

**Bolsista**

*Luciana Maria Crespan*

**Orientador**

*Dr. Mangalathayil Ali Abdu*

**Título**

*Estudo da Dinâmica da Ionosfera Equatorial*

**São José dos Campos\***

**2000**

## **AGRADECIMENTOS**

- a **CLAUDIO JOSÉ CRESPAN** e **LUCIA CRESPAN**, meus pais, que sempre me apoiaram ;

- aos Doutores **MANGALATHAYIL ALI ABDU** e **JOSÉ HUMBERTO ANDRADE SOBRAL**, do departamento de Geofísica Espacial / CEA do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais ;

- aos colegas diários de trabalho **MARIA GORETI DOS SANTOS AQUINO**, **LÚCIA DE ALMEIDA TERRA LIMIRO**, **ALCIONE MOURA DA SILVA**, **DALLI TORRES CAMPOS**, **VANDERLY BENEDITO MARTINS MOTA**;

- ao CNPq pelo apoio financeiro concedido através de bolsas.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>6</b>
<b>IONOSFERA</b>	<b>6</b>
1.1 Ionosfera	
1.2 Equipamentos para coleta de dados	
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>11</b>
<b>DIGISSONDA 256</b>	<b>11</b>
2.1 Digissonda 256	
2.2 Funcionamento da Digissonda 256	
2.3 Análise dos dados	
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>15</b>
<b>ESTUDO DA IONOSFERA COM RADAR</b>	<b>15</b>
3.1 Estudo da Ionosfera com radar	
3.2 O eletrojato Equatorial	
3.3 Radar	
3.3.1 Radar de São Luis (Maranhão)	
3.3.2 Campanha	
3.4 Análise dos dados	

## LISTA DE FIGURAS

**FIGURA 1.1** - Camadas Atmosféricas - Ionosfera.

**FIGURA 1.2** - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas.

**FIGURA 1.3** - Ionograma.

**FIGURA 2.1** - Ionograma.

**FIGURA 2.2** - Gráfico dos parâmetros  $h'F$ ,  $h'F(3)$ ,  $hmF2$ , Peak.

**FIGURA 3.1** - Localização geográfica e geomagnética dos radares.

**FIGURA 3.2** - Fotografia do conjunto de antenas.

**FIGURA 3.3** - Mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico, utilizando o feixe oblíquo, no dia 31 de agosto de 1998.

## Introdução

Este trabalho é uma continuidade da bolsa anterior e tem como objetivo, iniciar com o estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial, focalizando as irregularidades do eletrojato. Os estudos foram desenvolvidos baseados em dados do eletrojato, obtidos pelo radar de espalhamento coerente de São Luís, e por sondagens ionosféricas realizadas por ionossondas localizadas em São Luís, Cachoeira Paulista e Fortaleza.

O trabalho inicia-se com uma descrição da ionosfera, suas principais características, um breve histórico sobre a sua descoberta, a importância do seu estudo e a importância da divulgação do comportamento da ionosfera sobre a região brasileira, e uma pequena descrição sobre as diferentes regiões ionosféricas. São apresentados também descrições de alguns equipamentos utilizados no monitoramento ionosférico, tais como: carga útil abordo de foguetes de sondagem; instrumentos baseados em satélites; sondagem ionosférica com equipamentos baseados na superfície, sendo, ionossondas digitais, digissondas e radar ionosférico, dos quais os dois últimos equipamentos citados, foram utilizados neste trabalho.

