



**University of São Paulo**

**Polytechnic School**

**Department of Transportation Engineering**



**USING THE GPS SYSTEM TO ESTIMATE THE  
IONOSPHERIC REFRACTION IN BRAZIL\***

**By**

**EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR**

**September 2002**

**SÃO PAULO, SP - BRAZIL**

\* This Thesis was writing in Portuguese

**EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR**

**O SISTEMA GPS COMO FERRAMENTA PARA À  
AVALIAÇÃO DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Orientadores:

Prof. Dr. Denizar Blitzkow (USP)

Prof. Dr. Gérard Lachapelle (UofC)

São Paulo, SP - Brasil

Setembro, 2002

## FICHA CATALOGRÁFICA

Fonseca Junior, Edvaldo Simões da

O sistema GPS como ferramenta para à avaliação da refração ionosférica no Brasil

/ Edvaldo Simões da Fonseca Junior. -- São Paulo, 2002.

p.176

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.GPS 2.Conteúdo total de elétrons 3.Ionosfera 4.Geodésia  
5.Geodésia espacial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**TERMO DE JULGAMENTO**  
**DE**  
**DEFESA DE TESE DE DOUTORADO**

Aos 17 dias do mês de setembro de 2002, às 09:00 horas, no Edifício Paula Souza da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores Denizar Blitzkow, orientador do candidato, Gerard Lachapelle, Mangalathayil Ali Abdu, João Francisco Galera Monico e Jorge Pimentel Cintra, iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do(a) Sr(a). **EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR**

Título da Tese: "O SISTEMA GPS COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL".

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o(a) candidato(a):

Prof.Dr. Denizar Blitzkow..... ( *Aprovado* )  
 Prof.Dr. Gerard Lachapelle .....( *Aprovado* )  
 Prof.Dr. Mangalathayil Ali Abdu.....( *Aprovado* )  
 Prof.Dr. João Francisco Galera Mônico.....( *Aprovado* )  
 Prof.Dr. Jorge Pimentel Cintra.....( *Aprovado* )

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 17 de setembro de 2002.  
 A COMISSÃO JULGADORA

*Denizar*  
 \_\_\_\_\_  
*Gerard Lachapelle*  
 \_\_\_\_\_  
*D. Abdu*  
*João Francisco Galera*  
 \_\_\_\_\_  
*Jorge Pimentel Cintra*  
 \_\_\_\_\_

Secretária: Elisabete Ap<sup>a</sup> F.S.Ramos

Obs.: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.  
 Homologado pela C.P.G. em reunião realizada \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

*Aos meus pais Edvaldo e Josefina pelo incentivo constante e  
à minha querida esposa e amiga Maria Antonieta pelo carinho e dedicação.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo prof. Dr. Denizar Blitzkow pelo apoio, incentivo e confiança;

To my supervisor Professor Gérard Lachapelle while I was in Calgary - Canada for your help and support;

Ao Prof. Dr. João Francisco Galera Mônico que muito contribuiu neste trabalho apresentando diversas sugestões durante o exame de qualificação;

Ao Dr Mangalathayil Ali Abdu pelas sugestões apresentadas para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra pelo leitura crítica e revisão deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Nicola Paciléo Netto pelo seu incentivo constante;

A CAPES pelo suporte para a realização de estudos na Universidade de Calgary - Canadá; Processo n<sup>o</sup>: BEX 019/99-2

Ao Departamento de Geodésia do IBGE pela cessão dos dados utilizados nesta pesquisa;

Ao Luiz Paulo Souto Fortes pelas constantes discussões sobre o trabalho e o uso do programa Bernese;

À Kátia Duarte Pereira e Sonia Maria Alves Costa pela ajuda constante em relação aos dados e coordenadas da RBMC;

A Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos pela ajuda no uso do programa GMT;

A Ilce de Oliveira Campos pela inestimável ajuda na utilização do programa de análise espectral bem como, pelas discussões dos resultados.

Aos amigos Jorge Luiz Alves Trabanco, José Carlos Penna de Vasconcellos e Régis Fernandes Bueno pela ajuda e incentivo constante;

Aos colegas do Departamento de Geomática da Universidade de Calgary e, em especial o amigo Mohammad Rajabi;

A todos os professores e funcionários do PTR pelo apoio e incentivo, em especial ao técnico Adalberto Moreira Mariano pelo auxílio na preparação de diversas figuras;

Às funcionárias da Biblioteca da Engenharia Civil, Maria de Fátima da Silva Paiva e Silvia Regina Saran Della Torre pela revisão e formatação da lista de referencias e preparação da ficha catalográfica;

À professora Maria Cristina Vidal Borba pela revisão do abstract e por auxiliar na tradução durante a apresentação da tese.

Ao Mark Greaves do Ordnance Survey (Inglaterra) pelo auxílio no entendimento e no envio de exemplos de scripts para o programa Bernese;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

## RESUMO

Após a desativação da disponibilidade seletiva, ocorrida em maio de 2000, a maior fonte de erro presente no sistema GPS passou a ser a refração ionosférica. Os seus efeitos provocam um avanço na fase de batimento da portadora e um atraso no código. Na região equatorial onde o Brasil está inserido, a refração ionosférica apresenta variações que decorrem de diversos fatores tais como: o ciclo solar, o movimento aparente do Sol, as estações do ano, o campo geomagnético, entre outras. Desta forma, a refração ionosférica é um fator limitante pois, degrada a determinação de posições, principalmente, se o usuário estiver utilizando um receptor de apenas uma frequência. Para avaliar o efeito da refração ionosférica no Brasil, no período compreendido entre janeiro de 1997 a dezembro de 2001, foram utilizados dados coletados com receptores providos de duas frequências e que integram a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS. Todos os dados foram preparados e inseridos em um programa científico de processamento das observáveis do sistema GPS. Devido à grande massa de dados foi necessário o desenvolvimento de um programa para verificar a integridade dos mesmos, converter as efemérides precisas e os dados para o formato de entrada do programa científico e preparar os arquivos de lote. Além das características apresentadas, este programa foi desenvolvido para automatizar o processo de cálculo do conteúdo total de elétrons. Ao final do processamento o programa exibe os parâmetros que representam a refração ionosférica ou seja, os valores calculados para o Conteúdo Total de Elétrons. Tais valores permitiram a criação de uma série histórica do comportamento da refração ionosférica abrangendo um intervalo de tempo que contempla um período em que o ciclo solar apresentava atividade mínima e um outro período em que o ciclo solar alcançou a máxima atividade. Estes dados indicam o comportamento da ionosfera para um período de cinco anos em uma das regiões do planeta que apresenta as maiores variações, comportamento este, que permitirá um melhor conhecimento da ionosfera e a melhoria ou desenvolvimento de modelos mais adequados. Foram gerados ainda, mapas da ionosfera que poderão auxiliar na melhoria da acurácia posicional.



## ABSTRACT

Since the US president decided to turn off the selective availability (SA) one of the biggest error in the GPS system has been the ionosphere refraction. The refraction effect on GPS signals are: delay for the code and an advance for the phase. In the equatorial region, where Brazil is, the refraction presents the biggest variations that are caused by the solar cycle, the time of the day, the season, the geomagnetic field and many others phenomena. In this case, the ionosphere refraction is a limitation because it increases the degradation of the position, specially if the user is using a single frequency receiver. To evaluate the ionospheric effects in Brazil, between January 1997 and December 2001, data from the Brazilian Continuous GPS Monitoring Network were used, provided by double frequency GPS receivers. All data were prepared and used by a scientific software to process the GPS observations. The volume of data was so big that it was necessary to write a software to manage the data integrity, to transform the precise ephemeris and the observations to scientific program format and to create batch files. Also, the program was used to process the data and to compute the total electron content automatically. At the end of the process, the software shows the TEC parameters. These parameters were used to create a historical series of the ionosphere refraction in Brazil. This series represents a period of minimal solar cycle, 1997, and a maximum period of the solar cycle, 2000 / 2001 in one of the most active regions of the planet. This series will improve the knowledge on the ionosphere and will allow to improve models or create new ones. Ionospheric maps that can be used to improve the positional accuracy, were also generated.

## SUMÁRIO

Dedicatória .....	i
Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Sumário.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Abreviaturas .....	xviii
1 Introdução .....	1
1.1 Histórico .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Justificativa do trabalho .....	3
1.4 Estrutura do trabalho .....	4
2 Princípios da Propagação de Sinais .....	5
2.1 Fundamentos da Propagação de Sinais .....	5
2.2 Dispersão, Velocidade de Fase e Velocidade de Grupo .....	8
2.3 Domínio da Frequência .....	9
2.4 Estrutura e Subdivisões da Atmosfera Terrestre .....	11
2.5 Propagação dos Sinais através da Ionosfera e da Troposfera .....	15
2.5.1 Refração Ionosférica .....	17
2.5.2 Refração Troposférica .....	18
3 A Ionosfera e seus Efeitos na Propagação dos Sinais do Sistema GPS .....	22
3.1 A Ionosfera .....	22
3.1.1 Perfil Vertical da Ionosfera.....	22
3.1.1.1 Camada D .....	24
3.1.1.2 Camada E .....	24
3.1.1.3 Camada F1 .....	25
3.1.1.4 Camada F2 .....	25
3.2 Principais Regiões Geográficas da Ionosfera .....	26
3.3 Irregularidades Ionosféricas .....	27
3.4 O Campo Magnético Terrestre .....	28

3.5 Influência da Atividade Solar .....	29
3.6 Índices Magnéticos Kp e Ap .....	32
3.7 Efeitos da Ionosfera na Propagação dos Sinais do Sistema GPS .....	33
3.8 Modelos da Ionosfera.....	35
3.8.1 Modelos para Correção da Refração Ionosférica em Receptores de uma Frequência.....	35
3.8.1.1 Modelo Transmitido na Mensagem GPS (Broadcast).....	36
3.8.2 Cálculo da Correção Ionosférica com o uso de Receptores de uma Frequência.....	39
3.8.2.1 Modelo da Lâmina Ionosférica.....	40
3.8.2.2 Modelo Diário com Função Cosseno.....	41
3.8.2.3 Modelo do Ponto Ionosférico.....	42
3.8.3 Cálculo da Correção Ionosférica com o uso de Receptores de Dupla Frequência.....	42
3.8.3.1 Correção Ionosférica com o uso das Medidas do Código (Pseudodistância).....	43
3.8.3.2 Correção Ionosférica com o uso das Medidas da Fase da Portadora.....	44
3.8.4 Modelos Ionosféricos Disponíveis no Programa Bernese.....	44
3.8.4.1 Modelo Ionosférico Local para o Cálculo do TEC.....	46
3.8.4.2 Modelo Ionosférico Global para o Cálculo do TEC.....	47
3.9 Índice Dst.....	49
4 Materiais e Métodos .....	51
4.1 Origem dos Dados .....	51
4.2 Dados Processados .....	55
4.3 Metodologia .....	56
4.3.1 Descrição do Programa RBMC2000 .....	56
4.3.2 Descrição do Programa Bernese .....	58
4.3.3 Descrição da Rotina RBMCmeanTEC .....	59
4.3.4 Descrição da Rotina RBMCtecMAP.....	60
5. Processamento de Dados .....	61
5.1 Intervalo de Tempo de Processamento .....	61
5.2 Processamento dos Dados do Ano 1997 .....	62
5.3 Processamento dos Dados do Ano 1998 .....	64
5.4 Processamento dos Dados do Ano 1999 .....	66
5.5 Processamento dos Dados do Ano 2000 .....	68

5.6 Processamento dos Dados do Ano 2001 .....	70
5.7 Opções utilizadas no Processamento.....	72
5.7.1 Escolha da Altura da Camada Ionosférica.....	72
5.7.2 Escolha das Efemérides.....	73
6. Análise dos Resultados .....	74
6.1 Análise dos Gráficos do TEC.....	74
6.2 Análise Espectral dos Resultados .....	81
6.3 Análise Diária dos Resultados .....	84
6.4 Mapa Ionosférico do Brasil .....	87
6.5 Análise da Latitude Geomagnética versus Intensidade do TEC.....	92
6.6 Análise da Influência das Tempestades Magnéticas sobre os Valores do TEC.....	97
7 Conclusões e Recomendações .....	113
7.1 Conclusões .....	113
7.2 Recomendações .....	115
7.3 Perspectivas futuras .....	116
Anexo A .....	118
Anexo B .....	144
Lista de Referencias .....	170

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação da Propagação de Onda.....	7
Figura 2.2 – Espectro Eletromagnético.....	9
Figura 2.3 – Esquema de Subdivisão da Atmosfera Terrestre.....	12
Figura 2.4 – Curva de Ionização (Perfil de Chapman).....	13
Figura 2.5 – Comportamento da Refratividade em Micro-Ondas.....	16
Figura 3.1 – Perfil Típico da Ionosfera.....	23
Figura 3.2 – Mapa-Mundi Indicando as Zonas Geográficas da Ionosfera.....	26
Figura 3.3 – Equador Geomagnético.....	29
Figura 3.4 – Média Mensal do Número de Manchas Solares.....	31
Figura 3.5 – Últimos Ciclos Solares com o Máximo em 1989 e 2000/2001.....	32
Figura 3.6 – Representação da Ionosfera no Modelo Broadcast.....	36
Figura 3.7 – Modelo Teórico da Ionosfera utilizando o Conceito de Camada Simples.....	45
Figura 3.8 – Rede de Observatórios Geomagnéticos para Determinação do Índice Dst.....	49
Figura 4.1 – Configuração Inicial da RBMC.....	52
Figura 4.2 – Situação da RBMC – Dez. de 2001.....	53
Figura 4.3 – Configuração Futura da RBMC.....	54
Figura 4.4 – Exemplo de Gráfico Gerado com a Rotina RBMCmeanTEC.....	59
Figura 4.5 – Exemplo de Gráfico Gerado com a Rotina RBMCtecMap.....	60
Figura 5.1 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1997.....	62
Figura 5.2 – Perfis Diários do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1997..	63
Figura 5.3 - Valores Calculados e Valores Médios do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1998.....	64
Figura 5.4 - Perfis Diários do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1998..	65
Figura 5.5 - Valores Calculados e Valores Médios do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1999.....	66
Figura 5.6 - Perfis Diários do TEC para Estação de Presidente Prudente, 1999..	67
Figura 5.7 - Valores Calculados e Valores Médios do TEC para Estação de Presidente Prudente, 2000.....	68
Figura 5.8 - Perfis Diários do TEC para Estação de Presidente Prudente, 2000..	69
Figura 5.9 - Valores Calculados e Valores Médios do TEC para Estação de Presidente Prudente, 2001.....	70
Figura 5.10 - Perfis Diários do TEC para Estação de Presidente Prudente, 2001	71

Figura 6.1 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Presidente Prudente – SP.....	75
Figura 6.2 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Bom Jesus da Lapa – BA.....	75
Figura 6.3 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Brasília – DF.....	76
Figura 6.4 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Crato – CE.....	76
Figura 6.5 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Cuiabá – MT.....	77
Figura 6.6 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Fortaleza – CE.....	77
Figura 6.7 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Imperatriz – MA.....	78
Figura 6.8 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Manaus – AM.....	78
Figura 6.9 – Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Curitiba – PR.....	79
Figura 6.10 - Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Recife – PE.....	79
Figura 6.11 - Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Porto Alegre – RS.....	80
Figura 6.12 - Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Salvador – BA.....	80
Figura 6.13 - Valor Calculado e Respectivas Médias para a Estação de Viçosa – MG.....	81
Figura 6.14 – Análise Espectral – Estação de Presidente Prudente – SP (1997 – 2001).....	82
Figura 6.15 – Análise Espectral – Estação de Curitiba – PR (1997 – 2001).....	83
Figura 6.16 – Análise Espectral – Estação de Viçosa – MG (1997 – 2001).....	83
Figura 6.17 – Valores Diários do TEC Calculados para a Estação Curitiba – PR em 1997.....	84
Figura 6.18 – Valores Diários do TEC Calculados para a Estação Curitiba – PR em 1998.....	85
Figura 6.19 – Valores Diários do TEC Calculados para a Estação Curitiba – PR em 1999.....	85
Figura 6.20 – Valores Diários do TEC Calculados para a Estação Curitiba – PR em 2000.....	86

Figura 6.21 – Valores Diários do TEC Calculados para a Estação Curitiba – PR em 2001.....	86
Figura 6.22 – Mapa do TEC Calculado a cada 2 horas Próximo ao Equinócio de Outono.....	88
Figura 6.23 – Mapa do TEC Calculado a cada 2 horas Próximo ao Solstício de Inverno.....	89
Figura 6.24 – Mapa do TEC Calculado a cada 2 horas Próximo ao Equinócio de Primavera.....	90
Figura 6.25 – Mapa do TEC Calculado a cada 2 horas Próximo ao Solstício de Verão.....	91
Figura 6.26 – Diferenças entre o TEC Médio de Fortaleza e de Manaus.....	93
Figura 6.27 – Diferenças entre o TEC Médio de Fortaleza e de Bom Jesus da Lapa.....	94
Figura 6.28 – Diferenças entre o TEC Médio de Fortaleza e de Presidente Prudente.....	94
Figura 6.29 – Diferenças entre o TEC Médio de Fortaleza e de Viçosa.....	95
Figura 6.30 - Diferenças entre o TEC Médio de Fortaleza e de Curitiba.....	95
Figura 6.31 – Representação da Intensidade do Campo Total.....	96
Figura 6.32 – Comparação entre TEC e Dst em Fortaleza – 08/98.....	98
Figura 6.33 - Comparação entre TEC e Dst em Brasília – 08/98.....	98
Figura 6.34 - Comparação entre TEC e Dst em Presidente Prudente – 08/98.....	99
Figura 6.35 - Comparação entre TEC e Dst em Viçosa – 08/98.....	99
Figura 6.36 - Comparação entre TEC e Dst em Curitiba – 08/98.....	100
Figura 6.37 – Comparação entre TEC e Dst em Fortaleza – 10/98.....	101
Figura 6.38 – Comparação entre TEC e Dst em Brasília – 10/98.....	101
Figura 6.39 – Comparação entre TEC e Dst em Presidente Prudente – 10/98.....	102
Figura 6.40 – Comparação entre TEC e Dst em Viçosa – 10/98.....	102
Figura 6.41 – Comparação entre TEC e Dst em Curitiba – 10/98.....	103
Figura 6.42 – Comparação entre TEC e Dst em Brasília – 10/99.....	104
Figura 6.43 – Comparação entre TEC e Dst em Presidente Prudente – 10/99.....	104
Figura 6.44 – Comparação entre TEC e Dst em Viçosa – 10/99.....	105
Figura 6.45 – Comparação entre TEC e Dst em Curitiba – 10/99.....	105
Figura 6.46 – Comparação entre TEC e Dst em Fortaleza – 07/00.....	106
Figura 6.47 – Comparação entre TEC e Dst em Brasília – 07/00.....	107
Figura 6.48 – Comparação entre TEC e Dst em Presidente Prudente – 07/00.....	107

Figura 6.49 – Comparação entre TEC e Dst em Viçosa – 07/00.....	108
Figura 6.50 – Comparação entre TEC e Dst em Curitiba – 07/00.....	108
Figura 6.51 – Comparação entre TEC e Dst em Fortaleza – 10/00.....	109
Figura 6.52 – Comparação entre TEC e Dst em Brasília – 10/00.....	110
Figura 6.53 – Comparação entre TEC e Dst em Presidente Prudente – 10/00.....	110
Figura 6.54 – Comparação entre TEC e Dst em Viçosa – 10/00.....	111
Figura 6.55 – Comparação entre TEC e Dst em Curitiba – 10/00.....	111
Figura A1 – Valores Calculados e Médios do TEC na Estação de Bom Jesus da Lapa – 1997.....	118
Figura A2 – Valores Calculados e Médios do TEC na Estação de Bom Jesus da Lapa – 1998.....	119
Figura A3 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Bom Jesus da Lapa – 1999.....	119
Figura A4 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Bom Jesus da Lapa – 2000.....	120
Figura A5 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Bom Jesus da Lapa – 2001.....	120
Figura A6 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Brasília – 1997.....	121
Figura A7 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Brasília – 1998.....	121
Figura A8 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Brasília – 1999.....	122
Figura A9 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Brasília – 2000.....	122
Figura A10 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Brasília – 2001.....	123
Figura A11 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Crato – 2000.....	123
Figura A12 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Crato – 2001.....	124
Figura A13 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Cuiabá – 1997.....	124
Figura A14 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Cuiabá – 1998.....	125
Figura A15 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Cuiabá – 1999.....	125



Figura A16 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Cuiabá – 2000.....	126
Figura A17 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Cuiabá – 2001.....	126
Figura A18 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Curitiba – 1997.....	127
Figura A19 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Curitiba – 1998.....	127
Figura A20 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Curitiba – 1999.....	128
Figura A21 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Curitiba – 2000.....	128
Figura A22 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Curitiba – 2001.....	129
Figura A23 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Fortaleza – 1997.....	129
Figura A24 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Fortaleza – 1998.....	130
Figura A25 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Fortaleza – 1999.....	130
Figura A26 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Fortaleza – 2000.....	131
Figura A27 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Fortaleza – 2001.....	131
Figura A28 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Imperatriz – 1998.....	132
Figura A29 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Imperatriz – 1999.....	132
Figura A30 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Imperatriz – 2000.....	133
Figura A31 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Imperatriz – 2001.....	133
Figura A32 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Manaus – 1997.....	134
Figura A33 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Manaus – 1998.....	134
Figura A34 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Manaus – 1999.....	135

Figura A35 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Manaus – 2000.....	135
Figura A36 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Manaus – 2001.....	136
Figura A37 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Porto Alegre – 1999.....	136
Figura A38 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Porto Alegre – 2000.....	137
Figura A39 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Porto Alegre – 2001.....	137
Figura A40 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Recife – 1999.....	138
Figura A41 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Recife – 2000.....	138
Figura A42 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Recife – 2001.....	139
Figura A43 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Salvador – 1999.....	139
Figura A44 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Salvador – 2000.....	140
Figura A45 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Salvador – 2001.....	140
Figura A46 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Viçosa – 1997.....	141
Figura A47 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Viçosa – 1998.....	141
Figura A48 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Viçosa – 1999.....	142
Figura A49 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Viçosa – 2000.....	142
Figura A50 – Valores Calculados e Valores Médios do TEC na Estação de Viçosa – 2001.....	143
Figura B1 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Bom Jesus da Lapa – 1997.....	144
Figura B2 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Bom Jesus da Lapa – 1998.....	145
Figura B3 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Bom Jesus da Lapa – 1999.....	145

