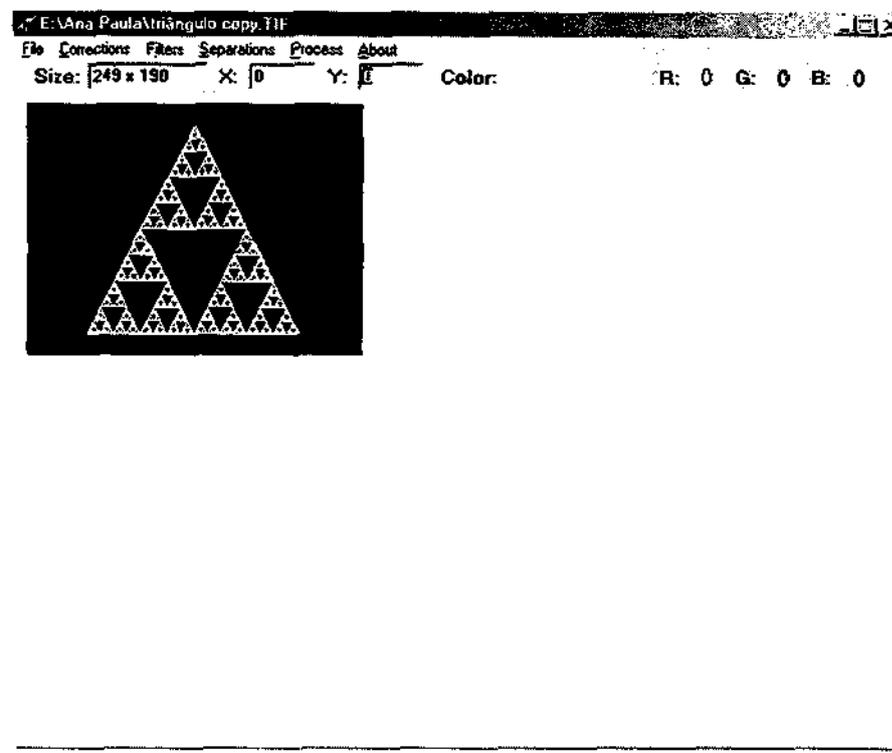


Figura A.5: Mascaramento de pixels e execução do algoritmo de contagem de caixas.

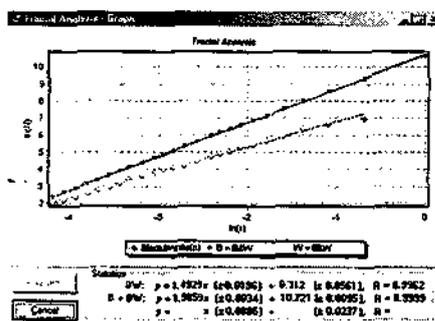


Figura A.6: Resultado gráfico da análise fractal, com a dimensão indicada pela inclinação da reta ajustada.

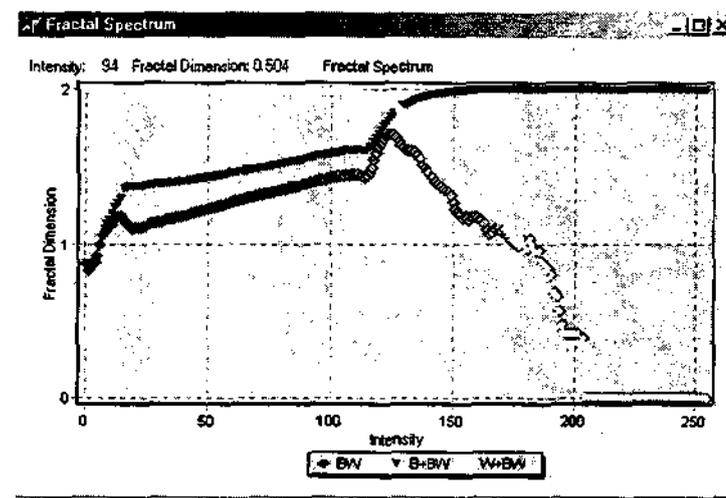


Figura A.7: A Análise Dinâmica Fractal para estimar o erro no cálculo da dimensão fractal. Essa figura refere-se a um relâmpago analisado.