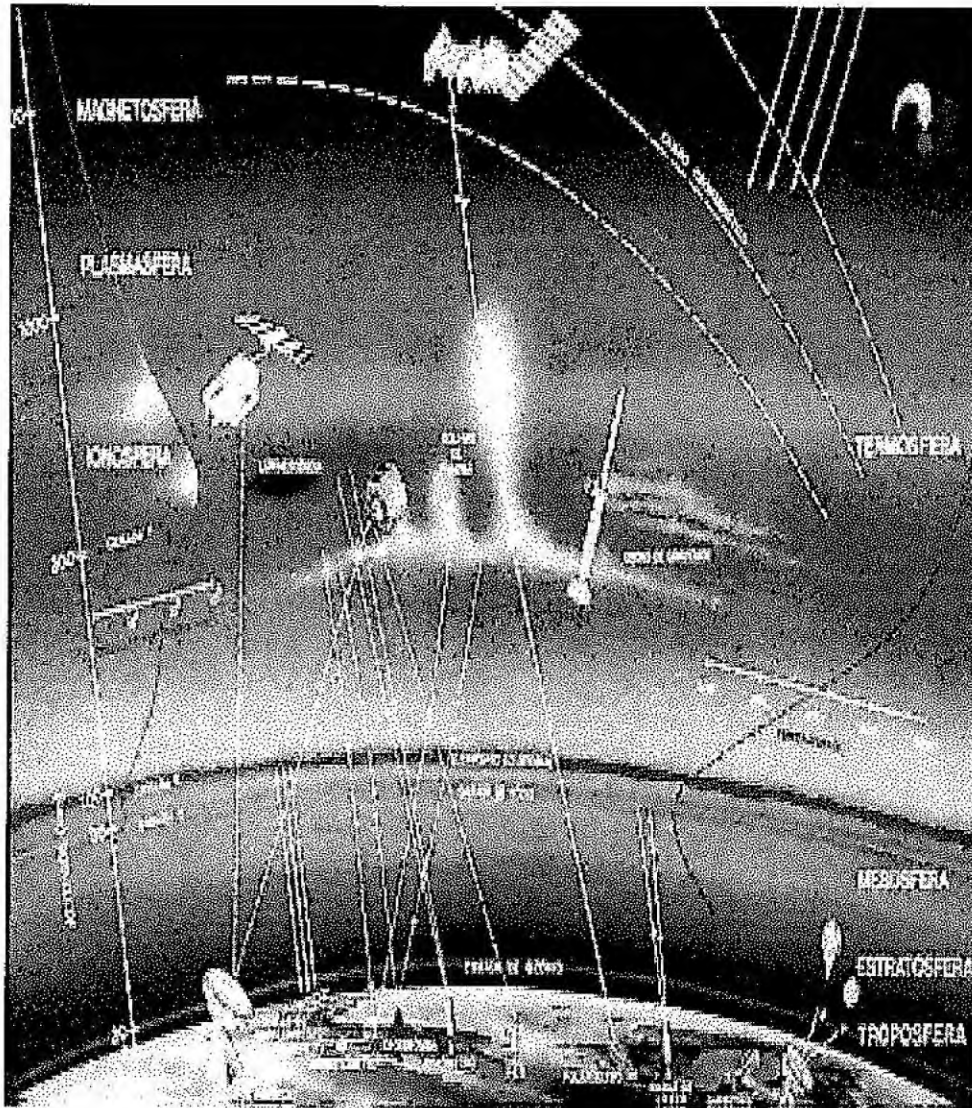
## CAPÍTULO 1

---

### 1.1 IONOSFERA

A atmosfera terrestre de acordo com a figura 1.1 é dividida em regiões de acordo suas características de temperatura, densidade e altura: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Juntamente com a termosfera está a ionosfera que é uma camada ionizada, altamente condutiva. A ionosfera está situada entre aproximadamente 50 - 1000 Km, e atinge a densidade máxima a ~ 350 Km, tendo a propriedade de alterar ondas eletromagnéticas de alta frequência, refratando-as ou refletindo-as. Esta camada é muito importante às comunicações, inclusive a comunicação via satélite, pois fenômenos ionosféricos podem atenuar ou interferir no sinal propagado ao longo delas.

A recombinação de seus íons e elétrons depende da irradiação solar, pois durante o dia tende a aumentar e durante a noite tende a diminuir sua densidade.



**FIGURA 1.1 - Camadas Atmosféricas - Ionosfera**

De acordo com sua variação e altura, a ionosfera está dividida em máximos de produção, formando camadas, como mostra a figura 1.2, cada uma delas com suas propriedades e características próprias, sendo elas:

- Região D - (75 Km - 95 Km)