Figura B4 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Bom Jesus da Lapa – 2000.....	146
Figura B5 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Bom Jesus da Lapa – 2001.....	146
Figura B6 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Brasília – 1997.....	147
Figura B7 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Brasília – 1998.....	147
Figura B8 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Brasília – 1999.....	148
Figura B9 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Brasília – 2000.....	148
Figura B10 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Brasília – 2001.....	149
Figura B11 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Crato – 2000.....	149
Figura B12 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Crato – 2001.....	150
Figura B13 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Cuiabá – 1997.....	150
Figura B14 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Cuiabá – 1998.....	151
Figura B15 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Cuiabá – 1999.....	151
Figura B16 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Cuiabá – 2000.....	152
Figura B17 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Cuiabá – 2001.....	152
Figura B18 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Curitiba – 1997.....	153
Figura B19 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Curitiba – 1998.....	153
Figura B20 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Curitiba – 1999.....	154
Figura B21 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Curitiba – 2000.....	154
Figura B22 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Curitiba – 2001.....	155
Figura B23 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Fortaleza – 1997.....	155
Figura B24 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Fortaleza – 1998.....	156
Figura B25 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Fortaleza – 1999.....	156
Figura B26 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Fortaleza – 2000.....	157
Figura B27 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Fortaleza – 2001.....	157
Figura B28 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Imperatriz – 1998.....	158
Figura B29 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Imperatriz – 1999.....	158
Figura B30 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Imperatriz – 2000.....	159
Figura B31 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Imperatriz – 2001.....	159
Figura B32 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Manaus – 1997.....	160
Figura B33 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Manaus – 1998.....	160
Figura B34 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Manaus – 1999.....	161

Figura B35 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Manaus – 2000.....	161
Figura B36 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Manaus – 2001.....	162
Figura B37 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Porto Alegre – 1999.....	162
Figura B38 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Porto Alegre – 2000.....	163
Figura B39 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Porto Alegre – 2001.....	163
Figura B40 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Recife – 1999.....	164
Figura B41 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Recife – 2000.....	164
Figura B42 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Recife – 2001.....	165
Figura B43 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Salvador – 1999.....	165
Figura B44 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Salvador – 2000.....	166
Figura B45 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Salvador – 2001.....	166
Figura B46 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Viçosa – 1997.....	167
Figura B47 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Viçosa – 1998.....	167
Figura B48 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Viçosa – 1999.....	168
Figura B49 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Viçosa – 2000.....	168
Figura B50 – Perfis Diários do TEC Para a Estação de Viçosa – 2001.....	169

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Faixas de Frequências Eletromagnéticas.....	10
Tabela 2.2 – Denominação utilizada para Radar.....	10
Tabela 2.3 – Características Principais das Camadas da Ionosfera.....	14
Tabela 2.4 – Efeitos do Atraso Ionosférico Vertical na Propagação.....	17
Tabela 3.1 – Erro Máximo na Distância (vertical) Provocado pela Ionosfera.....	34
Tabela 3.2 – Relação entre as Unidades de Medidas e TEC.....	38
Tabela 3.3 – Variação do Semi-Diâmetro da Camada Ionosférica.....	46
Tabela 3.4 – Nível de Intensidade de Tempestade Magnética.....	50
Tabela 4.1 – Características das Estações da RBMC.....	54
Tabela 4.2 – Dados Utilizados para o Cálculo do TEC.....	56
Tabela 5.1 – Tempo Médio de Processamento.....	61
Tabela 5.2 – Dados Utilizados para o Cálculo do TEC em 1997.....	62
Tabela 5.3 - Dados Utilizados para o Cálculo do TEC em 1998.....	64
Tabela 5.4 - Dados Utilizados para o Cálculo do TEC em 1999.....	66
Tabela 5.5 - Dados Utilizados para o Cálculo do TEC em 2000.....	68
Tabela 5.6 - Dados Utilizados para o Cálculo do TEC em 2001.....	70
Tabela 6.1 – Coordenadas Geomagnéticas das Estações da RBMC.....	92

**LISTA DE ABREVIATURAS**

- CODE – Center for Orbit Determination in Europe
- CONDER - Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia
- CRAAE - Centro de Rádio Astronomia e Aplicações Espaciais
- DECCA - Low frequency continuous wave phase comparison navigation
- DEGED - Departamento de Geodésia do IBGE
- DoD - Department of Defense (Departamento de Defesa America)
- Dst - Disturbance Storm Time Index
- EHF – Extremely High Frequency
- ELF - Extremely Low Frequency
- EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- EUV – Extreme Ultraviolet (Luz ultravioleta extrema)
- FNMA - Fundo Nacional do Meio Ambiente
- GLONASS - GLObal NAVigation Satellite System
- GPS - Global Positioning System
- HF – High Frequency
- IAGA - International Geomagnetic and Aeronomy
- IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IGR - Prefixo para indicar o tipo efeméride (rápida) divulgada pelo IGS
- IGRF 2000 - International Geomagnetic Reference Frame – 2000
- IGS - International GPS Service
- IGU – Prefixo para indicar o tipo efeméride (ultra-rápida) divulgada pelo IGS
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IONEX – IONosphere map EXchange
- IPP – Ionospheric Pierce Point

JPL - Jet Propulsion Laboratory

LEGOS - Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiale

LF – Low Frequency

LORAN - Long-Range Navigation System

LSTIDs – Large-scale TIDs

MF – Medium Frequency

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

MSTIDs – Medium-scale TIDs

NAVSTAR - Navigation Satellite with Time and Ranging

NNSS - Navy Navigation Satellite System

NSSDC - National Space Science Data Center

OMEGA - Global low frequency navigation system

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS

ROEN - Rádio Observatório Espacial do Nordeste

SA - Selective Availability (Disponibilidade Seletiva)

SAMA – South Atlantic Magnetic Field Anomaly

SID - Sudden Ionospheric Disturbance

SIVAM - Sistema de Vigilância da Amazônia

SHF – Super High Frequency

SLF – Super Low Frequency

SSTIDs – Short-scale TIDs

TEC – Total Electron Content

TECU - Total Electron Content Unit

TIDs - Travelling Ionospheric Disturbances

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHF – Ultra High Frequency

ULF – Ultra Low Frequency

URCA - Universidade Regional do Cariri

USNGS - United States National Geodetic Survey

USP/EP/PTR - Universidade de São Paulo/Escola Politécnica/Departamento de  
Engenharia de Transportes

UT - Universal Time

UTC – Coordinated Universal Time

VLF – Very Low Frequency

VOR - Omnidirectional Radios

WADGPS - Wide Area Differential GPS



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Histórico

O homem, em sua busca constante pelo desconhecido, percorreu, desde os primórdios, um longo e fascinante caminho, até chegar aos dias de hoje. As necessidades vitais deram origem a mapas rudimentares e o desenvolvimento do sentido de posicionamento e orientação. Progressivamente o homem foi se orientando pela observação do sol, das estrelas e, mais tarde, pela bússola. Em tempos mais recentes passou a efetuar medidas do sol, das estrelas, de planetas e satélites, de distâncias e de tempo, para definir sua posição sobre a terra, em termos de latitude e longitude.

Com o desenvolvimento relativamente recente do rádio surgiu uma nova classe de navegação que não dependia das condições climáticas. Nesta classe estão incluídos métodos como o VOR, LORAN, DECCA, OMEGA, entre outros. Com o desenvolvimento tecnológico, surgiu o sistema de navegação denominado NNSS, também conhecido como Transit. Este sistema se valia de satélites artificiais para a determinação de coordenadas na superfície terrestre (Parkinson et al, 1996).

A enorme evolução nos métodos de navegação aliada ao extraordinário desenvolvimento tecnológico ocorrido no século XX, permitiu o desenvolvimento da grande revolução nos sistemas de navegação denominada de NAVSTAR - GPS. Este sistema tornou-se popular permitindo que os receptores sejam vendidos a preços extremamente acessíveis, permitiu ainda, que diversas aplicações nunca antes imaginadas fossem desenvolvidas e implementadas. Sem sombra de dúvida o sistema GPS é o mais popular sistema de posicionamento de todos os tempos.

Apesar da imensa revolução que esse sistema já provocou, procura-se constantemente tirar dele mais informações e aplicações práticas, procurando ao mesmo tempo uma melhoria na determinação da posição. Esta busca incessante aponta para o estudo das principais fontes de erros do sistema que se referem: à órbita, ao efeito relativístico e aos relógios que estão associados aos satélites; o multicaminhamento, a perda de sintonia, a refração ionosférica e troposférica que estão associadas à propagação do sinal. Há ainda, os erros decorrentes do conjunto antena – receptor que são: a incerteza do centro de fase da antena, a deriva do

relógio, a sintonia dos canais. Existem ainda os efeitos externos aos sistemas e que estão relacionados à estação e são: erro nas coordenadas, o efeito das marés oceânica e terrestre, o movimento do pólo (Mônico, 2000). Havia ainda uma limitação ao uso do sistema GPS que foi imposta pelo Departamento de Defesa Americano (DoD). Esta limitação, conhecida pela sigla SA - Disponibilidade Seletiva, foi introduzida em 4 de julho de 1991 (Camargo, 1999) e provocava uma degradação na determinação de posições. Em 1996 foi discutida a possibilidade da mesma ser desligada, tendo sido previsto, naquela época, um prazo de 4 a 10 anos. Para surpresa de muitos o presidente dos Estados Unidos da América autorizou a desativação da disponibilidade seletiva, antes desse prazo, em 2 de maio de 2000. Desde então, uma das maiores fontes de erro do sistema ficou sendo a refração ionosférica que afeta ambos sinais do sistema GPS.

O efeito da refração ionosférica, sobre as frequências do sistema GPS, está diretamente correlacionada com o Conteúdo Total de Elétrons (TEC) presente na ionosfera. Assim sendo, ao se determinar o TEC torna-se possível determinar o atraso na propagação da frequência da fase da portadora.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos desta pesquisa são:

- A criação de uma série histórica do conteúdo total de elétrons, determinado a cada duas horas em cada uma das treze estações que compõem a RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS.
- O desenvolvimento de metodologia para a geração de mapas da ionosfera para o país e a automatização do processo de cálculo, permitindo uma redução do tempo necessário para o processamento do mapa da ionosfera.
- Contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno no Brasil.

Na busca dos objetivos propostos foi necessário:

- a realização de um estudo sobre os efeitos da ionosfera nos sinais GPS;
- a compreensão do programa Bernese (Hugentobler et al, 2001 ), utilizado para o cálculo do conteúdo total de elétrons;

- o desenvolvimento de programas para automatizar o processo de análise dos arquivos de observáveis;
- a conversão dos dados para o formato de leitura do programa Bernese;
- a criação de arquivos de lote para o processamento automático.

Foram criadas ainda, diversas rotinas, no ambiente MATLAB, para análise dos resultados, geração de figuras, de gráficos e de mapas.

### **1.3 Justificativa do trabalho**

A região equatorial, onde grande parte do Brasil está contido, é a que apresenta as maiores variações da ionosfera. Estas variações, que afetam diretamente os sinais do sistema GPS, devem então, ser conhecidas para que se possa estimar o erro sistemático. Na tentativa de conhecer melhor o comportamento da ionosfera sobre o Brasil e, aproveitando as observáveis coletadas por receptores de dupla frequência espalhados pelo país, vislumbrou-se a possibilidade de utilizar tais informações para estudar o comportamento da ionosfera e, desta forma, ampliar o conhecimento da mesma na região em estudo. O conhecimento do que ocorreu no passado poderá dar indicações do que se pode esperar do futuro. Paralelamente, os resultados deste estudo, poderão ser utilizados por usuários de receptores de apenas uma frequência (grande maioria no país) para que possam, se não eliminar, pelo menos, reduzir os erros sistemáticos provocados pela refração ionosférica. No caso de usuários de receptores providos de duas frequências e que estejam interessados em aplicações que necessite de uma grande acurácia, será possível o uso dos mapas da ionosfera que vão auxiliar na resolução das ambigüidades e conseqüentemente na melhoria dos resultados.

Outro fator que justifica o desenvolvimento dessa pesquisa é a possibilidade real de gerar mapas da ionosfera no formato padrão denominado IONEX - IONosphere map EXchange, sugerido pelo IGS (Schaer, 1998). Estes mapas poderão ser disponibilizados em uma página da internet ficando à disposição dos usuários que queiram utilizá-los. No primeiro momento, pode-se imaginar que tais mapas poderão ser disponibilizados uma ou duas semanas após a coleta dos dados. Em um futuro não muito distante, este intervalo poderá ser reduzido para apenas um dia e

posteriormente, quase que em tempo real e porque não imaginar que algum dia o mesmo será disponibilizado e transmitido em tempo real.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em 7 capítulos: Introdução, Princípios da Propagação de Sinais, A Ionosfera e seus Efeitos na Propagação dos Sinais do Sistema GPS, Materiais, Métodos, Processamentos de Dados, Análise dos Resultados e Considerações Finais.

Na Introdução foram apresentadas a relevância do tema da pesquisa, o objetivo, a justificativa e a organização deste trabalho.

O segundo capítulo descreve, os princípios de propagação de sinais e os fundamentos da refração ionosférica e troposférica. Já o terceiro, apresenta o detalhamento da ionosfera e seus efeitos na propagação dos sinais do sistema GPS. O capítulo seguinte descreve os materiais e os métodos utilizados ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa. Já o quinto capítulo, apresenta o detalhamento do processamento realizado para calcular o valor do TEC para cada uma das estações integrantes da RBMC. No sexto capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos com o uso do programa Bernese bem como as opções utilizadas. O último capítulo, contém as considerações finais, conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

## 2 PRINCÍPIOS DA PROPAGAÇÃO DE SINAIS

Os sinais de rádio, no percurso entre os emissores (satélites) e os receptores, propagam-se através das distintas regiões da atmosfera, entre elas a ionosfera e a troposfera, que apresentam natureza e estado específicos. Em função disto os sinais sofrem diferentes tipos de perturbações. Tais variações podem ocorrer na direção e na velocidade da propagação, e na potência do sinal. Os impactos nas observações são, em muitos casos, maiores que a acurácia requerida para um determinado trabalho. Por exemplo, durante a atividade solar máxima, considerando satélites próximos ao plano do horizonte, o erro na distância pode ser maior que 100 m (Newby e Langley, 1992). Conseqüentemente, para diminuir o seu efeito, as interferências da atmosfera devem ser determinadas através de medidas diretas ou através de modelos, que devem ser considerados no processo de ajustamento (Seeber, 1993).

### 2.1 Fundamentos da Propagação de Sinais

A relação entre o comprimento de onda  $\lambda$ , a frequência  $f$  e a velocidade de propagação  $v$ , é:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

onde  $\lambda$  é dado em metros (m);  $f$  é dado em Hertz (Hz) e  $v$  é dado em metros por segundo (m/s).

No contexto da geodésia por satélite serão consideradas somente as ondas eletromagnéticas. Na metrologia eletromagnética, as ondas podem ser consideradas como distúrbios no campo eletromagnético no tempo e no espaço (Wells, 1974). Em uma onda periódica os distúrbios se repetem em um ponto fixo após um intervalo de tempo conhecido como período  $P$  ou, em um tempo fixo, através de espaçamentos constantes separados pela distância ou pelo comprimento de onda  $\lambda$ . A relação entre a frequência e o período é expressa através da seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{P} \quad (2.2)$$

A fase  $\Phi$  de uma onda é uma fração ( $t / T$ ) do período  $P$ , cujo estado de perturbação no instante  $t$  teve um avanço com relação à origem no instante  $t_0$ . Onde  $T$  representa o tempo total de um período. Além disso:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2.3)$$

onde:

$\omega$  representa a frequência angular e

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

$k$  é a constante de fase ou número de onda.

Então, tem-se que a velocidade de propagação  $v$  (equação 2.1) pode ser também escrita:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{P} = \frac{\omega}{k} \quad (2.5)$$

Uma onda pode ser modelada através de uma função senoidal no tempo e no espaço passando a ser denominada onda senoidal. Considerando apenas as ondas com função periódica no tempo, tem-se:

$$y = A \text{ sen } 2\pi \cdot \left( \frac{t}{P} - \Phi_0 \right) \quad (2.6)$$

onde  $y$  é a magnitude do distúrbio em um instante de tempo  $t$ ;  $\Phi_0$  é a fase da onda no instante de tempo  $t = 0$  e  $A$  é a magnitude máxima ou a amplitude da onda. Desta forma tem-se que a fase em um instante de tempo  $t$  é:

$$\Phi = \frac{t}{P} \cdot \Phi_0 \quad (2.7)$$

$2\pi\Phi$  é chamado de ângulo de fase  $\varphi$ . Aplicando a equação (2.3) na equação (2.6), esta resulta na seguinte forma:

$$y = A \text{ sen}(\omega t + \varphi_0) \quad (2.8)$$

A figura 2.1 apresenta a interpretação geométrica da equação (2.8) conforme mostrado por Kahmen (1978) apud Seeber (1993).

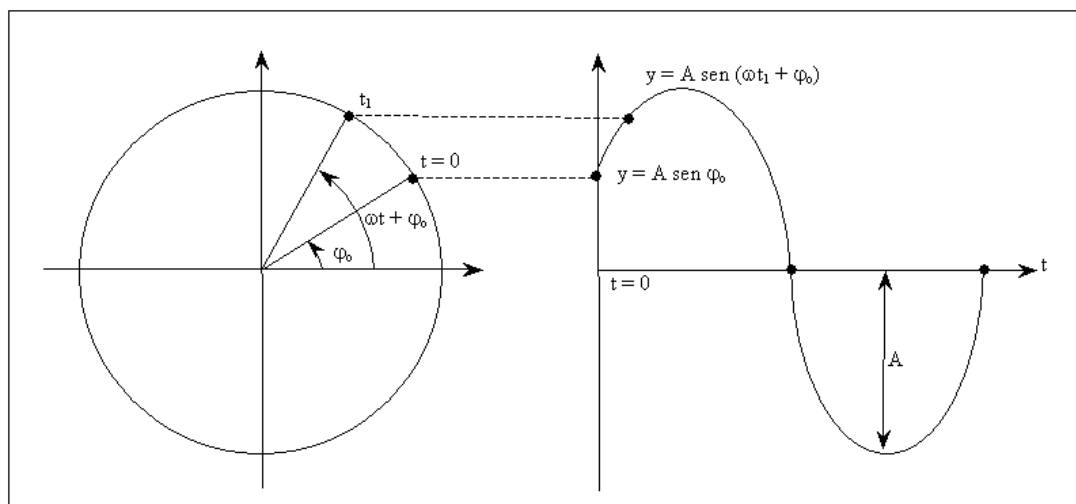


FIGURA 2.1: REPRESENTAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA

Fonte: Adaptado de Seeber, 1993

A equação (2.9) correlaciona o número de ciclos  $N_I$ , o período  $T_I$  e a frequência do oscilador em um determinado intervalo de tempo  $(t - t_0)$ .

$$(t - t_0) = N_I T_I = \frac{N_I}{f_I} \quad (2.9)$$

Ao substituir o número de ciclos  $N$  na equação (2.9) pela fase total  $\Phi$  referida a uma mesma época de início  $t_0$ , obtém-se a relação entre o tempo, a fase e a frequência.

$$t = \frac{\Phi}{f} \quad (2.10)$$

A equação (2.10) é equivalente à equação (2.2) e pode ser considerada para definir a equação de um relógio. Desta forma constitui-se na relação fundamental entre a fase de um processo periódico e o correspondente instante de tempo lido no relógio.

O comprimento de ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente, a velocidade de propagação, depende de certas propriedades do meio onde ocorre a propagação. No vácuo a velocidade é dada por

$$c = \frac{\lambda_{vac}}{P} = f \lambda_{vac} = \frac{\omega}{k_{vac}} \quad (2.11)$$

O valor numérico da constante  $c$  (velocidade de propagação da luz no vácuo) para uso em geodésia por satélite é (McCarthy, 1996):

$$c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1} \quad (2.12)$$

No caso de propagação em outros meios que não o vácuo, a velocidade de propagação será calculada em função do índice de refração  $n$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda} = \frac{k}{k_{vac}} \quad (2.13)$$

Por ser  $n$  próximo a 1, prefere-se, para a realização dos cálculos, utilizar a refratividade, definida como:

$$N = (n - 1)10^6 \quad (2.14)$$

A determinação do índice de refração  $n$ , ou da refratividade  $N$ , ao longo do caminho de propagação do sinal é essencial em geodésia por satélite, pois o tempo de propagação do sinal ou as diferenças de fase entre distintas ondas eletromagnéticas são medidas e depois transformadas em distâncias (medida em metros) com o uso da velocidade de propagação adotada ou modelada.

## 2.2 Dispersão, Velocidade de Fase e Velocidade de Grupo

Um meio, no qual a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas depende da frequência, recebe a qualificação de meio dispersivo. Neste a refratividade depende da frequência ou do comprimento de onda. O efeito de dispersão é causado pela interação eletromagnética entre o campo do meio eletricamente carregado e o campo externo da onda penetrante. Quando a frequência de plasma do meio e a frequência da onda penetrante são próximas, ocorre o efeito de ressonância que influencia na velocidade de propagação. (Brunner 1992).

A diferencial (2.15) de  $v$  em relação a  $\lambda$ , resulta na chamada de velocidade de dispersão.

$$\frac{\partial v}{\partial \lambda} \quad (2.15)$$

Em um meio com velocidade de dispersão diferente de zero observam-se diferentes velocidades de propagação para as ondas senoidais e para as ondas de grupo.

Deve-se distinguir entre:



- velocidade de fase da portadora  $v_p$  que pode ser definida como a velocidade de propagação da fase da portadora de uma onda particular com comprimento de onda uniforme;

- velocidade de grupo  $v_g$  que pode ser definida como a velocidade de propagação de um grupo de ondas gerada por uma sobreposição de diferentes modulações de diferentes frequências.

A relação entre velocidade de grupo e velocidade de fase foi descrita inicialmente por Rayleigh (1881) apud Seeber (1993) como sendo:

$$v_g = v_p - \lambda \cdot \frac{dv_p}{d\lambda} \quad (2.16)$$

A derivação completa da equação (2.16) pode ser vista em Wells (1974). Uma relação análoga também é válida para o índice de refração

$$n_g = n_p + f \cdot \frac{dn}{df} \quad (2.17)$$

No sistema GPS, a propagação dos códigos é afetada pela velocidade de grupo  $n_g$  e a propagação da fase pela velocidade de fase da portadora  $v_p$  (Seeber, 1993).

### 2.3 Domínio da Frequência

O espectro de frequência das ondas eletromagnéticas pode ser dividido em aproximadamente 20 ordens de magnitude (fig.2.2). Em geodésia por satélite apenas duas pequenas faixas do espectro são usadas, sendo elas: luz visível ( $7 \cdot 10^{-5}$  cm a  $4 \cdot 10^{-5}$  cm ou  $0,4 \cdot 10^{15}$  Hz a  $0,8 \cdot 10^{15}$  Hz) e rádio ( $10^4$  cm a 10 cm ou  $10^7$  Hz a  $10^{10}$  Hz).

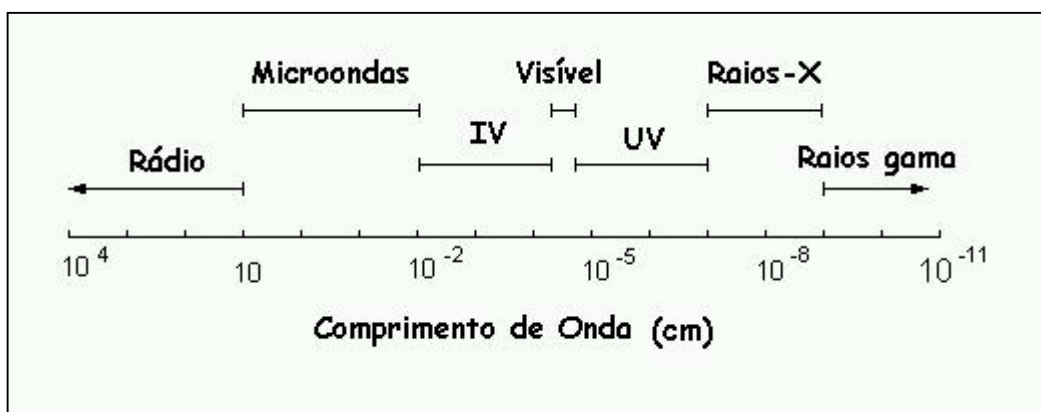


FIGURA. 2.2: ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Fonte: <http://www.das.inpe.br/~alta/MASCO/faq/raiox/espectro.html> (03/11/2001)

Diferentes tipos de subdivisões e terminologias são utilizadas para indicar as ondas eletromagnéticas como pode ser observado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1: FAIXAS DE FREQUÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS

Designação	Faixa de Frequência		Comprimento de Onda	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
<b>ULF</b>	3 Hz	30 Hz	100 Mm	10 Mm
<b>VF</b>	30 Hz	300 Hz	10 Mm	1 Mm
<b>ELF</b>	300 Hz	3 kHz	1 Mm	100 km
<b>VLF</b>	3 kHz	30 kHz	100 km	10 km
<b>LF</b>	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
<b>MF</b>	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
<b>HF</b>	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
<b>VHF</b>	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
<b>UHF</b>	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
<b>SHF</b>	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
<b>EHF</b>	30 GHz	300 GHz	0,75	1 mm
<b>Submilimétrico</b>	300 GHz	3 THz	1 mm	100 µm
<b>Infravermelho</b>	3 THz	430 THz	100 µm	700 nm
<b>Visível</b>	430 THz	750 THz	700 nm	400 nm
<b>Ultravioleta</b>	750 THz	30 PHz	400 nm	10 nm
<b>Raio X</b>	30 PHz	3 EHz	100 pm	10 nm
<b>Raio Gama</b>	3 EHz			100 pm

Em geodésia por satélite é mais comum utilizar subdivisões das bandas de frequência definidas na área de radar. A nomenclatura de tais bandas foi fixada durante a segunda guerra mundial, de forma aleatória como um código secreto (Tabela. 2.2).

TABELA 2.2: DENOMINAÇÃO UTILIZADA PARA RADAR

Denominação	Faixa de Frequência		Comprimento de onda médio	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Banda P	220 MHz	300 MHz	1,36 m	1 m
Banda L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
Banda S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7,5 cm
Banda C	4 GHz	8 GHz	7,5 cm	3,75 cm
Banda X	8 GHz	12,5 GHz	3,75 cm	2,50 cm
Banda Ku	12,5 GHz	18 GHz	2,50 cm	1,67 cm
Banda K	18 GHz	26.5 GHz	1,67 cm	1,11 cm
Banda Ka	26.5 GHz	40 GHz	1,11 cm	7,5 mm

## 2.4 Estrutura e Subdivisões da Atmosfera Terrestre

Para efeitos práticos a atmosfera pode ser descrita como um conjunto de camadas concêntricas que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas. Várias são as subdivisões possíveis e, em muitos casos, segue-se a característica principal de interesse. A figura 2.3 apresenta de forma simplificada e esquemática as subdivisões da atmosfera (Seeber, 1993). Em relação à propagação de sinais, a atmosfera é subdividida em troposfera e ionosfera devido ao fato das características de propagação serem bem diferentes.

A troposfera localiza-se na parte inferior da atmosfera terrestre que se estende da superfície até aproximadamente 40 km / 60 km acima da superfície da Terra. A propagação de sinais depende principalmente da quantidade de vapor d'água e da temperatura.

A ionosfera localiza-se na parte superior da atmosfera terrestre entre 50 km / 70 km e 1.000 km acima da superfície. A propagação dos sinais é afetada principalmente por partículas livres e carregadas (íons).

A troposfera é um ambiente gasoso onde a temperatura decresce na razão de 6,5 °C/km a medida que a altura aumenta. O gradiente horizontal da temperatura pode ser de apenas alguns graus Celsius / 100 km (Seeber, 1993). Partículas carregadas praticamente inexistem. Os átomos e as moléculas, não carregadas, são bem misturados e desta forma pode-se dizer que a troposfera é praticamente um gás neutro. O índice de refração é pouco maior que 1, decresce com o incremento da altura e tende a ser 1 no limite superior da troposfera, correspondendo a um contínuo decréscimo da densidade do meio. Aproximadamente 90% da massa da atmosfera está abaixo de 16 km de altitude e 99% abaixo de 30 km (Möller, 1973 apud Seeber, 1993). Para as ondas eletromagnéticas no espectro de radiofrequência, a troposfera não é um meio dispersivo. O índice de refração não depende da frequência e, sim, da pressão do ar, da temperatura e da pressão do vapor d'água. Devido à dinâmica da troposfera é muito difícil modelar o índice de refração.

Altura (Km)	Temperatura	Ionização	C. Magnético	Propagação	Técnico
100 000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
10 000		Ionosfera			
1 000	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Atmosfera Inferior
100	Estratosfera				
10	Troposfera				

FIGURA 2.3: ESQUEMA DE SUBDIVISÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE  
 Fonte: Adaptado de Seeber, 1993

A ionosfera pode ser descrita como a parte superior da atmosfera e nela se encontram elétrons e íons em quantidade suficiente para afetar a propagação das ondas de rádio (Feen e Ebert, 1979, Davies, 1990). A geração de íons e elétrons é proporcional à intensidade da radiação solar e à densidade do gás. Na figura 2.4 está representado de forma esquemática o chamado perfil de Chapman. A forma exata da curva e, conseqüentemente, dos valores numéricos depende de vários parâmetros tornando-se uma função extremamente variável. A distribuição espacial de íons e elétrons é feita principalmente através de dois processos:

- Processo foto-químico: é dependente da insolação do Sol e comanda a razão de produção e decomposição das partículas ionizadas;
- Processo de transporte: causa a movimentação das camadas ionizadas.

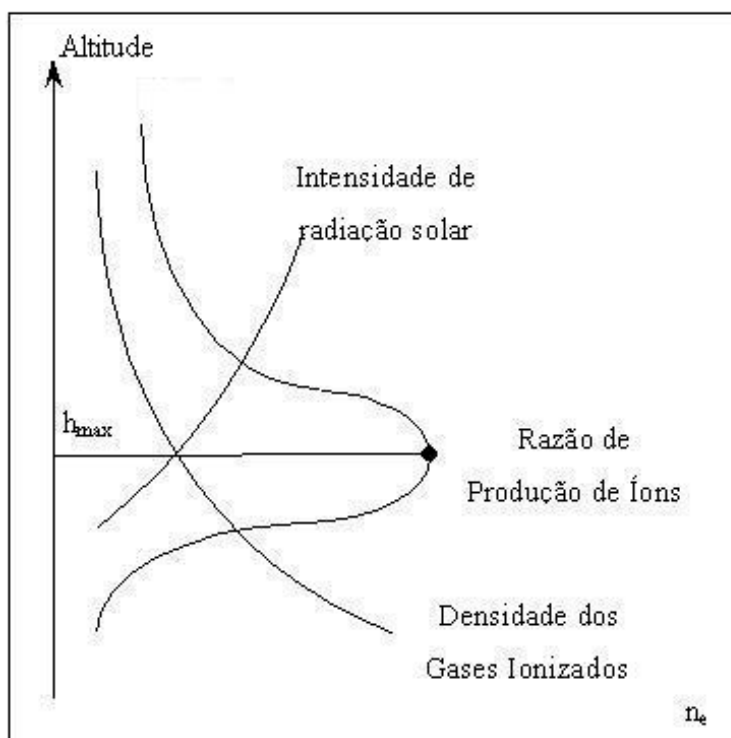


FIGURA 2.4: CURVA DE IONIZAÇÃO (PERFIL DE CHAPMAN)

Fonte: Adaptado de Seeber, 1993

Ambos processos criam diferentes camadas de gases ionizados em diferentes alturas. As principais camadas da ionosfera são conhecidas como  $D$ ,  $E$ ,  $F_1$  e  $F_2$  (tabela 2.3). Particularmente a camada  $F_1$ , localizada imediatamente abaixo da camada  $F_2$ , apresenta grandes variações que estão associadas ao número de manchas solares. As influências geomagnéticas também representam um papel importante. Por esta razão, a propagação de sinais na ionosfera é severamente afetada pela atividade solar, principalmente próximo ao equador magnético e também, em altas latitudes, ou seja, nos pólos (Seeber, 1993).

O estado da ionosfera é descrito pela densidade de elétrons  $n_e$  e a sua unidade é dada por: número de elétrons/m<sup>3</sup>. Na tabela 2.3 estão indicadas as quatro principais camadas da ionosfera de acordo com a altura e a densidade de elétrons (Seeber, 1993).

TABELA. 2.3: CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS CAMADAS DA IONOSFERA

Nome da Camada	Altura (km)	Densidade de Elétrons	
		Diurno	Noturno
$F_2$	200 a 1000	$10^6$	$3 \cdot 10^5$
$F_1$	140 a 200	$5 \cdot 10^5$	$10^3$
$E$	85 a 140	$10^5$	$2 \cdot 10^3$
$D$	60 a 90	$10^2$ a $10^4$	-

A distribuição das camadas ionosféricas varia durante o dia devido ao fato da insolação ser variável. A camada  $D$  é gerada apenas do lado da Terra iluminado pelo Sol.

O efeito do estado da ionosfera na propagação de ondas pode ser caracterizado pelo conteúdo de elétrons  $I$ :

$$I = \int_S^R n_e(s) ds \quad (2.18)$$

A integral representa o número total de elétrons que estão inclusos em uma coluna cilíndrica com sessão transversal de  $1\text{m}^2$  de área e que se estende ao longo do sinal  $s$  entre o satélite  $S$  e o receptor  $R$ . A unidade de medida é o TECU (Total Electron Content Unit = Unidade do Conteúdo Total de Elétrons).

$$1 \text{ TECU} = 1 \cdot 10^{16} \text{ el/m}^2.$$

O conteúdo de elétrons na vertical  $I_v$  toma a seguinte forma:

$$I_v = I \cdot \left( \frac{1 - r_e^2 \sin^2 E_{hi}}{r_e + h_m} \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

onde:

$E_{hi}$  é o ângulo de elevação entre o trajeto percorrido pelo sinal e o plano do horizonte na altitude média  $h_i$ ;

$H_m$  é a altura média da ionosfera;

$R_e$  é o raio terrestre.

A ionosfera é um meio dispersivo para as ondas de rádio. A fórmula de dispersão para o índice de refração  $n$  em um gás ionizado é:

$$n^2 = 1 - n_e \frac{C^2 \cdot e^2}{\pi \cdot f^2 \cdot m_e} \quad (2.20)$$

onde:

$n_e$  = densidade de elétrons livres

$e$  = carga do elétron

$m_e$  = massa do elétron

Re-arranjando a equação anterior e negligenciando os termos de ordem superior (Hartman e Leitinger, 1984) tem-se:

$$n = 1 - \frac{C \cdot n_e}{f^2} \quad (2.21)$$

onde,  $C = 40.3$  representa todos os parâmetros constantes.

A equação (2.21) indica o índice de refração e, desta maneira, o atraso na propagação do sinal é proporcional ao inverso do quadrado da frequência. Conseqüentemente, uma parte do atraso ionosférico pode ser modelada quando se utilizam receptores de dupla frequência. Além disso, da equação (2.21) conclui-se que altas frequências são menos afetadas pela ionosfera.

## 2.5 Propagação dos sinais através da Ionosfera e da Troposfera.

Na faixa de frequência de micro-ondas, o comportamento da refratividade  $N$  é função da altura (Figura 2.5). Na troposfera a refratividade é positiva e independe da frequência utilizada, desde que a mesma seja inferior a 30 GHz (Leick, 1995). Para a ionosfera, a refratividade é negativa e diretamente dependente da frequência. De acordo com a equação (2.21) a refratividade diminui à medida que a frequência aumenta. Uma consequência direta deste fato é que grandes acurácias são alcançadas apenas em modelos de propagação quando são utilizadas as altas frequências (veja Tabela. 2.4). Apesar disto, duas razões limitam a utilização de altas frequências:

- Para gerar altas frequências há a necessidade de utilizar tecnologias de ponta, que normalmente são caras e pouco disponíveis. A faixa de frequência acima de 10 GHz não pode ser utilizada facilmente com a tecnologia existente.

- As altas frequências sofrem uma absorção atmosférica crescente ao penetrarem na troposfera. Na ausência de chuvas a absorção pode ser desprezada para frequências entre 30 MHz e 30 GHz. Porém, quando há precipitação, sinais com frequências maiores que 1 GHz experimentam uma atenuação considerável (Seeber, 1993).

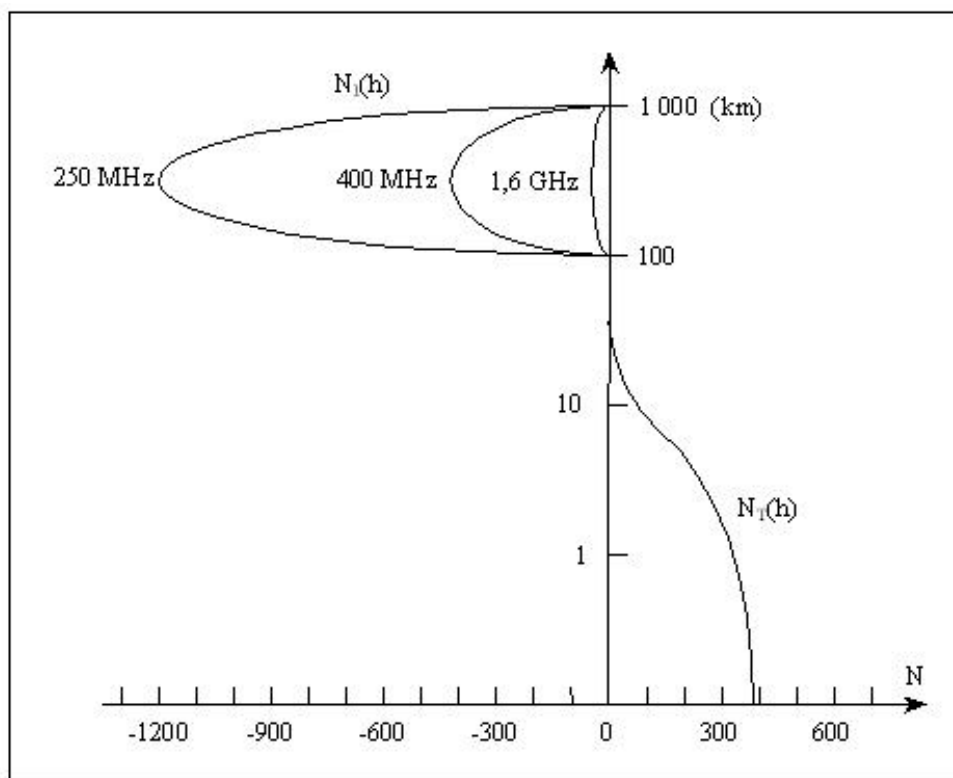


FIGURA 2.5: COMPORTAMENTO DA REFRACTIVIDADE EM MICRO-ONDAS  
Fonte: Adaptado de Seeber, 1993

A tabela 2.4 (Hieber, 1983) quantifica o atraso ionosférico vertical que afeta a propagação em diferentes frequências; indica ainda os erros residuais quando as medidas são realizadas com o uso de duas frequências. Fica claro que para o sistema GPS, operando com duas frequências (1227 e 1572) MHz, o erro residual (efeito médio) é normalmente menor que 1 cm.



TABELA 2.4: EFEITOS DO ATRASO IONOSFÉRICO VERTICAL NA PROPAGAÇÃO

<b>Tipo de Receptor</b>	<b>Frequência(s)</b>	<b>Efeito Médio</b>	<b>Efeito &lt; que 90%</b>	<b>Efeito Máximo</b>
<b>Uma Frequência</b>	400 MHz	50 m	250 m	500 m
	1600 MHz	3 m	15 m	30 m
	2000 MHz	2 m	10 m	20 m
	8000 MHz	0,12 m	0,6 m	1,2 m
<b>Dupla Frequência</b>	(150 e 400) MHz	0,6 m	10 m	36 m
	(400 e 2000) MHz	0,9 cm	6,6 cm	22 cm
	(1227 e 1572) MHz	0,3 cm	1,7 cm	4,5 cm
	(2000 e 8000) MHz	0,04 cm	0,21 cm	0,43 cm

### 2.5.1 Refração Ionosférica

A influência da ionosfera na propagação de sinais de rádio tem como principal característica a dispersão. O coeficiente de refração que descreve a propagação da fase pode ser escrito como um desenvolvimento em série (Seeber, 1993), da seguinte forma:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.22)$$

Os coeficientes  $c_i$  são independentes da frequência  $f$  da portadora; contudo, a densidade de elétrons  $n_e$ , depende do estado da ionosfera. O coeficiente  $c_2$  foi estimado pela equação (2.21) obtendo-se  $c_2 = -40,3 n_e$  e, desprezando termos de ordem superior, chega-se à seguinte relação:

$$n_p = 1 - \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2} \quad (2.23)$$

Conseqüentemente, conhecendo-se a densidade de elétrons, pode-se calcular uma correção aproximada para o atraso na propagação do sinal. Diferentes modelos foram desenvolvidos para estimar a densidade de elétrons, sendo que alguns deles serão apresentados no capítulo 4.

O coeficiente de refração  $n_g$  do atraso de grupo, de acordo com a equação 2.17 pode ser obtido derivando a (2.22):

$$\frac{dn}{df} = -\frac{2c_2}{f^3} - \frac{3c_3}{f^4} - \frac{4c_4}{f^5} - \dots \quad (2.24)$$

E a seguir, substituindo (2.24) em (2.17):

$$n_g = n_p - \frac{2c_2}{f^2} - \frac{3c_3}{f^3} - \frac{4c_4}{f^4} - \dots \quad (2.25)$$

E, finalmente, substituindo a equação (2.22) em (2.25) obtém-se:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_3}{f^3} - \frac{3c_4}{f^4} - \dots \quad (2.26)$$

Assim, o coeficiente  $n_g$  é maior do que 1 e a velocidade de grupo é menor do que a velocidade de fase de acordo com a equação (2.16). Truncando a equação após o segundo termo e lembrando que  $c_2 = -40,3 n_e$  tem-se:

$$n_g = 1 + \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2} \quad (2.27)$$

Comparando a equação (2.27) com a (2.23) fica claro que os efeitos da ionosfera nas velocidades de fase e de grupo são aproximadamente iguais em magnitude porém, têm sinais diferentes. Esta propriedade deve ser utilizada na redução de dados, quando ambos tipos de observáveis estão disponíveis, como no caso do sistema GPS.

### 2.5.2 Refração Troposférica

Os efeitos da refratividade em um meio não dispersivo são independentes da frequência utilizada e, assim, as ondas eletromagnéticas até 30 GHz (Leick, 1995), aproximadamente, são afetadas de maneira constante pela troposfera. A refratividade na atmosfera inferior pode ser descrita como uma função dos parâmetros meteorológicos introduzidos em uma fórmula empírica (Hartmann e Leitinger, 1984).

$$N_T = C_1 \frac{P'}{T} + C_2 \frac{e}{T} + C_3 \frac{e}{T^2} \quad (2.28)$$

onde:

$P$  representa a pressão do ar, em Hectopascal (HPa);

$e$  representa a pressão parcial do vapor d'água, em Hectopascal;

$P' = P - e$  representa a pressão do gás seco;

$T$  representa a temperatura, em graus Kelvin.

Reorganizando os termos da equação anterior e, separando os termos em úmido e hidrostático tem-se:

$$N_T = N_d + N_w \quad (2.29)$$

onde

$$N_d = C_1 \frac{P}{T}$$

$$N_w = C_2 \frac{e}{T} + C_3 \frac{e}{T^2} \cong C_4 \frac{e}{T^2}$$

Os valores recomendados para os coeficientes são (Hofmann-Wellenhof, 1997):

$$C_1 = 77,64 \text{ K mb}^{-1}, C_2 = -12 \text{ K mb}^{-1} \text{ e } C_4 = 3,718 \cdot 10^5 \cdot \text{K}^2 \text{ mb}^{-1}$$

Conduzindo a:

$$\begin{aligned} N_d &= 77,64 \frac{P}{T} \\ N_w &\cong 3,718 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

A integração do atraso troposférico na propagação ao longo do trajeto entre o observador  $R$  e o topo da atmosfera  $A$  produz a influência total na medida:

$$\Delta S_T = \int_R^A (n-1) ds = 10^{-6} \int_R^A N_T ds \quad (2.31)$$

A integral pode ser resolvida quando o comportamento da refratividade ao longo do trajeto percorrido pelo sinal é conhecido. Os termos úmido e hidrostático são determinados separadamente devido ao fato de tais termos serem formulados como funções distintas da altura:

$$\Delta S_T = \Delta S_d + \Delta S_w = 10^{-6} \int_R^{H_d} N_d ds + 10^{-6} \int_R^{H_w} N_w ds \quad (2.32)$$

onde:

$H_d$  e  $H_w$  representam as altitudes efetivas dos termos seco e úmido, respectivamente.