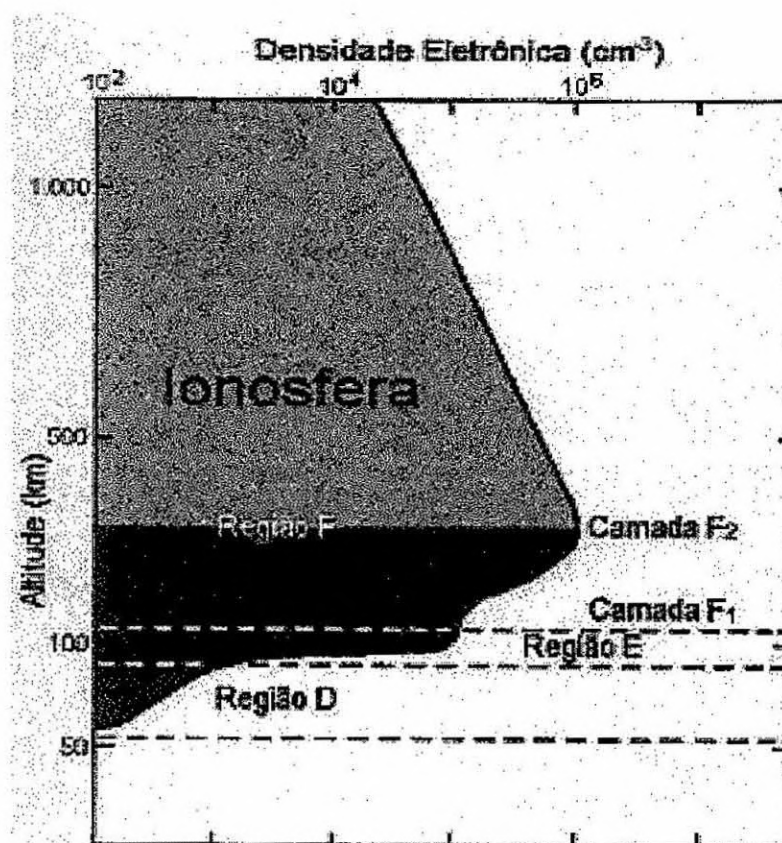
É a região inferior da ionosfera, sendo esta a região de maior densidade atmosférica do que nas outras e ainda é a parte mais complexa do ponto de vista químico. Essa região é responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência que são refletidas nas camadas superiores.

- Região E - (95 Km - 150 Km)

É a região de máxima condutividade elétrica, portanto a região onde se desenvolvem as correntes elétricas ionosféricas. Esta camada está localizada entre as regiões D e F, seu limite com a região D é tomado como 90 Km e com região F é 150 Km.

- Região F - (acima de 180 Km)

É a região superior da ionosfera, onde se encontram as camadas refletoras mais importantes, a camada F2 normalmente encontrada, a camada F1 encontrada nas regiões temperadas.



**FIGURA 1.2** - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas em função da densidade eletrônica.



## 1.2 EQUIPAMENTOS PARA COLETA DE DADOS

Para monitorar a ionosfera é necessário descrever alguns equipamentos disponíveis para a obtenção dos dados, como:

**CARGA ÚTIL:** São sensores acoplados em foguetes que servem para coletar dados sobre determinadas ocorrências físicas que tentam minimizar os problemas e melhorar os estudos da ionosfera, ele ainda serve de suporte tecnológico para o desenvolvimento de satélites.

**DIGISSONDA:** Possui o mesmo princípio de funcionamento da ionossonda, mas é um equipamento digital, onde os dados são gravados em fitas "streamer", sendo este um equipamento mais moderno e preciso. Esse equipamento será descrito mais detalhadamente adiante, pois foi utilizado nesse trabalho.

**IONOSSONDA:** É um equipamento que transmite e recebe pulsos de energia eletromagnética. O sinal recebido é processado e apresentado em forma de um gráfico, denominado ionograma, como mostra a figura 1.3, que representa o perfil da densidade eletrônica das camadas ionosféricas.

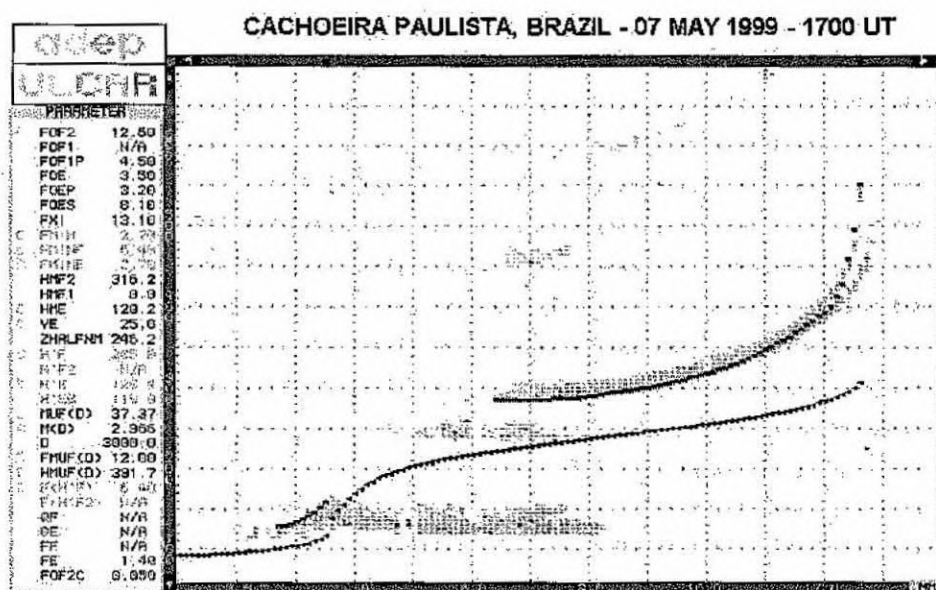


FIGURA 1.3 - Ionograma

**SATÉLITE:** Através de cargas úteis a bordo de satélites é possível efetuar sondagem do topo da ionosfera, completando as informações das digissonda.