As medidas diretas da refratividade ao longo do trajeto de propagação do sinal exigem técnicas muito dispendiosas e normalmente não são possíveis. Desta forma, vários foram os modelos desenvolvidos para representar o comportamento da refratividade em função da altura. Os primeiros estudos foram realizados por Hopfield (1969, 1971) e o modelo desenvolvido, que leva seu nome, sofreu algumas modificações e adaptações. No entanto, continua sendo utilizado até os nossos dias.

Considerações teóricas conduziram à seguinte função de quarto grau dependente da altura para a componente hidrostática:

$$N_d(h) = N_{d0} \left( \frac{H_d - h}{H_d} \right)^4 \quad (2.33)$$

onde:

$N_{d0}$  representa a refratividade na superfície de referência (2.30);

$h$  representa a altura acima dessa superfície.

O expoente 4 e o parâmetro  $H_d$  (em metros) foram determinados empiricamente por Hopfield a partir de observações oriundas de balões que foram lançados ao redor do planeta.

$$H_d = 40,136 + 148,72(t - 273,16) \quad (2.34)$$

As outras hipóteses são:

- a temperatura decresce com a altitude na razão de 6,71 °C / km;
- a atmosfera seca comporta-se como um gás ideal;
- a atmosfera é composta de camadas esféricas;
- a refratividade não varia com o passar do tempo.

Para o termo que representa a parte úmida, não foram feitas considerações teóricas e desta forma, a expressão  $N_w$  usada na prática é:

$$N_w(h) = N_{w0} \left( \frac{H_w - h}{H_w} \right)^4 \quad (2.35)$$

Para  $H_w$  é adotado um valor médio de 11 000 m.

A integração da equação (2.32) ao longo do caminho curvo do sinal é muito difícil. Na prática adotam-se várias simplificações, entre elas, a que assume a linha de visada como uma linha reta. Hopfield desenvolveu o seguinte algoritmo para o cálculo (Hopfield, 1971):

$$\Delta S_T = \frac{K_d}{\text{sen}(E^2 + 6,25)^{1/2}} + \frac{K_w}{\text{sen}(E^2 + 2,25)^{1/2}}$$

com

$$\begin{aligned} K_d &= 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{P}{T} H_d \\ K_w &= 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_w \end{aligned} \quad (2.36)$$

onde:

$K_d$  e  $K_w$  representam o efeito total da refração troposférica na direção zenital;

$E$  representa o ângulo de elevação do satélite (em graus) como é visto pelo observador.

Vários outros algoritmos foram desenvolvidos e podem ser encontrados em Saastamoinen (1973), Black (1978). Há algumas publicações em português que tratam da troposfera, como por exemplo: Oliveira (1990), Silva (1998) e Sapuci (2001).

### **3 A IONOSFERA E SEUS EFEITOS NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS DO SISTEMA GPS**

Neste capítulo serão descritas as características da ionosfera, suas relações com o campo geomagnético, com a atividade solar, seus efeitos na propagação dos sinais do sistema GPS bem como alguns dos modelos utilizados para representar a ionosfera.

#### **3.1 A Ionosfera**

O termo ‘ionosfera’ foi utilizado pela primeira vez por Sir Robert Watson-Watt em uma carta enviada ao British Radio Research Board, em 1926 (Komjathy, 1997). Essa expressão passou a ser utilizada com maior frequência a partir de 1932 pois Watson-Watt, Appletron, Ratcliff e outros pesquisadores passaram a utilizar o referido termo em suas publicações científicas. Antes do termo ‘ionosfera’ obter aceitação internacional a camada ionizada superior da atmosfera era chamada de camada de Kennelly-Heaviside (Hunsucker, 1991).

##### **3.1.1 Perfil Vertical da Ionosfera**

A altura inicial em que a ionosfera se torna perceptível é por volta de 50 km e chega a aproximadamente 1000 km de altitude. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida pois a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. Esta pode ser definida como a região de altura superior a 1000 km onde a densidade atmosférica neutra é muito pequena e os íons positivos são predominantemente prótons. Na altitude de aproximadamente 30.000 km, a plasmasfera diminui formando a plasmaspausa que vem a ser a fronteira entre a plasmasfera e a magnetosfera. A densidade típica de elétrons na plasmasfera é de cerca de  $10^{10}$  el/m<sup>3</sup> (Davies, 1990).

As emissões solares de luz ultravioleta extrema (EUV) e de raios-X, quando encontram átomos e moléculas gasosas, transferem energia suficiente para provocar a fotoionização que consiste na liberação de íons carregados positivamente e elétrons livres. Uma segunda causa de ionização, porém, de menor importância, é a radiação cósmica. O processo contrário à ionização em que íons e elétrons se reagrupam formando átomos e moléculas é denominado de recombinação. Na região inferior da

ionosfera, ocorre o efeito denominado de junção eletrônica em que os elétrons livres podem se combinar com átomos neutros produzindo íons carregados negativamente. A absorção da luz EUV, que aumenta à medida em que a altura diminui, e o aumento da densidade de moléculas neutras resulta na formação de uma camada com maior densidade de elétrons. Todavia, em função da diversidade de átomos e moléculas na atmosfera e suas diferentes razões de absorção, uma série de camadas distintas pode ser definida em função da densidade de elétrons, ou seja, em função de suas características físicas. Tais camadas foram representadas pelas letras D, E, F1 e F2 (ver capítulo 2) e compõem o que se chama ionosfera inferior. A ionosfera superior está situada entre a parte superior da camada F2 e o limite superior da ionosfera (figura 3.1).

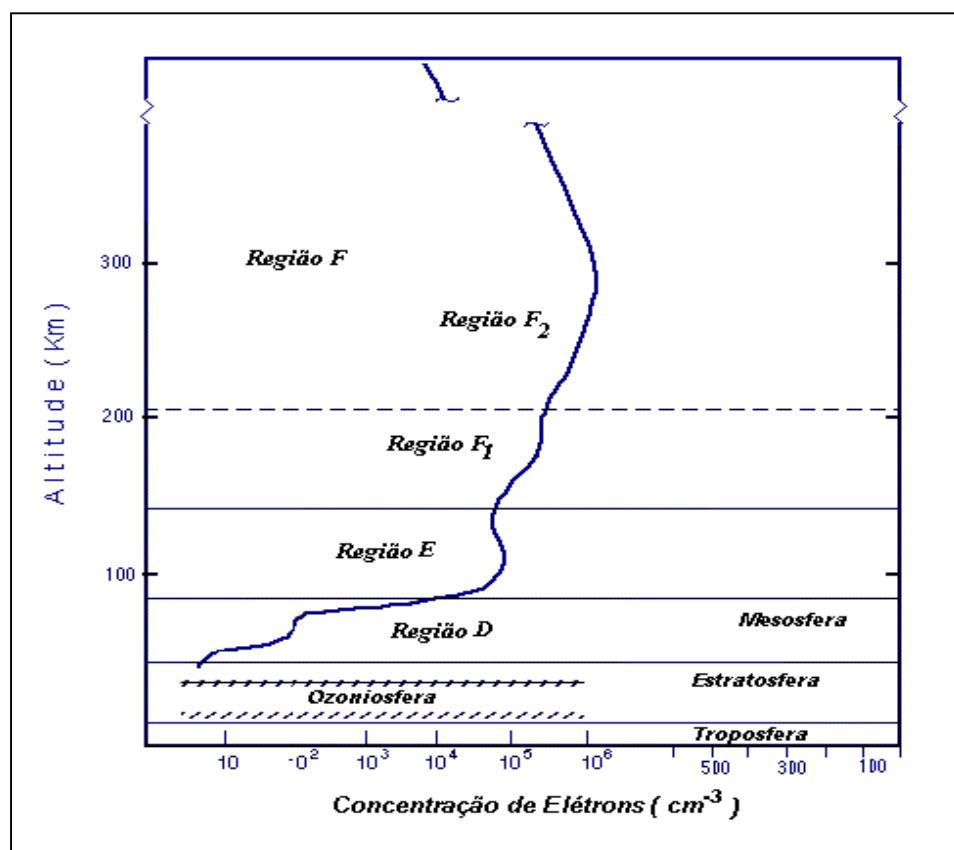


FIGURA 3.1: PERFIL TÍPICO DA IONOSFERA

Fonte: Adaptado de <http://ion.le.ac.uk/ionosphere/profile.html> (University of Leicester)

A frequência mínima para que uma onda eletromagnética penetre na camada ionosférica é denominada de frequência crítica, frequência de plasma ou frequência de penetração (Komjanthy, 1997). Para cada camada há uma frequência crítica que é denominada de foD, foE, foF1 e foF2, estando diretamente correlacionada com a

nomenclatura utilizada para cada camada. O quadrado da frequência crítica é linearmente proporcional à máxima densidade de elétrons em cada uma das camadas, sendo representada por NmD, NmE, NmF1 e NmF2 respectivamente. As variações nas frequências foD, foE e foF1 estão relacionadas com a posição do Sol (ângulo zenital) ao passo que a frequência foF2 não está, pois ela é controlada também pela dinâmica da atmosfera neutra. As camadas D, E e F1 são, assim, controladas primariamente pela posição do Sol, indicando uma grande variação diurna, sazonal e latitudinal. As variações diurnas nas camadas D, E e F1 ficam reduzidas, ou mesmo desaparecem, durante a noite. A camada F1 desaparece durante o inverno. No verão, quando o ângulo zenital do Sol é menor, a camada F1 se torna presente. A frequência crítica de todas as camadas está sujeita às variações do ciclo solar que provocam alterações na intensidade de radiação. Para um maior detalhamento da ionosfera pode-se consultar Davies, 1990.

#### **3.1.1.1 Camada D**

A camada D está localizada entre 50 km e 90 km de altura. Esta camada apresenta como fonte primária de ionização o raio-x, Lyman- $\alpha$  e a raios cósmicos (ionização abaixo de 60 km) que ganha predominância no período de atividade mínima solar. Afeta igualmente a referida camada independente de ser dia ou noite. Apesar disto, durante a noite os elétrons podem se acoplar aos átomos e moléculas formando íons negativos que vão causar o desaparecimento da camada D, uma vez que desaparece as suas características definidoras. Em consequência disto, entre 70 km e 90 km de altura os elétrons não estão presentes durante a noite; porém, durante o dia sua presença causa uma variação distinta na densidade de elétrons. O valor típico da densidade de elétrons ao meio dia local, em médias-latitudes<sup>1</sup>, varia entre  $6,1 \times 10^8$  el/m<sup>3</sup> e  $13,1 \times 10^8$  el/m<sup>3</sup>, em função da atividade solar (Komjanthy, 1997).

#### **3.1.1.2 Camada E**

O comportamento da camada E é praticamente dependente do nível de atividade e do ângulo zenital do Sol. Ela é livre de distúrbios, diferentemente das camadas D e F, e só está presente durante o dia. Na realidade, esta camada não

---

<sup>1</sup> Ver item 3.2.



desaparece completamente à noite, porém, para efeitos práticos, geralmente se assume que a densidade de elétrons cai a zero no período noturno. A fonte primária de ionização é a emissão de raios-X do Sol, resultando em diferentes densidades de elétrons que indicam o ciclo-solar, as variações sazonais e as variações diárias. O valor típico da densidade de elétrons para médias-latitudes, ao meio dia local, varia entre  $1,3 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> e  $1,7 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> (Komjanthy, 1997).

### **3.1.1.3 Camada F1**

A camada F1 é observada apenas durante o período diurno pois a densidade de elétrons é controlada primariamente pelo ângulo zenital do Sol. A principal fonte de ionização é a luz EUV. Quando a camada F1 está presente, a densidade de elétrons varia rapidamente, sendo sensível essa variação em questão de minutos. Este efeito é mais pronunciado durante o verão, para um período de poucas manchas solares, e para períodos com tempestades ionosféricas.

### **3.1.1.4 Camada F2**

A camada F2 é a mais importante considerando a propagação das ondas de alta frequência (HF). O efeito de ionização desta camada não depende do ângulo zenital do Sol. A frequência crítica (foF2) desta camada, ao meio dia local do mês de janeiro no hemisfério norte é superior a duas vezes o valor do mês de julho. A variação global da frequência crítica foF2 indica uma grande dependência geomagnética. Essa frequência também indica que há uma forte dependência linear com o número de manchas solares. Valores típicos da densidade de elétrons para regiões de médias-latitudes ao meio dia local variam entre  $2,8 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> e  $5,2 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> (Komjanthy, 1997).

### 3.2 Principais Regiões Geográficas da Ionosfera

Embora não seja possível estabelecer exatamente a amplitude das regiões geográficas da ionosfera, projetadas na superfície terrestre em termos de latitude geomagnética, é viável indicar, ainda que aproximadamente, as regiões e suas respectivas amplitudes como mostra a figura 3.2. A região de altas-latitudes está delimitada entre  $\pm (60^\circ \text{ a } 90^\circ)$ ; já a região de médias-latitudes está delimitada entre  $\pm (20^\circ \text{ a } 60^\circ)$  e, a região de baixas-latitudes limita-se entre  $\pm 20^\circ$ .

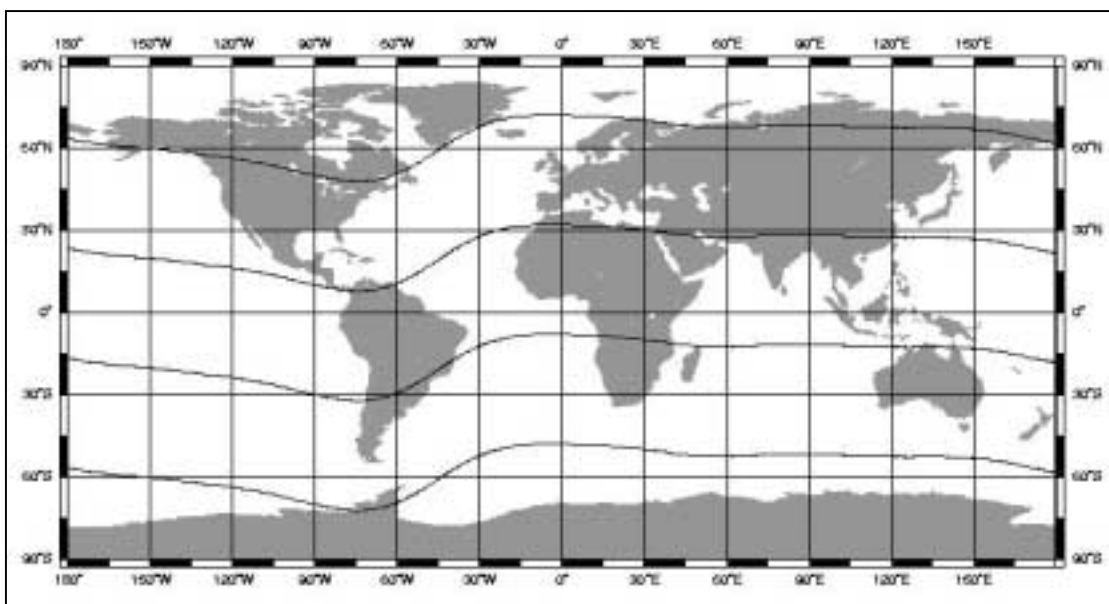


FIGURA 3.2: MAPA-MÚNDI INDICANDO AS ZONAS GEOGRÁFICAS DA IONOSFERA

Os limites destas regiões não foram definidos arbitrariamente, mas selecionados em função da evidência de regiões com processos ionosféricos relativamente homogêneos.

Os valores de pico da densidade de elétrons são usualmente encontrados na região equatorial da ionosfera, normalmente no início da tarde. Há ainda alta concentração de elétrons (plasma) nas baixas-latitudes  $\pm(15^\circ \text{ a } 20^\circ)$  situados em ambos os lados do equador magnético. Tal distribuição latitudinal de elétrons, caracterizada pelos valores baixos no equador e bastantes elevados nas baixas latitudes, é referido como anomalia equatorial, conhecida também como anomalia “Appleton”. Os fenômenos denominados de instabilidade do plasma que ocorrem na camada F (no equador) são agrupados em um nome genérico denominado de

espalhamento equatorial (equatorial spread F - ESF). As instabilidades do plasma ocorrem normalmente à noite e apresentam uma grande flutuação no conteúdo de elétrons. O que mais impressiona os pesquisadores é o fato de tais flutuações ocorrerem em zonas onde o grau de ionização é comparativamente baixo.

Em altas-latitudes, o pico na densidade de elétrons é consideravelmente menor do que em baixas-latitudes. Entretanto, a região de altas-latitudes apresenta muita instabilidade do plasma, ou seja, variações rápidas na densidade de elétrons, as quais são mais pronunciadas nesta região do que em regiões de baixas-latitudes.

Nas calotas polares onde o ângulo horizontal do Sol é relativamente pequeno e praticamente constante ao longo de um dia e, mesmo assim, a variação diurna da ionosfera é detectável. Isto mostra que a incidência da luz solar é um fator considerável na variação da densidade de elétrons na ionosfera.

### **3.3 Irregularidades Ionosféricas**

Os distúrbios ionosféricos em movimento (TIDs - Travelling Ionospheric Disturbances) podem causar grandes variações na densidade de elétrons (Kirchhoff, 1991). Tais eventos podem ser divididos em:

- Distúrbios ionosféricos de grande escala em movimento (LSTIDs – Large-scale TIDs), ocorrem com períodos entre 30 minutos e 3 horas e o comprimento de onda horizontal excede 1 000 quilômetros (Hargreaves, 1992);
- Distúrbios ionosféricos de média escala em movimento (MSTIDs – Medium-scale TIDs), ocorrem com períodos entre 10 minutos e 1 hora e o comprimento de onda horizontal é de várias centenas de quilômetros (Hargreaves, 1992),
- Distúrbios ionosféricos de pequena escala em movimento (SSTIDs – Short-scale TIDs), ocorrem com períodos de vários minutos e o comprimento de onda horizontal é de dezenas de quilômetros (Spoeltra, 1992).

Pouco se conhece acerca das irregularidades ionosféricas. TIDs são observados geralmente em médias-latitudes, mas acredita-se que seja um fenômeno global.

A cintilação pode ser descrita como uma rápida variação na amplitude e fase dos sinais que são recebidos de fontes extras ionosféricas, causada pelas estruturas irregulares de plasma com escalas de centenas de metros. (Wanninger, 1992). Isso ocorre, preferencialmente, na faixa de  $+30^\circ$  a  $-30^\circ$  de latitude sendo que os eventos de maior intensidade ocorrem na zona entre  $+10^\circ$  a  $-10^\circ$  de latitude a partir da linha do equador geomagnético (Wanninger, 1993). Há, também, ocorrências na região da aurora polar, sendo que seu efeito máximo ocorre entre uma hora após o por do Sol e a meia noite, hora local (Klobuchar, 1991). Os efeitos provocados pela cintilação atingem o máximo entre setembro e março na América, África e Índia, porém, no mesmo período, na região do Oceano Pacífico a cintilação é mínima. Entre abril e setembro a situação é oposta. No Brasil, assim como em todo o continente americano, o período de ocorrências máximas está compreendido entre setembro e março e o período compreendido entre abril e agosto apresenta pouquíssimos eventos relacionados à cintilação (Campos et al., 1993).

Finalizando, há ainda os chamados eventos esporádicos como é o caso das tempestades ionosféricas. Estes eventos estão, em geral, associados aos distúrbios intensos no campo geomagnético, ou seja, tempestades magnéticas produzidas pelas explosões solares. Durante uma tempestade ionosférica a densidade de elétrons e o conteúdo total ionosférico podem sofrer grandes variações, resultando em grande modificação da anomalia equatorial. Esta anomalia poderá sofrer grande amplificação e/ou inibição de modo que a intensidade de tais mudanças acabe variando consideravelmente de um evento para outro tornando impossível uma previsão da intensidade de tais tempestades (Abdu, 2002).

Outros trabalhos que descrevem detalhadamente a ionosfera são: Davies, 1990; Kelley, 1989 e Ratcliffe, 1972.

### **3.4 O Campo Magnético Terrestre**

Próximo à superfície da Terra, o campo geomagnético pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra (Kirchhoff, 1991). Em altitudes maiores que algumas vezes o raio terrestre, entretanto, as linhas do campo geomagnético sofrem distorção devido ao vento solar. Os pontos onde o eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra, no norte e no sul, são denominados de pólo

norte e pólo sul geomagnéticos, respectivamente. A interseção entre o plano perpendicular ao eixo, do dipolo, passando pelo ponto médio, e a superfície terrestre define aproximadamente o equador geomagnético. Na figura 3.3 observa-se o equador geomagnético definido pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA- International Geomagnetic and Aeronomy) para o IGRF 2000 - International Geomagnetic Reference Frame - 2000.

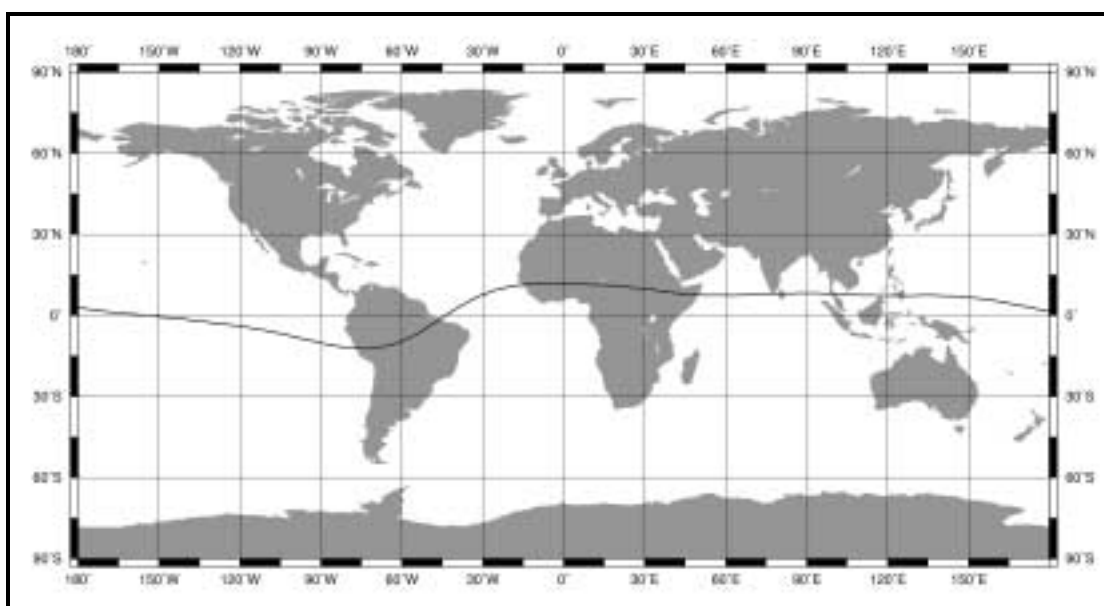


FIGURA 3.3: EQUADOR GEOMAGNÉTICO

### 3.5 Influência da Atividade Solar

As emissões solares, que ocorrem em períodos que variam de poucos minutos a várias semanas (Webster, 1993), são as maiores causadoras da variação do nível de ionização da atmosfera terrestre. Há três tipos de fenômenos associados à atividade solar.