**RADAR:** Este equipamento é chamado de radar de espalhamento coerente, foi desenvolvido para realizar medidas da dinâmica das irregularidades do eletrojato e de bolhas de plasma na ionosfera. Esse equipamento também será descrito mais detalhadamente adiante, pois foi utilizado nesse trabalho.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 DIGISSONDA 256

A digissonda 256 é uma ionossonda digital e possui o mesmo princípio de funcionamento da ionossonda convencional. Ela é totalmente informatizada, e os dados são gravados em fitas "streamer", portanto mais moderna e precisa.

O avanço tecnológico permitiu o surgimento da ionossonda digital ou digissonda. A digissonda 256 desenvolvida pela Universidade de Lowell - USA, pode operar como uma ionossonda convencional de incidência vertical digitalizada tornando-se ágil e fácil o manuseio e o processamento dos dados obtidos após a sondagem.

A digissonda 256 é capaz de medir todos os itens dos ecos ionosféricos como pode ser visualizado na tabela abaixo onde há uma comparação entre os itens ionosféricos observáveis pela ionossonda e pela digissonda.

Observáveis	Ionossonda	Digissonda 256
Altura	Sim	Sim
Amplitude	Experimental	Sim
Fase	Experimental	Sim
Polarização	Não	Sim
Ângulo de chegada	Não	Sim
Doppler	Não	Sim

**TABELA** - Comparação entre os parâmetros observáveis pela ionossonda e pela digissonda 256.

Pode-se perceber a versatilidade do instrumento aumentou, favorecendo a realização de medidas de variados parâmetros ionosféricos além de calcular praticamente em tempo real o perfil de densidade eletrônica através de um programa instalado em um microcomputador acoplado.

## **2.2 FUNCIONAMENTO DA DIGISSONDA 256**

A digissonda 256 consiste basicamente dos seguintes subsistemas:

- um transmissor pulsado de 10kW de potência de pico;
- uma unidade de receptor de sinais de rádio-frequência e processador;
- microcomputadores acoplados;
- antenas transmissoras;
- arranjo de 4 ou 7 antenas receptoras;

A digissonda pode operar varrendo numa faixa de frequência de 0,5 a 30 Mhz. Os sinais são transmitidos por uma antena (tipo delta) que permite transmissão num feixe de  $\sim 90^\circ$  ( $\pm 45^\circ$  de vertical). Operando no modo pulsado, a digissonda 256 emite pulsos de alta frequência os quais são refletidos em diversas alturas da ionosfera e seus ecos são recebidos através de um arranjo de antenas e transformados em sinais digitais por um sistema de aquisição e tratamento de dados.