O primeiro está relacionado ao número de explosões solares. Estes fenômenos, localizados, são denominados distúrbios ionosféricos súbitos (SID - Sudden Ionospheric Disturbance). São provocados por um rápido aumento de energia na superfície solar. Este aumento de energia provoca a emissão de raios-X e raios-ultravioleta. Tais eventos caracterizam-se pela sua curta duração, que varia de alguns minutos a uma hora. A face terrestre iluminada pelo Sol tem um aumento

considerável de ionização na região D, o que acaba provocando uma atenuação nos sinais de rádio.

O segundo fenômeno está associado aos “buracos” na coroa solar. Estes buracos são os geradores das correntes de alta velocidade do vento solar. Ocorrem, em geral, durante o período de declínio da atividade solar e causam as tempestades ionosféricas.

O terceiro e último fenômeno está associado às manchas solares. Estas manchas provocam uma variação da radiação emitida pelo Sol que, por sua vez, afetam o grau de ionização da atmosfera terrestre. As manchas solares foram descritas pela primeira vez por Teofrasto por volta do ano 325 a.C. (Schaer, 1999) e são os fenômenos mais notados na superfície do Sol, caracterizando a atividade solar. As manchas solares aparecem escuras pois a temperatura da superfície é baixa se comparada com a fotosfera. O período de duração deste fenômeno é muito variável; algumas manchas aparecem por apenas alguns dias, enquanto outras permanecem por diversas rotações solares cujo período médio é de 27 dias.

Em 1849 Johann Rudolph Wolf do Observatório de Zurich (SIDC, 2001) propôs uma fórmula para o cálculo do número de manchas solares. Tal fórmula é conhecida como índice de Wolf ou de Zurich simbolizado pela letra  $R$  que representa o número de manchas solares. A equação tem a seguinte forma:

$$R = K(10g + s) \quad (3.13)$$

onde:

$g$  corresponde ao número de grupos de manchas;

$s$  corresponde ao número individual de manchas;

$K$  fator de escala introduzido para possibilitar a comparação de resultados obtidos por diferentes observadores em locais distintos e utilizando diferentes telescópios.

A divisão do número de manchas em  $g$  e  $s$  é de certa forma arbitrária. Assim sendo, o número de manchas solares  $R$  definido por essa equação é um índice com um alto grau de subjetividade pois depende do observador e das características do equipamento utilizado. Apesar disto, este é um índice de grande valor em função da existência uma série temporal disponível por várias centenas de anos com valores

médios diários, mensais e anuais. Observa-se na figura 3.4 a média mensal do número de manchas solares por um período aproximado de 300 anos (SIDC, 2001).

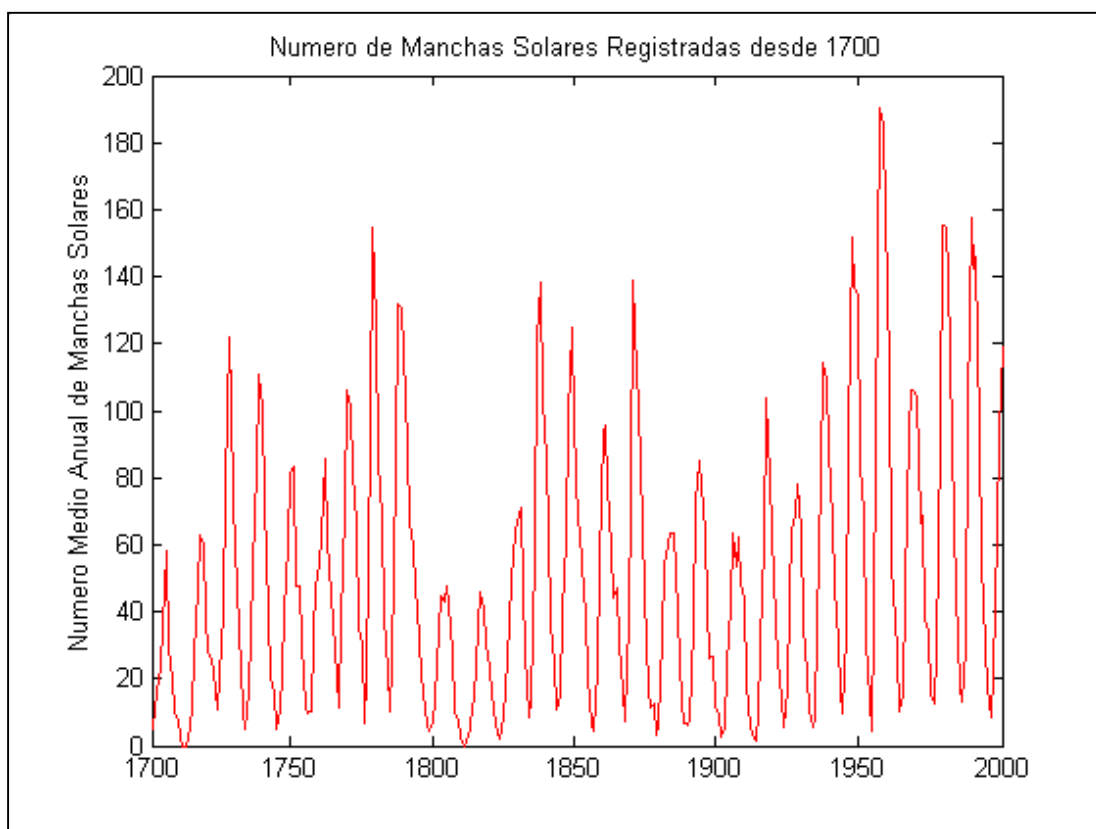


FIGURA 3.4 MÉDIA MENSAL DO NÚMERO DE MANCHAS SOLARES

A análise espectral da série temporal de manchas solares, realizada por Schaer (1999), indica a presença de períodos de cerca de 80 anos, 22 anos e 11 anos. Pode-se observar na figura 3.5 que o ciclo solar não é simétrico; ele tem um período de cerca de 4,8 anos para sair do mínimo e atingir o máximo. Do período de máximo para o de mínimo, o intervalo é de cerca de 6,2 anos (Schaer, 1999). A maior média anual de manchas solares, ocorreu em 1957, durante o décimo nono ciclo solar (NGDC, 2001). Há ainda uma pronunciada periodicidade de 27 dias causada pela rotação do Sol (Schaer, 1999).

A figura 3.5 apresenta os últimos 50 anos do ciclo solar. O último mínimo ocorreu em 1996 e o máximo 2000/2001.

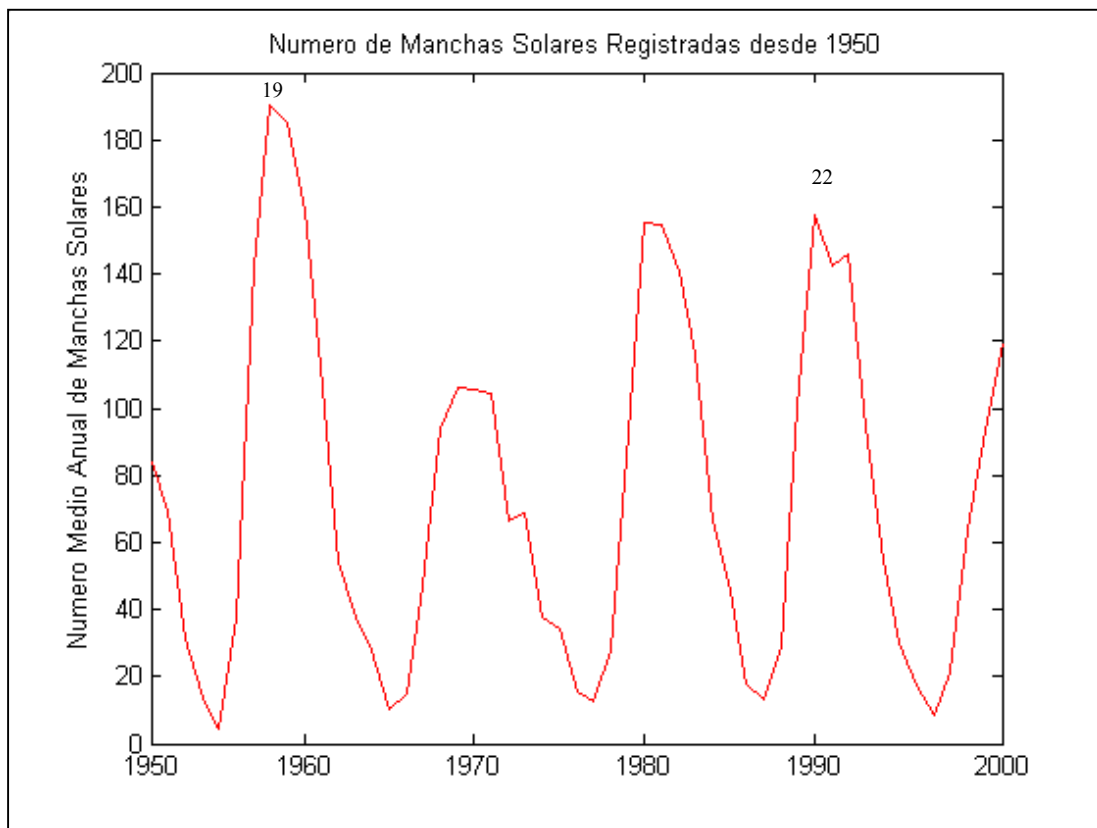


FIGURA 3.5: ÚLTIMOS CICLOS SOLARES COM O MÁXIMO EM 1989 E 2000/2001

### 3.6 Índices Magnéticos $K_p$ e $A_p$

Os distúrbios geomagnéticos são monitorados a partir de estações em terra, instaladas em observatórios magnéticos, que registram as componentes do campo. O índice  $K_p$  global (planetary index) é obtido a partir de uma média que envolve 13 observatórios distribuídos entre  $46^\circ$  e  $63^\circ$  ao norte e  $-46^\circ$  e  $-63^\circ$  ao sul do equador geomagnético (Komjathy, 1997). Os níveis locais dos distúrbios geomagnéticos  $K$  são determinados, para um período de observação de 3 horas, através da diferença entre o maior e o menor valor observado na componente horizontal, do campo magnético, mais afetada pelos distúrbios. Este índice diário tem uma escala com 28 níveis, variando de 0 (muito calmo) a 9 (muito perturbado), sendo cada intervalo subdividido em três partes. Como o índice  $K$  tem características locais, aplica-se uma tabela de conversão (GFZ, 2001) para eliminar os efeitos locais gerando então o índice  $K_p$  global.



### 3.7 Efeitos da Ionosfera na Propagação dos Sinais do Sistema GPS

Os sinais do sistema GPS, ao se propagarem entre a antena do satélite e a antena do receptor, estão sujeitos a diferentes efeitos:

- Atraso devido à propagação na ionosfera;
- Atraso devido à propagação na troposfera;
- Multicaminho na região próxima à antena do receptor.

O atraso na propagação provocado pela ionosfera ocorre entre 50 km e 1000 km acima da superfície terrestre e depende diretamente da quantidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal e de sua frequência. O atraso ionosférico depende da frequência e, no caso do sistema GPS, este atraso pode ser da ordem de 1 m ou atingir até mais de 100 m (Klobuchar, 1991). Além disso, deve-se lembrar que a ionosfera é um meio dispersivo e, desta forma, a velocidade de fase (propagação da portadora) não é igual à velocidade de grupo (propagação dos códigos). Observa-se igualmente o efeito combinado da ionosfera e da plasmasfera devido ao fato dos satélites do sistema GPS estarem colocados em órbitas quase circulares onde o semi-eixo maior é da ordem de 26.000 km (Leick, 1995) ou seja, aproximadamente 20.000 km acima da superfície terrestre, ultrapassando em muito o limite superior da ionosfera que é de aproximadamente 1 000 km.

Para medidas da fase da portadora, tem-se o coeficiente de refração (Seeber, 1993) conforme a equação 2.23, já vista.

$$n_p = 1 - 40,3 \frac{n_e}{f^2} \quad (3.1)$$

onde:

- $n_e$  indica a quantidade de elétrons ao longo do trajeto de propagação do sinal;
- $f$  indica a frequência da portadora.

O efeito, de primeira ordem, de ionização na propagação do código (atraso de grupo) tem a mesma dimensão que a propagação da fase da portadora, porém, com sinal oposto (vide equação 2.27).

$$n_g = 1 + 40,3 \frac{n_e}{f^2} \quad (3.2)$$

Integrando sobre todo o trajeto de propagação  $s$ , obtém-se o efeito total da refração ionosférica na medida da pseudodistância  $R$  com os códigos:

$$\delta R_{ION} = \int_s (n_g - 1) \cdot ds \quad (3.3)$$

$$\delta R_{ION} \approx \frac{40,3}{f^2} \int_s n_e \cdot ds \quad (3.4)$$

A expressão correspondente para as medidas de fase é:

$$\delta R_{ION} \approx -\frac{40,3}{f^2} \int_s n_e \cdot ds \quad (3.5)$$

A integral não conhecida pode ser determinada através de medidas das distâncias  $R1 = R(L1)$  e  $R2 = R(L2)$  em ambas frequências:

$$\begin{aligned} R &= R_1 - \delta R_{1,ION} \\ R &= R_2 - \delta R_{2,ION} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.4) em (3.6) obtém-se a correção da distância para medidas realizadas com o código em  $L1$ , derivada de observações realizadas com receptores de dupla frequência:

$$\delta R_{1,ION} = -\frac{R_1 - R_2}{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}} \quad (3.7)$$

Devido à aproximação realizada na equação (2.27), a equação (3.7) é chamada de correção de primeira ordem da refração ionosférica. Os erros remanescentes chegam a poucos centímetros (Seeber, 1993). Assim, os efeitos da ionosfera nos sinais do sistema GPS podem ser muito bem modelados a partir de observações realizadas com receptores de dupla frequência. A tabela 3.1 apresenta os erros máximos na distância que podem ser esperados para as duas frequências do sistema GPS e para a combinação das mesmas, ambos na componente vertical. Para distâncias inclinadas a correção aumenta (Hartmann, Leitinger, 1984).

TABELA 3.1: ERRO MÁXIMO NA DISTÂNCIA (VERTICAL) PROVOCADO PELA IONOSFERA

Frequência	Efeito de 1ª ordem $1/f^2$ (m)	Efeito de 2ª ordem $1/f^3$ (m)	Efeito de 3ª ordem $1/f^4$ (m)
L1	32,5	0,036	0,002
L2	53,5	0,076	0,007
Combinação L1, L2	0,0	0,026	0,006

A equação correspondente para observações realizadas com a fase tem a seguinte forma (Wells, 1987):

$$\delta\Phi_{ION}(L1) = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \left( \Phi(L1) - N(L1) - \frac{f_1}{f_2} (\Phi(L2) - N(L2)) \right) \quad (3.8)$$

onde:

$N(L1)$  e  $N(L2)$  são, respectivamente, as ambigüidades em  $L1$  e  $L2$ .

A equação (3.8) descreve o avanço de fase provocado pela ionosfera para as observações realizadas com a frequência  $L1$ . Realizando a combinação de  $L1$  e  $L2$  tem-se a combinação linear livre da ionosfera (ionospheric free linear combination):

$$\Phi(L_3) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi(L1) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi(L2) \quad (3.9)$$

Ao utilizar apenas receptores de uma frequência, a correção de acordo com a equação (3.7) ou (3.8) torna-se impossível. Neste caso há várias opções disponíveis, recorrendo à utilização de modelos da ionosfera.

### 3.8 Modelos da Ionosfera

A ionosfera afeta os sinais GPS no seu trajeto entre o satélite e o receptor provocando um atraso no código (grupo) e um avanço na fase da portadora. Este efeito ocasiona um incremento nas distâncias obtidas a partir do código e um decremento nas distâncias obtidas a partir da fase da portadora. O valor para o avanço da fase e para o atraso do código é idêntico, porém, com sinais opostos. O efeito da ionosfera nos sinais GPS é diretamente proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência.

#### 3.8.1 Modelos para Correção da Refração Ionosférica em Receptores de uma Frequência

Tais modelos podem ter seus coeficientes transmitidos na mensagem de navegação; ou ainda, obtidos a partir de observações realizadas com receptores de dupla frequência.

### 3.8.1.1 Modelo Transmitido na Mensagem GPS (Broadcast)

O modelo matemático para correção da ionosfera transmitido com as mensagens de navegação é conhecido como modelo Broadcast ou modelo de Klobuchar (1987). Tal modelo, permite o cálculo do atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica para a pseudodistância entre o satélite e o receptor. Para a correção da fase da portadora deve-se trocar o sinal do atraso calculado. São calculados e atualizados diariamente os oito coeficientes do modelo, ( $\alpha_i$  e  $\beta_i$ ,  $i = 0$  a 3), que são então, transmitidos pelos satélites, como parte das mensagens de navegação (Hofmann-Wellenhof, 1997). Este modelo é considerado um modelo Global e é válido para qualquer usuário do sistema.

Para descrever a variação diurna, o modelo utiliza uma função cosseno com amplitude máxima às 14:00 horas locais. Durante o período noturno, o efeito da ionosfera em L1 é considerado constante e corresponde a 5 nanosegundos (DC = 5 ns), que equivalem, aproximadamente, a 1,5 m ou 9,24 unidades de TEC (TECU). A amplitude  $A$  e o período  $P$  da função cosseno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites e representados por um polinômio de terceiro grau. A figura 3.6 mostra uma representação simples da ionosfera, a partir das mensagens transmitidas.

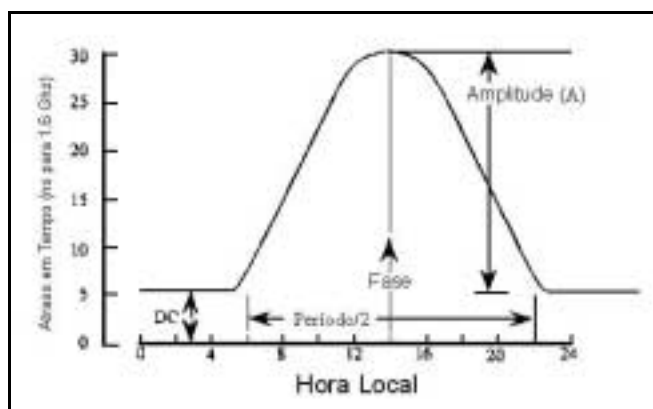


FIGURA 3.6 - REPRESENTAÇÃO DA IONOSFERA NO MODELO BROADCAST  
Fonte: Newby et al., 1990

Para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L1, o modelo utiliza os oito coeficientes  $\alpha_i$  e  $\beta_i$ , a latitude  $\varphi$  e a longitude geodésica  $\lambda$  da estação, o azimute  $Az$  e o ângulo de elevação  $a$  do satélite e o tempo GPS  $T$  da época

de observação. O tempo GPS é dado em segundos a partir do início de cada semana e as unidades angulares são dados em semicírculo (1 SC = 180 graus).

A seqüência do cálculo, para a obtenção da correção é, em geral, dividida em etapas (Leick, 1995):

Para o cálculo da correção ionosférica ao longo do caminho satélites / receptores na portadora L1 temos:

$$I_{1r}^s = \begin{cases} c F [DC + A \cos x], & \text{se } |x| < 1,57 \\ c F (DC) & , \text{se } |x| > 1,57 \end{cases} \quad (3.10)$$

onde:

$c$  indica a velocidade da luz no vácuo;

$DC$  indica uma constante;  $DC = 5 \times 10^{-9}$  segundos;

$x$  indica a fase em radianos; e tem a seguinte equação:

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{P} \quad (3.11)$$

Para o cálculo do Período a equação tem a seguinte forma:

$$P = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n, & \text{se } P \geq 72000 \\ 72000 & , \text{se } P < 72000 \end{cases} \quad (3.12)$$

Para o cálculo da Amplitude temos a seguinte expressão:

$$A = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n, & \text{se } A \geq 0 \\ 0 & , \text{se } A < 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Para o cálculo da latitude geomagnética  $\phi_m$  a equação é:

$$\phi_m = \varphi_{IP} + 0,064 \cos(\lambda_{IP} - 1,617) \quad (3.14)$$

A equação (3.15) é utilizada para o cálculo da latitude do ponto ionosférico  $\varphi_{IP}$ . Este ponto formado pela interseção do vetor satélite/receptor e pela camada ionosférica de altitude média  $h_m$ .

$$\varphi_{IP} = \begin{cases} \varphi + \psi \cos Az, & \text{se } |\varphi_{IP}| \leq 0,416 \\ 0,416, & \text{se } \varphi_{IP} > 0,416 \\ -0,416, & \text{se } \varphi_{IP} < -0,416 \end{cases} \quad (3.15)$$

No modelo de Klobuchar, adota-se para a altitude média o valor de 350 km; para o cálculo da longitude do ponto ionosférico  $\lambda_{IP}$  temos:

$$\lambda_{IP} = \lambda + \frac{\varphi \text{ sen } Az}{\cos \varphi_{IP}} \quad (3.16)$$

Para o cálculo da hora local  $t$ , do ponto ionosférico, na época de observação tem-se:

$$t = \begin{cases} \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T, & \text{se } 0 \leq t < 86400 \\ \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T - 86400, & \text{se } t \geq 86400 \\ \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T + 86400, & \text{se } t < 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Para o cálculo da latitude geocêntrica  $\psi$  a equação é:

$$\psi = \frac{0,0137}{a + 0,11} - 0,022 \quad (3.18)$$

Para o cálculo do fator de inclinação  $F$  a expressão tem a seguinte forma:

$$F = 1 + 16 (0,53 - el)^3 \quad (3.19)$$

onde  $el$  é o ângulo de elevação do satélite.