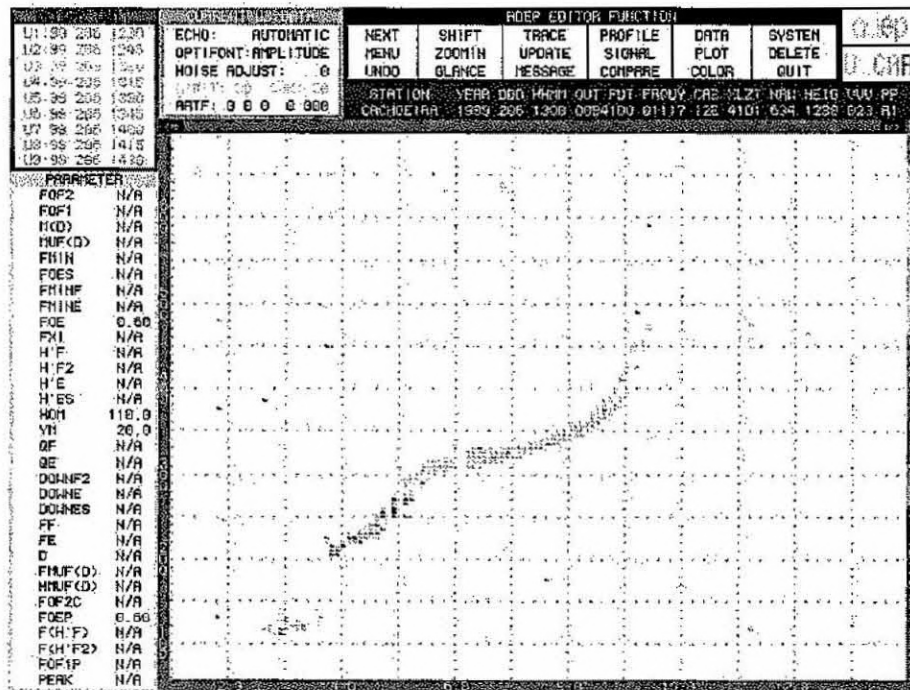


FIGURA 2.1 - Ionograma

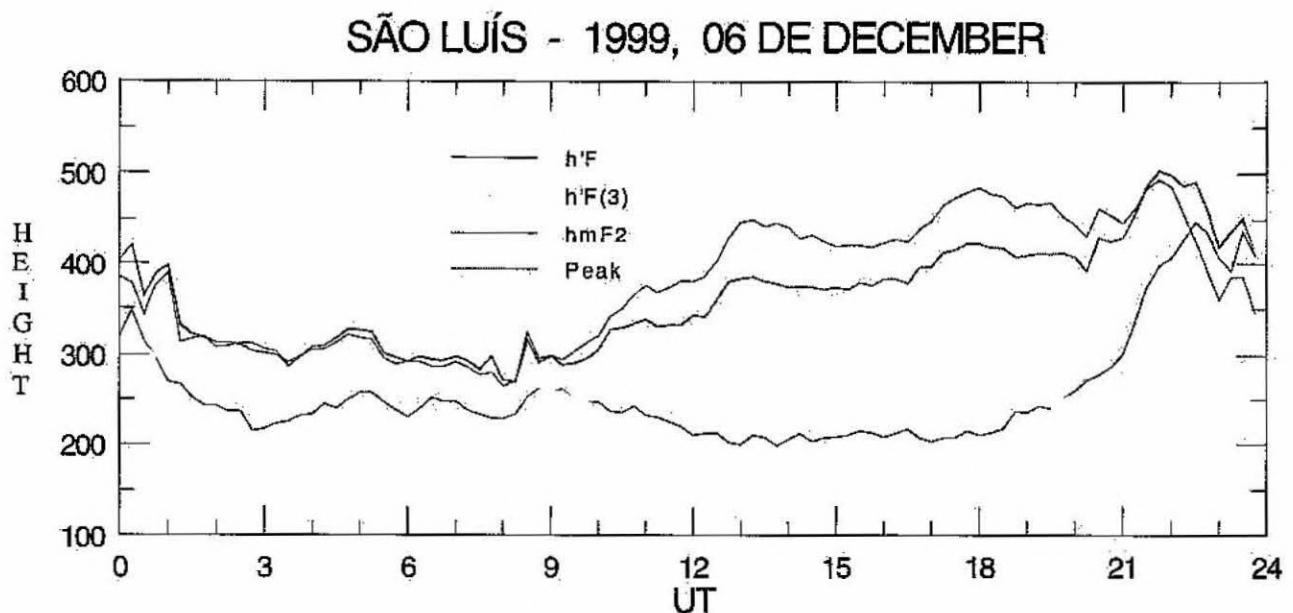


FIGURA 2.2 - Gráfico dos parâmetros h'F, h'F(3), hmF2, Peak.

## 2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Foram processados os dados coletados pelo equipamento acima descrito, durante o período de: Outubro/1994; Novembro/1994; Dezembro/1994; Janeiro/1995; Fevereiro/1995; Março/1995; Abril/1995.

O parâmetro utilizado nesse processamento foi o  $h'F$ , que é a altura virtual mínima do traço extraordinário em toda região F.

O esquema de processamento foi seguido da seguinte forma:

Primeiramente, foram selecionados o parâmetro  $h'F$  do período desejado e em seguida calculado a velocidade de subida da camada, através deste cálculo será gerado um gráfico de altura versus hora, no intervalo das 18h00 às 19h00 (hora local), pelo software MICROCAL ORIGIN™, onde também será gerada uma planilha, que através desta, será gerado um gráfico das velocidades máximas de cada dia do mês programado, durante o intervalo de tempo estipulado.

## CAPÍTULO 3

---

### 3.1 ESTUDO DA IONOSFERA COM RADAR

Devido a sua complexibilidade e variabilidade, a ionosfera necessita ser monitorada continuamente através de intensas atividades de medidas de modo a fornecer um quadro claro da dinâmica da região.