Segundo Leick (1995), o modelo de Klobuchar corrige entre 50% e 60% do efeito da ionosfera em regiões de média-latitude. Desta forma, tal modelo não é adequado para modelar flutuações rápidas da ionosfera e outros efeitos anômalos (Newby et al., 1990).

A tabela 3.2 mostra a relação entre as unidades de medida (efeito de primeira ordem) e o TEC.

TABELA 3.2: RELAÇÃO ENTRE AS UNIDADES DE MEDIDAS E TEC

<b>L2 - L1 – Atraso diferencial do grupo (Efeito de 1ª ordem)</b>	
1 ns de atraso diferencial no código	= $2,852 \times 10^6$ (el / m <sup>2</sup> )
	= 1,556 ns de atraso em L1
	= 0,464 m de erro na distância em L1
1 ns de atraso, medido em L1	= $1,8476 \times 10^6$ (el / m <sup>2</sup> )
	= 0,300 m de erro na distância em L1
1 m de erro na distância medida em	L1 = $6,15 \times 10^6$ (el / m <sup>2</sup> )
	L2 = $3,73 \times 10^6$ (el / m <sup>2</sup> )
1 TECU (1 x 10 <sup>6</sup> (el / m <sup>2</sup> ))	= 0,352 ns de atraso diferencial
	= 0,542 ns de atraso em L1
	= 0,163 m de erro na distância em L1
	= 0,853 ciclos em avanço na fase em L1

Fonte: Klobuchar, 1996 apud Camargo, 1999

Considerando que o modelo de Klobuchar não modela todo o efeito do atraso ionosférico, a alternativa para quem desejar maior precisão é o uso de receptores de dupla frequência de sinais GPS. No entanto, mesmo esta alternativa apresenta limitações já que a plasmasfera pode contribuir, em média, com 10% e, em alguns casos, com 50% do conteúdo total de elétrons (Seeber, 1993). Desta forma, o TEC determinado a partir de medidas GPS não deve ser comparado diretamente com o TEC obtido a partir de outros sistemas menos precisos, que não consideram a plasmasfera na determinação do mesmo.

O atraso vertical na propagação, observado com receptores de dupla frequência é, em geral, introduzido em modelos locais, regionais ou mesmo globais para gerar correções para usuários de receptores de uma frequência. Tais métodos funcionam muito bem em condições ionosféricas homogêneas e moderadas (Seeber, 1993). Entretanto, com o desenvolvimento de modelos mais elaborados este procedimento torna-se efetivo em regiões e períodos de grande atividade ionosférica (Camargo, 1999).

Os erros residuais do modelamento da ionosfera, em sua grande maioria, são cancelados com o uso de observações diferenciais entre duas estações que estejam a curta distância uma da outra<sup>2</sup>. Neste caso, os sinais recebidos pelas duas estações atravessam a mesma região da atmosfera (hipótese de homogeneidade). No caso de receptores de uma frequência, estima-se um erro entre 1 e 2 ppm na distância entre as duas estações o que corresponde de 1 a 2 cm em uma distância de 10 km (Campbell et al., 1984). Estes números são válidos apenas para condições em que a ionosfera se encontre calma em regiões de média-latitude. Observa-se que, no período de máxima atividade solar, o erro residual pode ser muito maior.

### **3.8.2 Cálculo da Correção Ionosférica com o uso de Receptores de uma Frequência**

Foram desenvolvidos modelos para calcular a correção do atraso ionosférico com observações coletadas com receptores de uma frequência, que utilizam a fase da portadora L1 e do código C/A. O cálculo do efeito da ionosfera nas observações GPS está baseado na diferença entre as observações da fase da portadora e da pseudodistância. As equações de observação da pseudodistância e da fase da

---

<sup>2</sup> Tipicamente 20 a 30 km.

portadora, expressas em unidade métrica, para uma determinada época  $t$ , são dadas por (Leick, 1995 apud Camargo, 1999):

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{1r}^s + T_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{p1} \quad (3.20)$$

$$\lambda_1 \phi_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{1r}^s + T_{1r}^s + \lambda_1 N_{1r}^s + S_{\phi 1}^s + R_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 1} \quad (3.21)$$

Na equação (3.20) aparecem os termos  $S_{p1}^s$  e  $R_{p1}$ , que representam, respectivamente, os erros sistemáticos do satélite e do receptor para as medidas realizadas com o código (pseudodistância). Já na equação (3.21) aparecem os termos  $S_{\phi 1}^s$  e  $R_{\phi 1}$  que representam os mesmos erros sistemáticos, agora referindo-se à fase da portadora. Esses erros são atribuídos às alterações no oscilador do satélite, ao pré-amplificador, ao cabo da antena e ao receptor.

A diferença entre as equações (3.20) e (3.21), para uma determinada época  $t$ , é dada por:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_{1r}^s - \lambda_1 N_{1r}^s + S_{p1}^s - S_{\phi 1}^s + R_{p1} - R_{\phi 1} + \varepsilon_{p1} - \varepsilon_{\phi 1} \quad (3.22)$$

A equação (3.22) está expressa em função dos erros devidos: à ionosfera, a ambigüidade inicial, aos atrasos instrumentais e ao multicaminho. Esta equação apresenta muitas incógnitas e demonstra claramente a dificuldade de se calcular o atraso ionosférico. Mesmo desprezando os termos referentes aos erros instrumentais e aos erros devidos ao multicaminho, os atrasos devido à ionosfera e à ambigüidade ainda não podem ser estimados separadamente, pois, a cada época  $t$ , é adicionado um novo termo não conhecido, que se refere ao efeito da ionosfera. Diferentes soluções foram propostas para modelar as principais características da ionosfera. Ocorre que tais soluções estão limitadas pelo fato das medidas, que utilizam o código, apresentarem uma baixa acurácia.

Alguns modelos, utilizados para calcular a correção do atraso devido à ionosfera com medidas realizadas com o uso da frequência L1, estão descritos a seguir (Leick, 1995).

### 3.8.2.1 Modelo da Lâmina Ionosférica

O modelo da lâmina ionosférica é considerado o mais simples para a modelagem do efeito do atraso ionosférico. A ionosfera é considerada uma superfície



plana de igual espessura contendo uma distribuição homogênea de elétrons livres. O atraso ionosférico, ao longo do caminho satélite / receptor  $I_{1r}^s$ , na portadora L1, é dado por:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\text{sen } el} \quad (3.23)$$

onde:

$el$  representa o ângulo de elevação do satélite do ponto de vista do receptor.

O atraso ionosférico vertical  $I_1^v$  é considerado constante no modelo, e independente do azimute do satélite. Substituindo (3.23) em (3.22), e, negligenciando os erros sistemáticos (instrumentais e multicaminhamento), tem-se o modelo a seguir:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2I_1^v \frac{1}{\text{sen } el} - \lambda_1 N_{1r}^s \quad (3.24)$$

O modelo apresentado, aplicando o MMQ - método dos mínimos quadrados, poderá estimar o atraso vertical  $I_1^v$  e a ambigüidade  $N_{1r}^s$  que são as incógnitas do modelo para um conjunto de observações do código e da fase da portadora. As ambigüidades estimadas absorverão parte dos erros, devido aos erros do satélite e do receptor, considerando que tais erros sejam constantes.

### 3.8.2.2 Modelo Diário com Função Cosseno

Esse modelo, mais elaborado que o anterior, leva em consideração a rotação da Terra e o movimento diário aparente do Sol com relação à localização do receptor de sinais do sistema GPS. O atraso ionosférico vertical é então, modelado pela função cosseno:

$$I_1^v = I_{1_{\max}}^v \cos(h_s - 14) \quad (3.25)$$

onde:

$h_s$  representa o ângulo horário do Sol, dado em horas.

O atraso ionosférico máximo vertical  $I_{1_{\max}}^v$  ocorre por volta das 14:00 horas (hora local). Neste caso, o modelo a ser utilizado para o ajustamento através do MMQ toma a seguinte forma (Camargo, 1999):

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_{1_{\max}}^v \cos(h_s - 14) \frac{1}{\text{sen } el} - \lambda_1 N_{1r}^s \quad (3.26)$$

### 3.8.2.3 Modelo do Ponto Ionosférico

Basicamente, o modelo do ponto ionosférico tem o mesmo princípio do modelo da lâmina ionosférica, porém, utiliza uma altura média variando entre 300 e 400 km para a camada ionosférica. O modelo dado pela equação (3.23) é substituído por:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\text{sen } el'} \quad (3.27)$$

onde:

$el' = 90^\circ - z'$  e, representa o ângulo de elevação do satélite no ponto ionosférico (IPP),

$z'$  representa a distância zenital do sinal transmitido calculado no ponto em que o sinal transmitido atravessa a camada ionosférica (IPP).

Dessa forma tem-se que:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_1^v \frac{1}{\text{sen } el'} - \lambda_1 N_{1r}^s \quad (3.28)$$

Para um conjunto de observações realizadas em diferentes épocas torna-se possível o cálculo do atraso ionosférico vertical e, conseqüentemente, o cálculo do efeito provocado pela ionosfera no código e na fase de batimento da portadora.

### 3.8.3 Cálculo da Correção Ionosférica com o uso de Receptores de Dupla Frequência

Os receptores GPS de dupla frequência permitem que o efeito da refração ionosférica seja calculado a partir de medidas realizadas com o código ou com a fase de batimento da portadora. Esta técnica proporciona correções dos efeitos da refração da ionosfera de forma mais acurada. A técnica utilizada no modelo de observações da fase de batimento da onda portadora é mais acurada do que os modelos que se utilizam de observações do código para a determinação da pseudodistância. Tais modelos permitem que a acurácia atinja os padrões para usos geodésicos (Camargo, 1999). O inconveniente está no fato de receptores de dupla frequências serem mais caros que os receptores de uma frequência.

### 3.8.3.1 Correção Ionosférica com o uso das Medidas do Código (Pseudodistância)

Os erros devidos ao não sincronismo dos relógios do satélite e do receptor, ao erro das efemérides e à refração troposférica não serão considerados na derivação dos modelos. Tais erros contaminam, da mesma maneira, as medidas realizadas em ambas as frequências e, desta forma, durante o processo de diferenciação tais erros serão cancelados (Camargo, 1999).

As equações simplificadas para as pseudodistâncias, em ambas as portadoras  $f_1$  e  $f_2$ , são dadas por:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + I_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{p1} \quad (3.29)$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + I_{2r}^s + S_{p2}^s + R_{p2} + \varepsilon_{p2} \quad (3.30)$$

O atraso ionosférico  $I_{ir}^s$  ( $i=1,2$ ), dado em metros, é proporcional, em uma primeira aproximação ao TEC e, tem a seguinte expressão:

$$I_{ir}^s = \frac{40,3 \text{ TEC}^s}{f_i^2} \quad (3.31)$$

onde:

$s$  representa o satélite observado.

Diferenciando as equações (3.29) e (3.30), obtém-se:

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{p21} \quad (3.32)$$

Porém tem-se que:

$$I_{2r}^s - I_{1r}^s = 40,3 \text{ TEC}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \quad (3.33)$$

Assim sendo:

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{1r}^s \frac{1}{F} + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{p21} \quad (3.34)$$

com:

$$F = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3.35)$$

ou ainda,

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = I_{1r}^s + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})] + F \varepsilon_{p21} \quad (3.36)$$

A equação (3.36) é básica para o cálculo da correção ionosférica  $I_{1r}^s$ , quando as medidas do código (pseudodistância) são realizadas com receptores de dupla frequência. O erro sistemático  $F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})]$  é diferente para cada satélite  $s$  observado e constante durante certos períodos e para diferentes passagens do mesmo satélite (Georgiadiou, 1994 apud Camargo, 1999).

### 3.8.3.2 Correção Ionosférica com o uso das Medidas da Fase da Portadora

As equações de observação simplificadas que se utilizam das medidas das fases das portadoras, em ambas frequências, são dadas por:

$$\lambda_1 \phi_{1r}^s = \rho_r^s - I_{1r}^s + \lambda_1 N_{1r}^s + S_{\phi 1}^s + R_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 1} \quad (3.37)$$

$$\lambda_2 \phi_{2r}^s = \rho_r^s - I_{2r}^s + \lambda_2 N_{2r}^s + S_{\phi 2}^s + R_{\phi 2} + \varepsilon_{\phi 2} \quad (3.38)$$

De maneira análoga à derivação anterior, tem-se que:

$$F(\lambda_1 \phi_{1r}^s - \lambda_2 \phi_{2r}^s) = I_{1r}^s - F[(\lambda_2 N_{2r}^s - \lambda_1 N_{1r}^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})] + F \varepsilon_{\phi 21} \quad (3.39)$$

Na expressão (3.39), o segundo termo do lado direito da igualdade representa a soma da diferença entre as ambigüidades e o erro sistemático do conjunto satélite / receptor. Este termo é diferente para cada passagem do satélite e para cada vez que ocorrerem perdas de ciclos (Georgiadiou, 1994 apud Camargo 1999).

O erro sistemático, devido ao atraso provocado pela ionosfera, estimado a partir da fase da portadora proporciona melhor precisão que os obtidos com a pseudodistância (Newby et al., 1990). Entretanto, no ajustamento, o número de incógnitas é maior, devido às ambigüidades e às perdas de ciclo.

### 3.8.4 Modelos Ionosféricos Disponíveis no Programa Bernese

Os modelos ionosféricos derivados de observações GPS descrevem a componente determinística da ionosfera e, estão baseados no modelo da lâmina ionosférica também conhecido por camada simples ou ainda, calota fina. Tais modelos assumem que todos os elétrons livres estejam concentrados em uma calota de espessura infinitesimal (Rothacher et al, 1996). A função de mapeamento da camada simples, adotada no programa Bernese, pode ser escrita da seguinte forma:

$$F_i(z) = \frac{E(z)}{E_v} = \frac{1}{\cos z'} \quad \text{com} \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z, \quad (3.40)$$

onde:

$F_i(z)$  descreve a razão entre o TEC na direção de visada (receptor – satélite)  $E(z)$  e o TEC na vertical  $E_v$ .

$z'$  representa a distância zenital do sinal transmitido calculado no ponto em que o sinal transmitido atravessa a camada ionosférica (IPP);

$z$  representa a distância zenital do sinal transmitido, em relação ao receptor;

$R$  representa o raio médio da Terra  $\cong 6371$  km;

$H$  representa a altura da camada ionosférica em referência à superfície da Terra.

Com o auxílio da figura 3.7, verifica-se que o ângulo geocêntrico  $\alpha$  é igual a  $z - z'$ .

Assumindo que há uma distribuição homogênea de satélites, o diâmetro da camada ionosférica simples é definido basicamente pelo máximo ângulo central

$$\Delta z_{max} = z_{max} - z'_{max}.$$

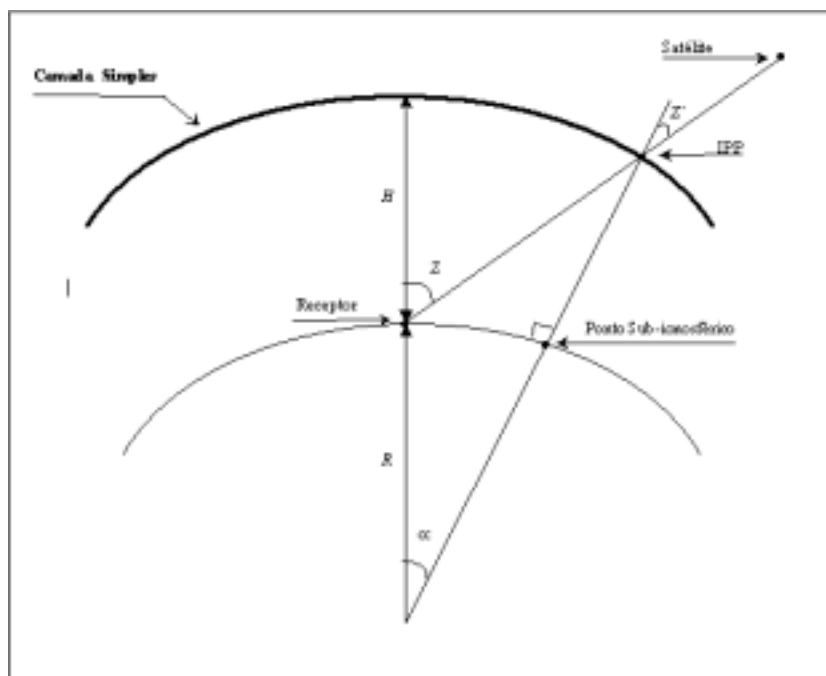


FIGURA 3.7: MODELO TEÓRICO DA IONOSFERA UTILIZANDO O CONCEITO DE CAMADA SIMPLES

Na tabela 3.3 (Schaer, 1999) são dados o semi-diâmetro em graus ( $\Delta z_{max}$ ), e o semi-diâmetro em quilômetros ( $R.\Delta z_{max}$ ) resultantes da variação da distância zenital e ainda, considerando a altura de 450 km para a camada ionosférica. Para um ângulo de mascaramento de  $10^\circ$ , ou seja, uma distância zenital de  $80^\circ$  temos que, de uma única estação GPS a camada ionosférica terá um diâmetro de quase 3000 km.

TABELA 3.3: VARIAÇÃO DO SEMI-DIÂMETRO DA CAMADA IONOSFÉRICA

$z_{max} (^\circ)$	$z'_{max} (^\circ)$	$\Delta z_{max} (^\circ)$	$R.\Delta z_{max} (km)$	$F(z_{max})$
70	61,37	8,63	960	2,09
75	64,45	10,55	1170	2,32
80	66,90	13,10	1460	2,55
85	68,51	16,49	1830	2,73
90	69,07	20,93	2330	2,80

O programa *Bernese* tem como opção dois modelos distintos para o cálculo do conteúdo total de elétrons. O primeiro calcula o TEC local, ou seja, o TEC na estação e adjacências. Já o segundo, calcula o TEC global ou regional para um conjunto de estações espaçadas sobre a superfície terrestre.

#### 3.8.4.1 Modelo Ionosférico Local para o Cálculo do TEC

O modelo de TEC local (Schaer et al. 1995), aplicado nas proximidades de uma ou mais estações que operem com receptores de dupla frequência, é representado por:

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (3.41)$$

onde:

$n_{max}$ ,  $m_{max}$  representam os graus máximos da expansão bidimensional da série de Taylor na latitude  $\beta$  e na longitude  $s$  respectivamente;

$E$  representa o valor de TEC calculado na vertical;

$E_{nm}$  representa os coeficientes desconhecidos de TEC na série de Taylor, isto é, os parâmetros do modelo local a serem estimados;

$\beta_0, s_0$  representam as coordenadas na origem do desenvolvimento.

$\beta$  representa a latitude geocêntrica do ponto de interseção entre a linha de visada receptor-satélite e a camada ionosférica conhecido como “IPP - Ionospheric Pierce Point” e;

$s$  representa a longitude (Sol fixo) do IPP, que está relacionada com a hora solar local (LT) de acordo com a equação a seguir:

$$s = LT^\circ - 180^\circ \approx UT^\circ + \lambda - 180^\circ \quad (3.42)$$

onde:

$UT$  é o Tempo Universal Coordenado e

$\lambda$  a longitude geodésica do ponto sub-ionosférico.

### 3.8.4.2 Modelo Ionosférico Global para o Cálculo do TEC

O modelo global, que pode ser utilizado em aplicações regionais, (Schaer et al. 1995), é representado por:

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} \tilde{P}_{nm} (\sin \beta) (\tilde{A}_{nm} \cos(ms) + \tilde{O}_{nm} \sin(ms)) \quad (3.43)$$

onde:

$\beta$  representa a latitude geomagnética do ponto de interseção entre a linha de visada receptor-satélite e a camada ionosférica (IPP);

$s = \lambda - \lambda_0$  representa a longitude (Sol fixo);

$\lambda$  representa a longitude do ponto ionosférico (IPP);

$\lambda_0$  representa a longitude do Sol;

$n_{\max}$  representa o grau máximo do desenvolvimento em harmônicos esféricos;

$\tilde{P}_{nm} = N_{nm} P_{nm}$  representa a função associada de Legendre normalizada de grau  $n$  e ordem  $m$ ;

$N_{nm}$  representa a função normalizada;

$P_{nm}$  representa a função clássica ou seja, a função de Legendre não normalizada;

$\tilde{A}_{nm}$ ,  $\tilde{O}_{nm}$  representam, respectivamente, os coeficientes a determinar no desenvolvimento em harmônicos esféricos e os parâmetros do mapa ionosférico global.

A função de normalização  $N_{nm}$  pode ser escrita da seguinte forma (McCarthy, 1996):

$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}} \quad (3.44)$$

onde:

$\delta$  representa o delta de Kronecker.

O TEC médio vertical TEC  $\bar{E}_v$  da distribuição global (3.43) é, em geral, representado pelo coeficiente  $\tilde{A}_{00}$  do desenvolvimento em harmônicos esféricos.

$$\bar{E}_v = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} E_v(\beta, s) \cos \beta d\beta ds = N_{00} \tilde{A}_{00} = \tilde{A}_{00} \text{ sendo } N_{00} = 1 \quad (3.45)$$

Conseqüentemente é possível a dedução global do número de elétrons na ionosfera a partir do coeficiente  $\tilde{A}_{00}$  usando a seguinte relação:

$$n_e = 4\pi R'^2 \bar{E}_v \quad (3.46)$$

onde:

$R' = R + H$  é o raio que representa a camada (lâmina) ionosférica.

O número de parâmetros ( $\tilde{A}_{nm}$  e  $\tilde{O}_{nm}$ ) no desenvolvimento em harmônicos esféricos é dado pela expressão:

$$u_E = (n_{\max} + 1)^2 \quad (3.47)$$

ou, se a expansão for truncada na ordem máxima  $m_{\max} \leq n_{\max}$  tem-se:

$$u_E = (n_{\max} + 1)^2 - (n_{\max} - m_{\max})(n_{\max} - m_{\max} - 1) \quad (3.48)$$

onde:

$n_{\max}$  e  $m_{\max}$  indicam a resolução espacial do desenvolvimento em harmônicos esféricos:



$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{n_{\max}} \quad (3.49)$$

$$\Delta s = \frac{2\pi}{m_{\max}} \quad (3.50)$$

onde:

$\Delta\beta$  representa a resolução em latitude;

$\Delta s$  representa a resolução em longitude.

### 3.9 Índice Dst

O índice Dst (Disturbance Storm Time Index) é um indicador da atividade magnética e, é derivado a partir de uma rede de quatro observatórios geomagnéticos, sendo eles: Hermanus – África do Sul, Kakiota – Japão, Honolulu – Hawaii e San Juan – Porto Rico , como mostra a figura 3.8. Estes observatórios foram escolhidos pois, estão afastados suficientemente do eletrojato equatorial e da região de ocorrência da aurora boreal.