Esta camada altamente condutiva, apresenta uma variedade de irregularidades de diferentes tamanhos. Estas irregularidades ionosféricas são variações na densidade eletrônica local e são fortemente alinhadas ao longo do campo geomagnético, estão presentes dia e noite, exceto durante curtos períodos no alvorecer e no anoitecer. Uma dessa irregularidade é o eletrojato equatorial.

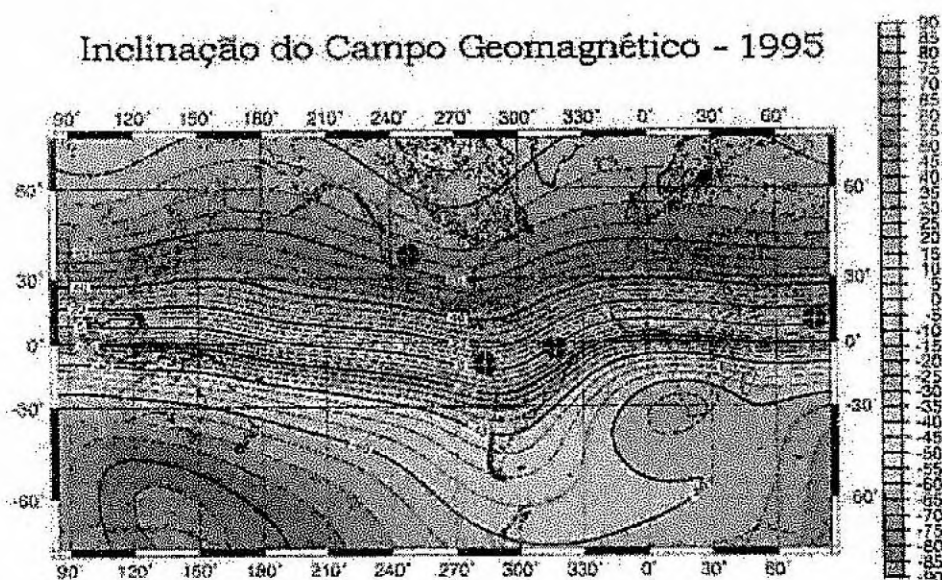
### 3.2 O ELETROJATO EQUATORIAL

O eletrojato equatorial, é uma corrente elétrica que flui ao longo do equador magnético, na região E da ionosfera. Seu sentido é para leste durante o dia e para oeste durante a noite. É dirigido por um sistema global de campos elétricos e seu confinamento na região mencionada é devido a orientação horizontal do campo magnético e as condutividades ionosféricas locais.

No eletrojato equatorial quase sempre encontramos dois tipos de irregularidades: os ecos tipo 1 e os ecos tipo 2, que dependem do sentido do eletrojato e tem sido associados às irregularidades geradas pela instabilidade de plasma, sempre dependendo do sentido do eletrojato e do gradiente de densidade.

### 3.3 RADAR

O radar de espalhamento coerente deve estar localizado no plano normal à direção do campo geomagnético. Esses radares, utilizam uma frequência de transmissão em torno de 50 MHz e uma potência de transmissão de 120kw. A figura 3.2, apresenta a localização geográfica dos radares de espalhamento de Jicamarca (Peru), Boulder (Estados Unidos), Thumba (Índia) e São Luís do Maranhão (Brasil).



**FIGURA 3.1** - Localização geográfica e geomagnética dos radares.

Na técnica de radares, uma parte do pulso de sinal transmitido é retroespalhado por uma região onde as irregularidades têm dimensão igual à metade do comprimento de onda do sinal transmitido do radar, na direção do vetor de onda do radar. No caso do radar de espalhamento estar operando a 50 MHz, como o comprimento de onda é igual a 6 m, o sinal será retroespalhado por irregularidades com comprimento em torno de 3 m.



### 3.3.1 RADAR DE SÃO LUIS ( MARANHÃO )

O radar de espalhamento, foi instalado em São Luis, onde está localizado no equador magnético e próximo ao centro do eletrojato equatorial. Este deve operar na base da faixa do VHF, sua frequência de operação é de 50MHz.

O objetivo do radar é realizar medidas da dinâmica das irregularidades do eletrojato e de bolhas de plasma na ionosfera.

Para o uso desses radares, uma única antena não será suficiente para detectar os sinais de espalhamento que são fracos, portanto, faz-se o uso de um conjunto de antenas que gera um feixe altamente direcional. Neste caso, em uma parte do circuito devemos ter uma divisão do sinal (oblíquo e vertical), alimentando o conjunto de antenas de maneira uniforme.