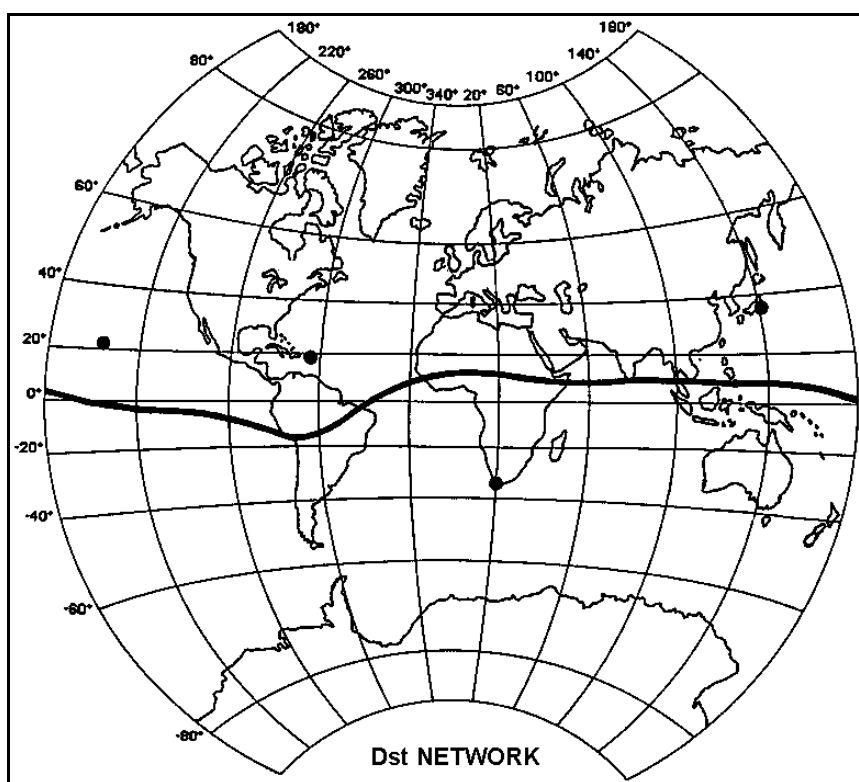


FIGURA 3.8: REDE DE OBSERVATÓRIOS GEOMAGNÉTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE Dst

Fonte: (<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst2/onDstindex.html>, 02/05/2002)

O índice Dst representa a intensidade da atividade geomagnética e desta forma, é utilizado para conhecer a severidade das tempestades magnéticas. Este índice é expresso em nano teslas (nT) e, está baseado no valor médio da componente horizontal do campo magnético terrestre medido de hora em hora (Sugiura, 1964). Uma tempestade magnética pode ser classificada em função do seu índice Dst, como pode ser observado através da tabela abaixo.

TABELA 3.4: NÍVEL DE INTENSIDADE DE TEMPESTADE MAGNÉTICA

<b>Tempestade magnética</b>	<b>Índice Dst</b>
baixa intensidade	$Dst > -20 \text{ nT}$
média intensidade	$-20 \text{ nT} > Dst > -50 \text{ nT}$
alta intensidade	$-50 \text{ nT} > Dst > -100 \text{ nT}$
extrema intensidade	$Dst < -100 \text{ nT}$

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo será descrita a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do sistema GPS, rede esta que coleta os dados de observações GPS que foram utilizados nesta pesquisa. A RBMC é mantida pelo IBGE e, conta, atualmente com 13 estações em operação. Serão descritas também, as ferramentas utilizadas para o cálculo, apresentação e análise do conteúdo total de elétrons.

### **4.1 Origem dos Dados**

Nesta pesquisa foram utilizados dados provenientes da RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS que foi idealizada por Fortes e Godoy (1991) para ser uma rede de referência ativa, ou seja, uma rede rastreando durante as 24 horas do dia ao longo de todo o ano. Além de atender às necessidades do IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a rede tem como principal característica, permitir que o usuário possa realizar observações GPS no modo diferencial utilizando apenas um receptor já que o outro se encontra em uma das estações que compõem aquela rede.

Na sua configuração inicial a RBMC (figura 4.1) contava com nove estações (Fortes, 1997). Dessas, sete estações foram implantadas entre 1996 e 1997 pelo IBGE, com apoio da EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) que recebeu recursos do FNMA (Fundo Nacional do Meio Ambiente) para a aquisição dos equipamentos. As outras duas estações integram, também, a rede do IGS (International GPS Service). A estação Fortaleza, instalada no ROEN (Rádio Observatório Espacial do Nordeste) nas dependências INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foi implantada pelo USNGS (United States National Geodetic Survey) em cooperação com o CRAAE (Centro de Rádio Astronomia e Aplicações Espaciais), que contou com a participação da USP/EP/PTR (Departamento de Engenharia de Transportes) como um dos quatro participantes e apoio do IBGE (Fortes, 1997). Esta foi a primeira estação ativa no Brasil, entrando em operação a 13 de maio de 1993. A outra estação pertencente à rede IGS, está localizada na reserva do Roncador em Brasília – DF, e foi implantada através de um acordo de cooperação entre o IBGE e o JPL (Jet Propulsion Laboratory). Esta estação entrou em operação em 3 de março de 1995. Em dezembro de 2001, a RBMC contava com um total de

13 estações operacionais (figura 4.2), ou seja, quatro a mais do que o previsto na fase inicial. As novas estações foram integradas à RBMC em 1999 através de acordos de operação celebrados entre o IBGE e diferentes instituições. A estação Porto Alegre foi implantada através de um acordo com a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul); a estação Recife recebeu apoio da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) para sua implantação; a estação Salvador foi viabilizada graças ao interesse da CONDER (Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia); e, finalmente, a estação Crato foi implantada através de um acordo com a URCA (Universidade Regional do Cariri).

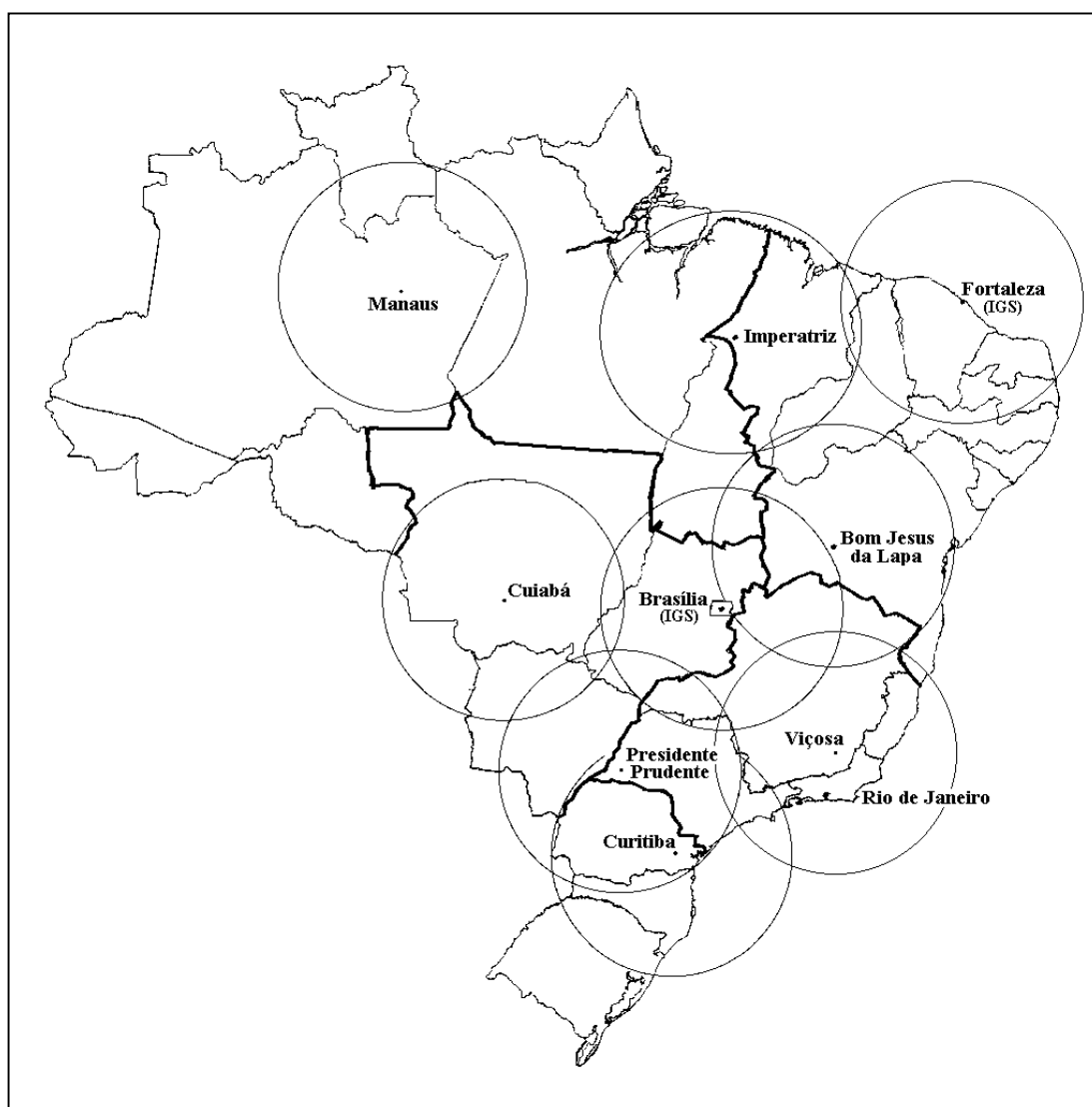


FIGURA 4.1: CONFIGURAÇÃO INICIAL DA RBMC

Fonte: Fortes, 1997

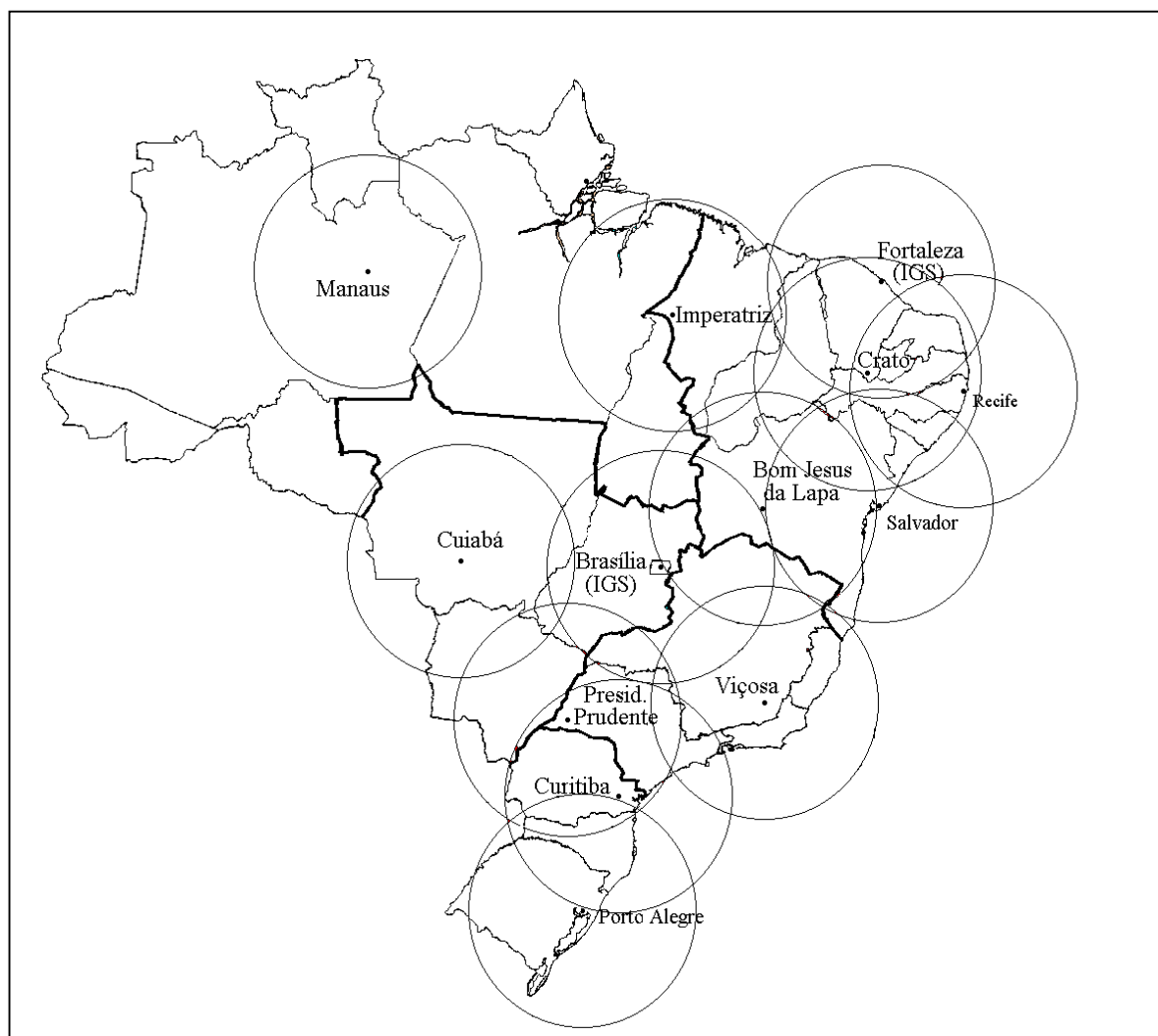


FIGURA 4.2: SITUAÇÃO DA RBMC – DEZ. DE 2001  
 Fonte: IBGE/DEGED, 2001

A tabela 4.1, lista as estações da RBMC que estavam em operação em dezembro de 2001 indicando o nome, a sigla da estação, o código internacional, a data do início de operação (Pereira, 2001) e a instituição onde a mesma se localiza.

Na figura 4.3 estão indicadas as estações que estão em operação, as estações que serão implantadas pelo SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia) e as estações que estão em fase de implantação, pelo IBGE, em colaboração com outras instituições.

Cabe ressaltar que os círculos indicados nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam uma área de cobertura com raio de 500 km a partir da estação. Este limite, estabelecido pelo IBGE, indica a região de cobertura de cada estação permitindo que, cada usuário saiba qual será a estação que vai referenciar o seu projeto.

TABELA 4.1: CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES DA RBMC

Nome da Estação	Sigla	Código	Operação	Local
Bom Jesus da Lapa - BA	BOMJ	93030	18 / 02 / 97	Agência da Capitania dos Portos
Brasília - DF (IGS)	BRAZ	91200	03 / 03 / 95	Reserva Ecológica do Roncador - IBGE
Crato - CE	CRAT	92300	09 / 04 / 00	Universidade Regional do Cariri - URCA
Cuiabá - MT	CUIB	92583	18 / 06 / 97	Centro de Rastreamento e Controle de Satélites - INPE
Curitiba - PR	PARA	91105	13 / 12 / 96	Centro Politécnico da UFPR
Fortaleza - CE (IGS)	FORT	92009	13 / 05 / 93	Rádio Observatório do Nordeste - INPE
Imperatriz - MA	IMPZ	92165	16 / 02 / 98	Centro Federal de Educação Tecnológica - Unidade Descentralizada de Imperatriz
Manaus - AM	MANA	91300	28 / 04 / 97	4ª Divisão de Levantamentos do Exército
Porto Alegre - RS	POAL	91850	28 / 10 / 98	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Presidente Prudente - SP	UEPP	91559	18 / 12 / 96	Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP
Recife - PE	RECF	93110	06 / 07 / 99	Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Salvador	SALV	93111	20 / 05 / 99	Prédio da Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia CONDER
Viçosa	VICO	91696	22 / 05 / 97	Universidade Federal de Viçosa - UFV

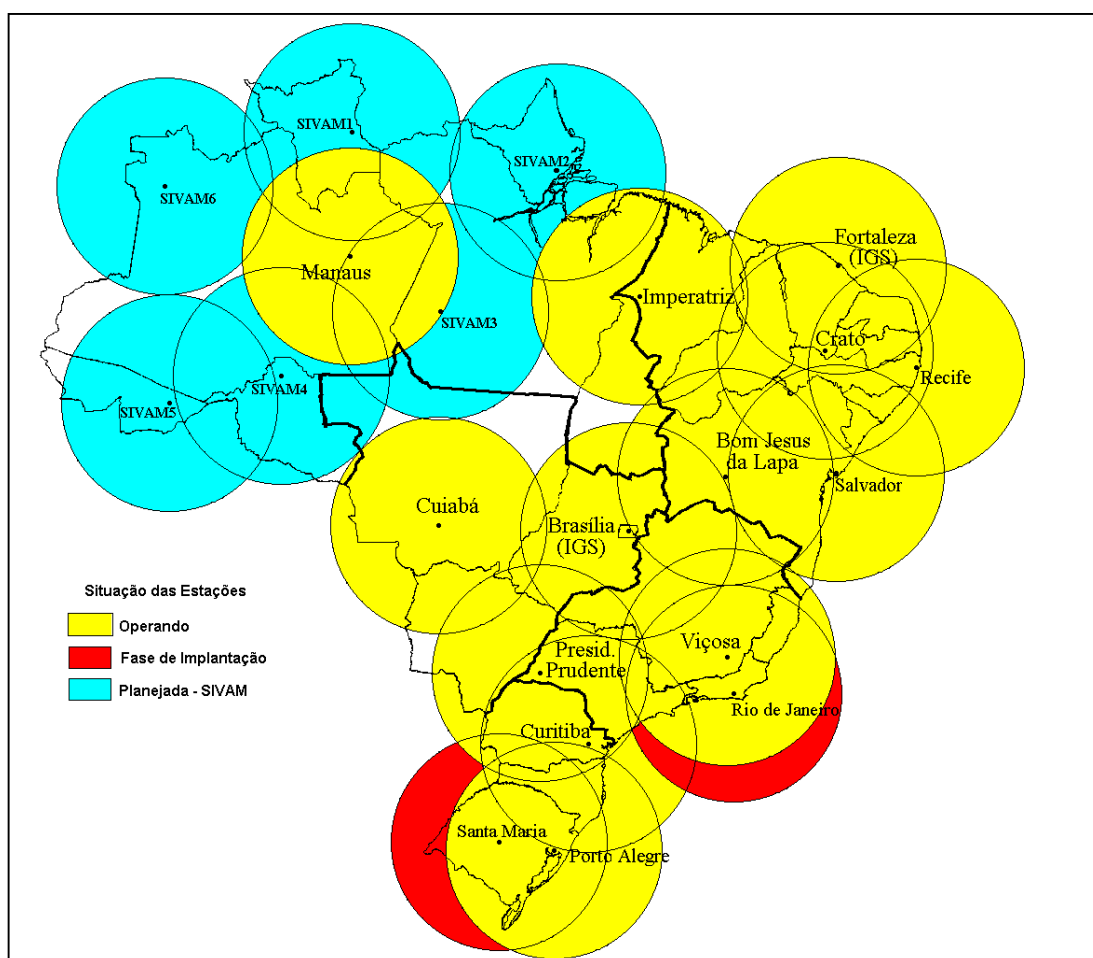


FIGURA 4.3: CONFIGURAÇÃO FUTURA DA RBMC

Fonte: IBGE/DEGED, 2001

Todos os locais selecionados para a instalação de estações integrantes da RBMC foram escolhidos com base nas especificações e normas gerais para levantamentos GPS (IBGE, 1992). Foram seguidas ainda as seguintes especificações (Fortes, 1997):

- ausência de obstruções a partir de 10° acima do plano do horizonte da antena da estação;
- ausência de superfícies próximas à estação para que se possa evitar ou minimizar o efeito do multicaminho dos sinais;
- ausência de fontes eletromagnéticas, em especial, na faixa de frequência dos sinais do sistema GPS (1,2 GHz e 1,5 GHz).

Além dos critérios citados anteriormente, foram definidas outras condições que também deveriam ser cumpridas (Fortes, 1997):

- uso de dispositivo de centragem forçada a fim de garantir erros inferiores a 1 mm quando da substituição ou retirada da antena para manutenção;
- estrutura de concreto altamente estável para prevenir possíveis recalques;
- acesso público restrito para evitar vandalismos;
- disponibilidade de uma sala próxima à estação com fornecimento contínuo de energia e acesso a uma linha telefônica para efeito de transmissão de dados;
- segurança permanente;

## **4.2 Dados Processados**

Para o processamento, referente ao presente trabalho, foram utilizados todos os dados disponíveis de cada uma das estações que compõem a RBMC, no período compreendido entre janeiro de 1997 e dezembro de 2001. Tais dados foram disponibilizados pelo DEGED - Departamento de Geodésia do IBGE.

A estratégia de processamento adotada foi a seguinte:

- Análise da integridade do arquivo diário (24 horas) de cada estação (formato RINEX);
- Divisão do arquivo diário em 12 arquivos de 2 horas (formato Rinex);
- Conversão dos arquivos para o formato do programa *Bernese*;
- Definição da altura do modelo ionosférico como sendo de 450 km;

- Escolha do ângulo de máscara das observações = 15°;
- Processamento dos arquivos para cálculo do TEC a intervalos de 2 horas;
- Geração dos gráficos do TEC.

A tabela 4.2 indica os dados que foram utilizados no processamento para a obtenção do TEC. Pode ser observado na referida tabela que as estações de Manaus e Crato apresentaram problemas, sendo que a primeira ficou fora do ar por doze meses e a segunda ficou desativa por aproximadamente 10 meses.

TABELA 4.2: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC

Nome da Estação	Sigla	1997	1998	1999	2000	2001
Bom Jesus da Lapa	BOMJ					
Brasília (IGS)	BRAZ					
Crato	CRAT					
Cuiabá	CUIB					
Curitiba	PARA					
Fortaleza (IGS)	FORT					
Imperatriz	IMPZ					
Manaus	MANA					
Porto Alegre	POAL					
Presidente Prudente	UEPP					
Recife	RECF					
Salvador	SALV					
Viçosa	VICO					

### 4.3 Metodologia

Para o cálculo do conteúdo total de elétrons foi utilizado o programa de processamento de dados denominado *Bernese GPS Software, versão 4.2*. Este programa, de caráter científico, foi desenvolvido na Universidade de Berna, na Suíça. Para preparar os dados e efemérides precisas a serem utilizados pelo programa Bernese, foi desenvolvido, em FORTRAN, o programa RBMC2000.