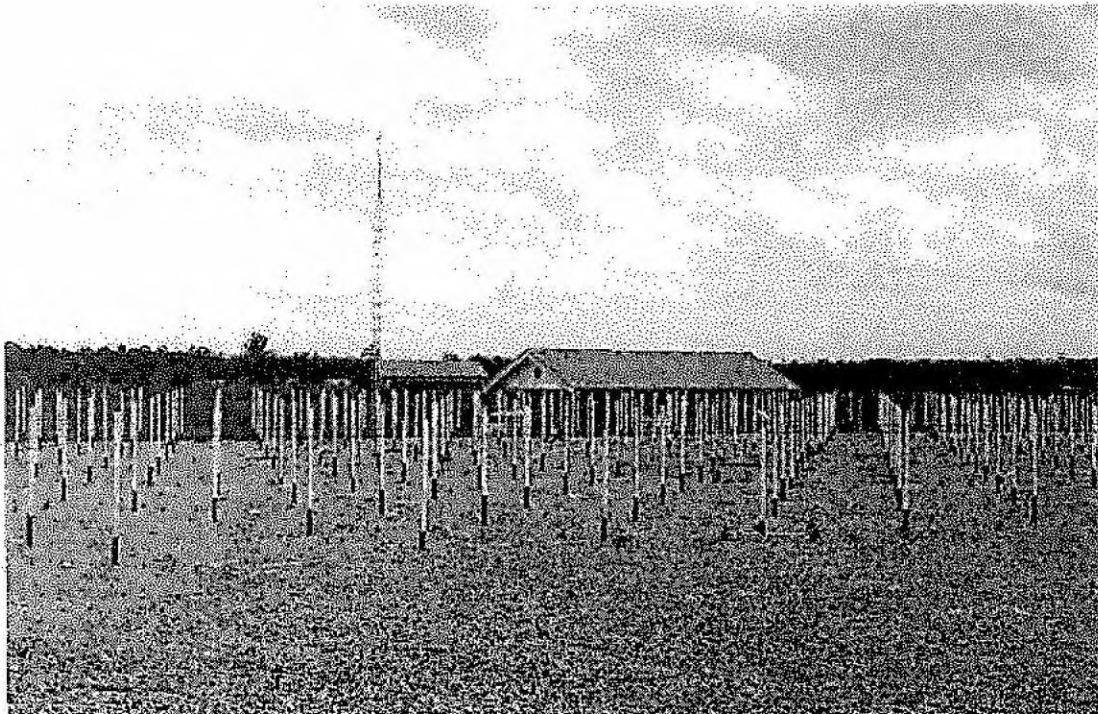
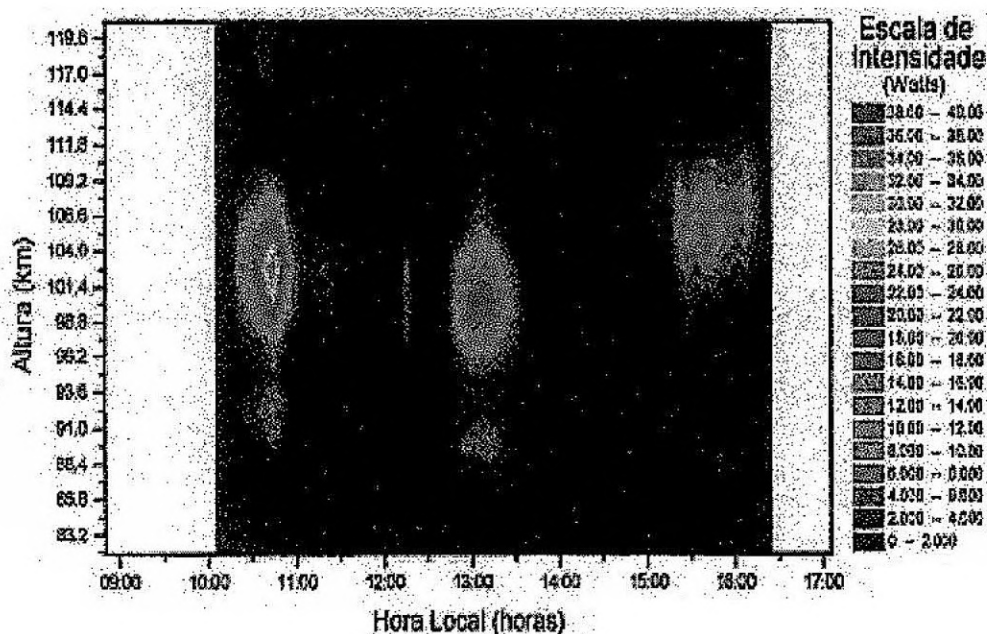


FIGURA 3.2 - Fotografia do conjunto de antenas.

### 3.3.2 CAMPANHA

Essa campanha foi desenvolvida durante o mês de dezembro de 1999 em São Luis ( Maranhão ). Nessa campanha foi possível observar somente o eletrojato, apesar de importantes estudos de espalhamentos poderem ser conduzidos com observações de radar, devido às limitações de potência impostas pelo conjunto de transmissores.



**FIGURA 3.3** - Mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico, utilizando o feixe oblíquo, no dia 31 de agosto de 1998.

### 3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Um fator importante na análise de dados do radar ionosférico de São Luís é o tempo para a sua redução. A velocidade de aquisição dos dados é muito grande, fornecendo uma grande quantidade de dados. Porém, como o sistema ainda está em fase inicial de operação, nem todos os dados estão confiáveis. Assim, para manter a confiabilidade dos resultados, optamos pela utilização da média dos melhores dados escolhidos. Isso garantiu resultados confiáveis, entretanto, o trabalho de redução ficou bastante demorado. Apesar do desenvolvimento de ferramentas computacionais, a redução de um dia de dados, isto é, a geração de um mapa diário de variação temporal de intensidade x altura, levou em torno de duas semanas.

Como foi dito anteriormente o grande volume de dados adquiridos foi necessário estabelecer uma rotina de trabalho que envolveu desde a seleção dos dados mais representativos até a plotagem de gráficos de evolução temporal da análise espectral para uma altura específica e gráficos da evolução temporal da intensidade do sinal recebido. Assim é necessário descrever os passos que foram fundamentais para análise dos dados:

- Primeiramente, executou-se o programa **Newonly.exe**, este programa lê os dados gravados na forma bruta em binário e em seguida utiliza a transformada de Fourier para estimar o espectro da potência do sinal retroespalhado pelas irregularidades inoféricas.
- Usou-se o programa **plotspec.exe** para plotar os dados na tela e verificar cada arquivo de dados, escolheu-se dentre os dados qualificados o que representa a melhor relação sinal/ruído, ou seja, que possui o espectro mais claro e que esteja de acordo com a média dos dados do diretório.

- O programa **column1.exe** transforma os dados dos arquivos gerado pelo **Newonly.exe** de binário para ASC II.
- Utilizando o programa **MICROCAL ORIGIN™** estão sendo montadas as matrizes, nelas vão ser ajustados os valores mínimos e máximos dos eixos X e Y, para posteriormente as plotagens dos gráficos das variações temporais das amplitudes para as alturas do eletrojato.

## Comentário

Esta campanha de agosto de 1999, proporcionou os primeiros resultados de pesquisa ionosférica realizada com radar de espalhamento coerente desenvolvido no Brasil. Durante essa campanha foram coletados dados, para estudo do eletrojato equatorial.

Este trabalho se encontra em andamento, pois foram processados somente parte dos dados desta campanha e a etapa seguinte do meu trabalho será dar continuidade ao processamento dos dados dessa campanha de 1999.

## BIBLIOGRAFIA

- Kirchhoff, V.W.J.H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Setella, EDUSP, 1991.
- Kelley, M.C. **The Earth's ionosphere**. San Diego: Academic Press, 1989.
- ABDU, M. A., JAYACHANDRAN, P. T., MACDOUGALL, J., CECILE, J.F. and SOBRAL, J.H.A. **“Equatorial F region zonal plasma irregularity drifts under magnetospheric disturbances”**. Geophys. Res. Letts., 25(22):4137-4140, 1998.
- ABDU, M. A., SASTRI, J.H., LUHR, H., TACHIHARA, H., TRIVEDI, N.B. and SOBRAL, J.H.A. **“DP2 electric field fluctuations in the dusk-side dip equatorial ionosphere”**. Geophys. Res. Lett., 25(9):1511-1514, 1998.
- MacDOUGALL, J.W., ABDU, M. A., JAYACHANDRAN, P. T., CECILE, J.F. and BATISTA, I.S. **“Pre-sunrise spread-F at Fortaleza”**. J. Geophys. Res., 103(A10):23415-23425, 1998.
- ABDU, M. A., **Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F**, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., in press, 2000.
- CLÉZIO M. DENARDINI; Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar Ionosférico de São Luís do Maranhão, INPE, São José dos Campos, 1999.