#### 4.3.1 Descrição do programa RBMC2000

O programa denominado RBMC2000 foi desenvolvido durante a presente pesquisa e tem como finalidade auxiliar na preparação dos dados para o posterior cálculo do TEC. Este programa foi desenvolvido em linguagem FORTRAN e compilado através do FORTRAN 95 da Lahey Computer Systems, Inc. Há duas



maneiras de entrar com os dados: a primeira via teclado e a segunda via arquivo de controle.

O programa RBMC2000 tem como características principais:

- Verificar e corrigir as informações contidas nos cabeçalhos dos arquivos de observações GPS no formato RINEX. Este procedimento é necessário pois foram encontrados diversos problemas como por exemplo: erro na altura da antena; erro no nome e/ou código da estação; falta de informação em relação ao tipo de antena / receptor.
- Dividir os arquivos de 24 horas em arquivos de 1, 2, 3, 4, 6, 8 ou 12 horas. Esta etapa se faz necessária pois o programa Bernese necessita, para o cálculo do TEC, de um número de arquivos igual ao número de valores de TEC que se deseja calcular para cada dia.
- Preparar arquivos de lote que chamam as rotinas do programa Bernese. Esta tarefa torna o processamento praticamente automático pois os arquivos de lote realizam as seguintes tarefas: transformar as efemérides precisas do IGS (formato SP3) para o formato do programa Bernese (Formato binário); converter os arquivos do formato Rinex para o formato do Programa Bernese; realizar o processamento que resultará em valores de TEC.
- Compactar o diretório onde está contido o projeto pois, caso isto não seja feito, poderá haver falta de espaço para o processamento de um segundo projeto.

Além das tarefas descritas anteriormente, o programa RBMC2000 tem a possibilidade de processar apenas um dia de observação de uma estação ou todo o período de observação de todas as estações conjuntamente. Evidentemente que o limitante é o espaço em disco e, para se ter uma idéia, ao se processar 30 dias de dados de 10 estações deve-se ter aproximadamente 4 GB de espaço disponível no disco.

Para o processamento dos dados desse trabalho foi utilizado um micro computador Pentium III - 750 MHz com 128MB de memória RAM e disco rígido com 20 GB.

### 4.3.2 Descrição do Programa Bernese

O programa Bernese foi desenvolvido para o processamento de dados GPS e GLONASS, apresentando resultados com alto grau de acurácia (Rothacher et al., 1996).

Usuários típicos desse programa:

- Pesquisadores envolvidos com aplicações científicas (pesquisa e educação);
- Agências de mapeamento responsáveis por levantamentos GPS de grande acurácia;
- Agências responsáveis por redes GPS permanentes;
- Empresas especializadas em aplicações complexas e que necessitem de acurácia, confiabilidade e grande produtividade.

O programa é particularmente apropriado para (Hugentoble, Schaer, Fridez, 2001):

- Processamento rápido de pequenos levantamentos GPS, tanto com a portadora L1 quanto com a portadora L2;
- Processamento de redes de monitoramento contínuo;
- Obtenção de soluções livres no ajustamento de redes (free network solutions).
- Resolução de ambigüidade de linhas de base longas (até 2000 km usando órbitas precisas);
- Modelagem da ionosfera e da troposfera;
- Estimativa de erro dos relógios;
- Combinação de diferentes tipos de receptores (calibração do centro de fase da antena);
- Estudos simulados;
- Determinação de órbitas e estimação dos parâmetros de rotação da Terra;

Em contrapartida, deve-se dizer que, por haver uma grande quantidade de opções, este programa é considerado de difícil aprendizado.

Para o estudo da ionosfera este programa utiliza o modelo da camada ionosférica para representar a componente determinística da ionosfera. Desta forma o modelo é parametrizado para dois tipos distintos de aplicações:

- A - Aplicação local baseado na expansão bidimensional da série de Taylor;
- B - Aplicação global ou regional baseado na expansão em harmônicos esféricos. Veja itens 3.8.4.1 e 3.8.4.2.

### 4.3.3 Descrição da Rotina RBMCmeanTEC

A rotina denominada RBMCmeanTEC também foi desenvolvida para esta pesquisa e tem como finalidade efetuar a confecção de gráficos de TEC como o da figura 4.4. Esta rotina foi preparada para operar no ambiente desenvolvido para a ferramenta MATLAB da MathWork Inc.

Esta rotina tem como finalidade gerar o gráfico de TEC para cada uma das estações da RBMC. Há a possibilidade de geração de gráficos anuais e mensais contendo os valores calculados e/ou os valores médios de TEC durante o período diurno e noturno. E gera ainda um gráfico mensal indicando o TEC calculado dia a dia.

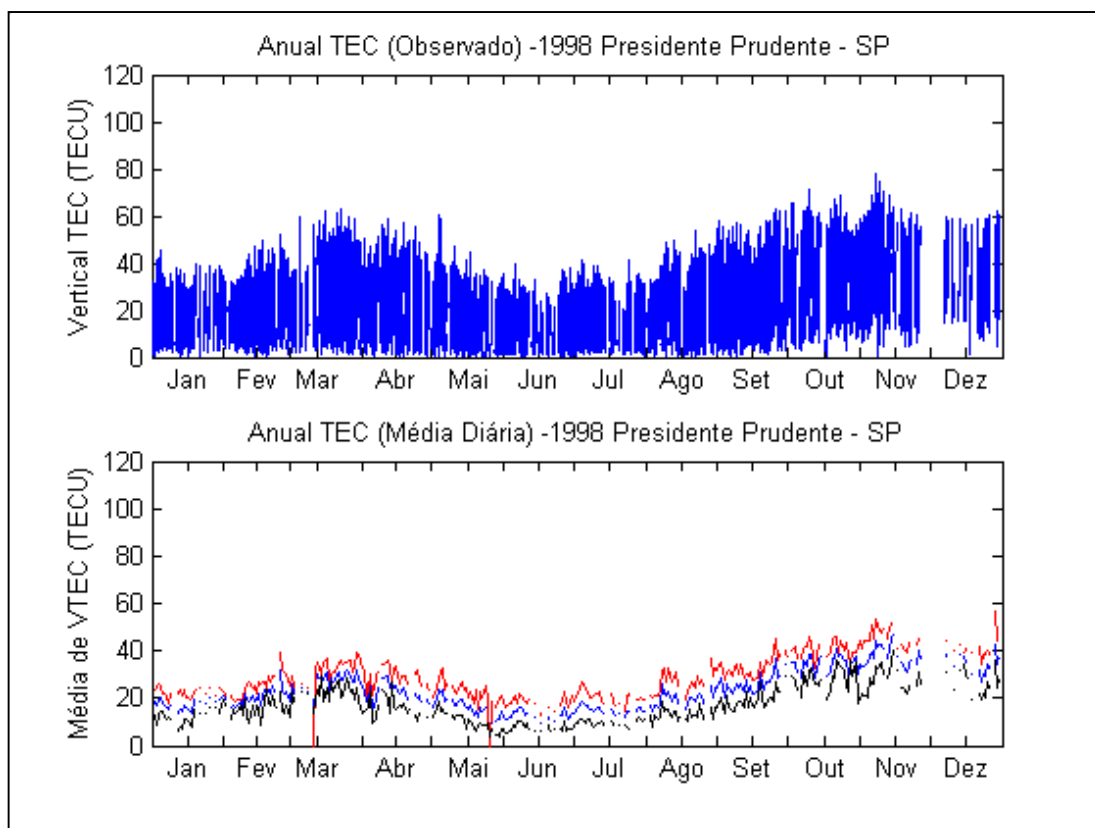


FIGURA 4.4: EXEMPLO DE GRÁFICO GERADO COM A ROTINA RBMCmeanTEC

#### 4.3.4 Descrição da Rotina RBMCtecMAPA

A rotina denominada RBMCtecMAPA também foi elaborada para esta pesquisa e tem como finalidade gerar o mapa de TEC sobre o Brasil (figura 4.5). Esta rotina foi totalmente desenvolvida no ambiente do MatLab. Sua característica principal é a geração de isolinhas de TEC a intervalos de 2 horas para o Brasil. Como base é desenhado o mapa do contorno do Brasil.

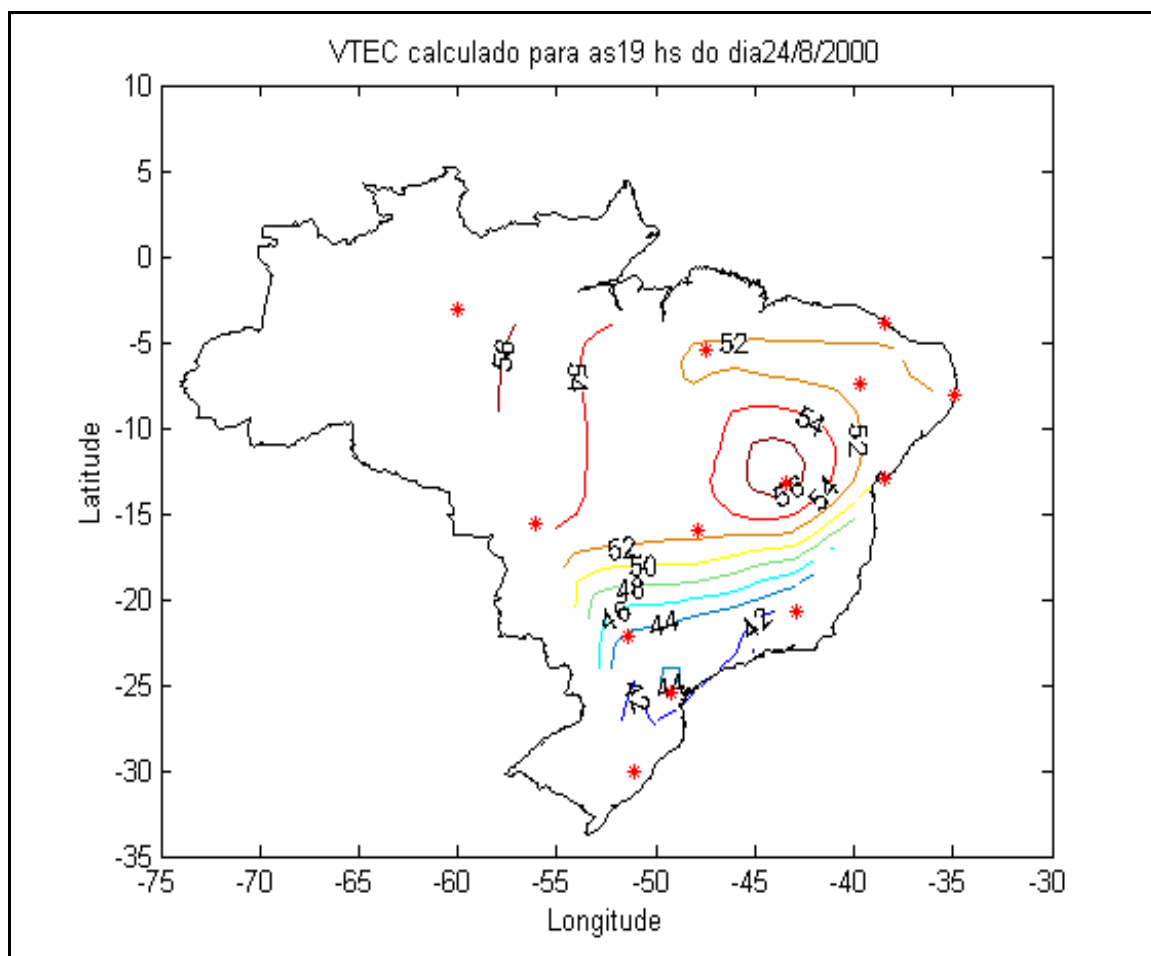


FIGURA 4.5: EXEMPLO DE GRÁFICO GERADO COM A ROTINA RBMCtecMAP

Cabe ressaltar que as rotinas apresentadas permitem ainda, calcular indicadores para a análise dos resultados. Tais análises, serão apresentadas nos capítulos seguintes.

## 5 PROCESSAMENTO DE DADOS

Como descrito no capítulo anterior, foram utilizados todos os dados disponíveis da RBMC no cálculo do TEC para cada uma das estações. Neste capítulo será dada ênfase ao processamento de dados dos anos de 1997 até o ano de 2001, detalhando as opções utilizadas em relação à escolha da altura da camada ionosférica, bem como, à escolha das efemérides.

### 5.1 Intervalo de Tempo de Processamento

Foi realizada uma estimativa de intervalo de tempo de processamento. Para tanto, foi utilizado como padrão um grupo de 10 estações em um período de 30 dias. Foram processados diversos grupos, com as mesmas características, verificando-se um tempo médio de 15 horas. Ao se analisar as diferenças encontradas, foram identificados três principais fatores que afetaram o tempo de processamento; o primeiro fator é o tamanho dos arquivos diários de cada estação pois, os mesmos apresentam pequenas diferenças de tamanho de dia para dia. O segundo fator é a falta de alguns arquivos diários ocasionado por problemas na estação. E o último fator, refere-se a problemas na estação como, por exemplo, falta de energia, travamento do micro ou ainda capacidade de armazenamento de dados na memória do receptor superada. Estes problemas provocam a perda de algumas horas de dados.

Na tabela 5.1 estão indicados os tempos médios observados para o processamento de uma e de dez estações para um período de um dia e de trinta dias. Foi verificado que os tempos médios são múltiplos indicando, que não há vantagem em se processar uma ou várias estações em um único processamento considerando apenas, o tempo de processamento.

TABELA 5.1: TEMPO MÉDIO DE PROCESSAMENTO

Nº de estações	Período	Nº de arquivos (2 horas)	Tempo de processamento
1	1 dia	12	≅ 3 minutos
1	30 dias	360	≅ 1,5 hora
10	1 dia	120	≅ 0,5 hora
10	30 dias	3600	≅ 15 horas

## 5.2 Processamento dos Dados do Ano de 1997

No primeiro ano efetivo de operação (1997) a RBMC contava com oito estações, tendo começado com apenas três no início daquele ano (tabela 5.2). O processamento de todos os dados disponíveis para aquele ano foi realizado em aproximadamente 119 horas, isso sem considerar a organização e a preparação dos dados e dos programas de processamento e de geração de gráficos.

TABELA 5.2: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC EM 1997

Nome da Estação	Sigla	Operação	1997																				
Bom Jesus da Lapa	BOMJ	18 / 02 / 97																					
Brasília (IGS)	BRAZ	03 / 03 / 95																					
Cuiabá	CUIB	18 / 06 / 97																					
Curitiba	PARA	13 / 12 / 96																					
Fortaleza (IGS)	FORT	13 / 05 / 93																					
Manaus	MANA	28 / 04 / 97																					
Presidente Prudente	UEPP	18 / 12 / 96																					
Viçosa	VICO	22 / 05 / 97																					

A seguir, como amostra, são apresentados os gráficos de uma das estações para o ano de 1997. Na figura 5.1 observa-se no gráfico superior o valor do TEC obtido a cada 2 horas. Enquanto no gráfico inferior da mesma figura estão indicadas as médias diurna, diária e noturna para todo o ano de 1997.

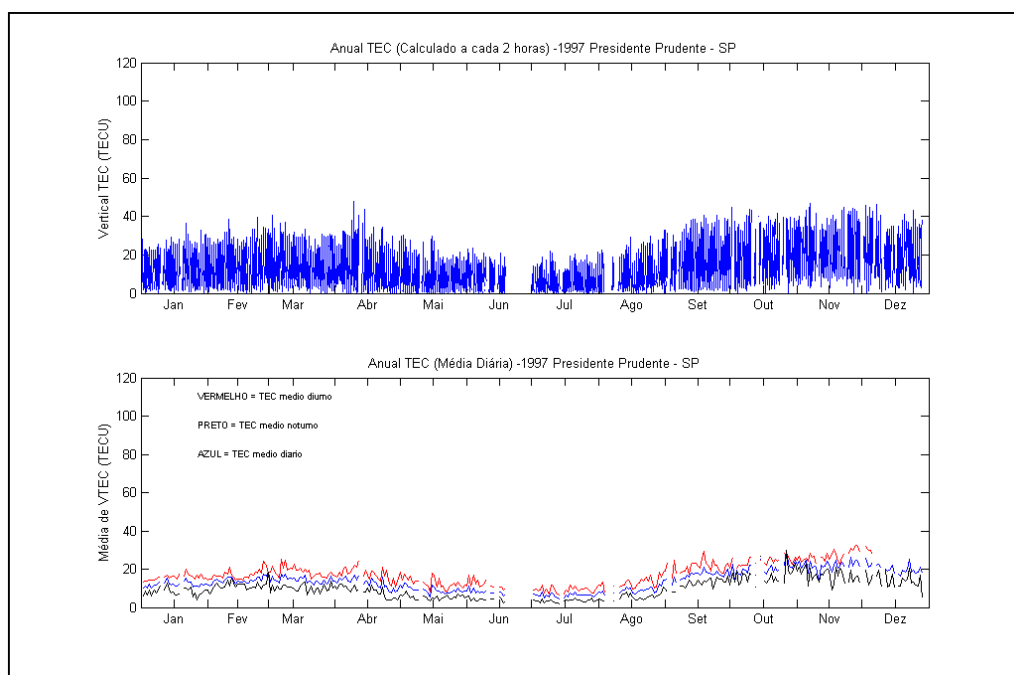


FIGURA 5.1: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1997

Na figura 5.2, estão indicados os valores do TEC calculados para cada 2 horas na estação de Presidente Prudente, tomada como exemplo. Pode-se observar que os 12 gráficos indicam o comportamento do TEC para cada mês do ano de 1997.

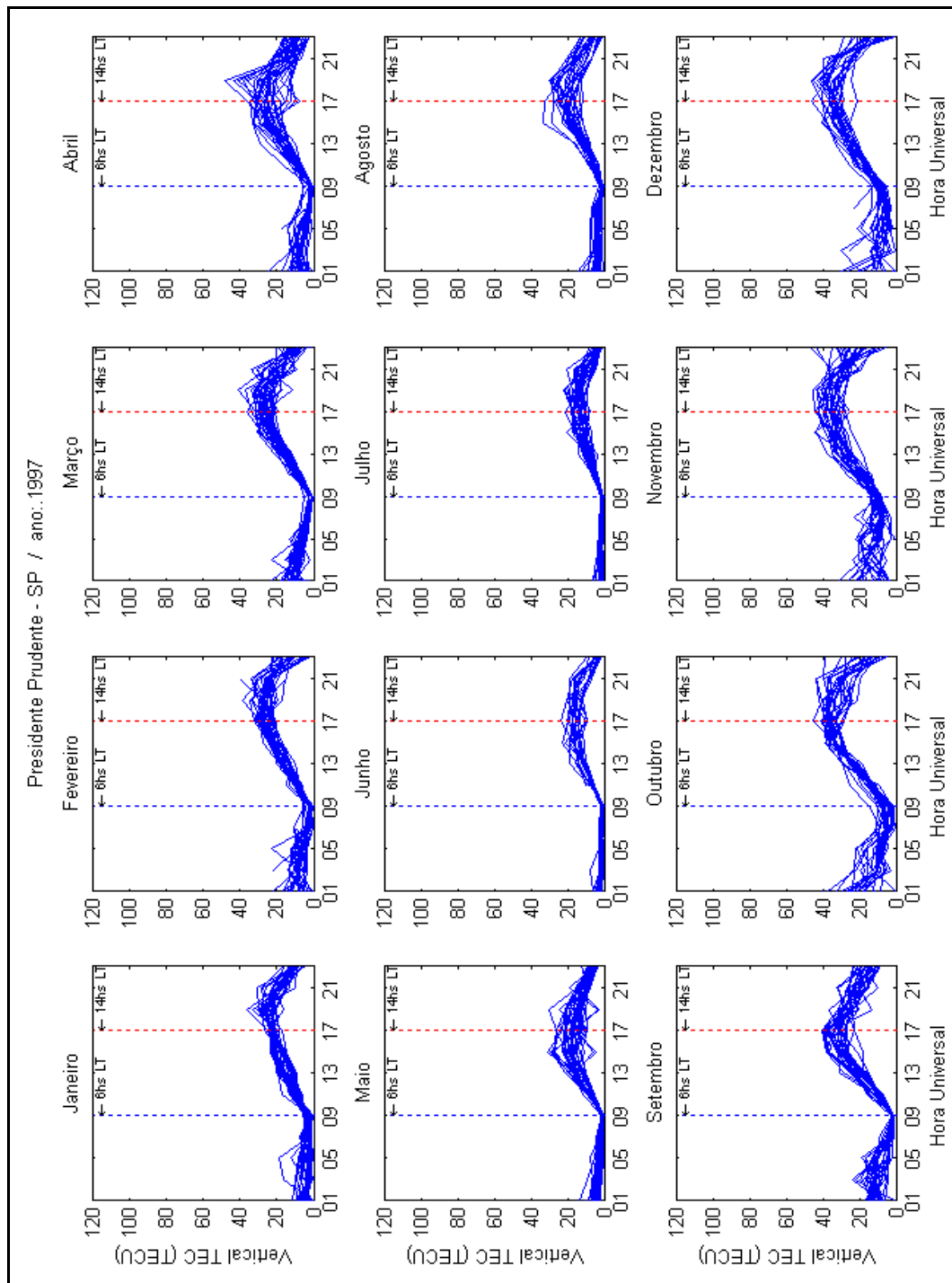


FIGURA 5.2: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1997

### 5.3 Processamento dos Dados do Ano de 1998

No segundo ano de operação (1998) a RBMC contava com nove estações, sendo que todas operaram durante todo o ano (tabela 5.3). O processamento de todos os dados disponíveis foi realizado em aproximadamente 162 horas.

TABELA 5.3: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC EM 1998

Nome da Estação	Sigla	Operação	1998
Bom Jesus da Lapa	BOMJ	18 / 02 / 97	
Brasília (IGS)	BRAZ	03 / 03 / 95	
Cuiabá	CUIB	18 / 06 / 97	
Curitiba	PARA	13 / 12 / 96	
Fortaleza (IGS)	FORT	13 / 05 / 93	
Imperatriz	IMPZ	16 / 02 / 98	
Manaus	MANA	28 / 04 / 97	
Presidente Prudente	UEPP	18 / 12 / 96	
Viçosa	VICO	22 / 05 / 97	

A seguir são apresentados os gráficos de uma das estações, no caso Presidente Prudente, para o ano de 1998. Na figura 5.3 observa-se no gráfico superior o valor do TEC obtido a cada 2 horas. No gráfico inferior da mesma figura estão indicados as médias diurna, diária e noturna para todo aquele ano.

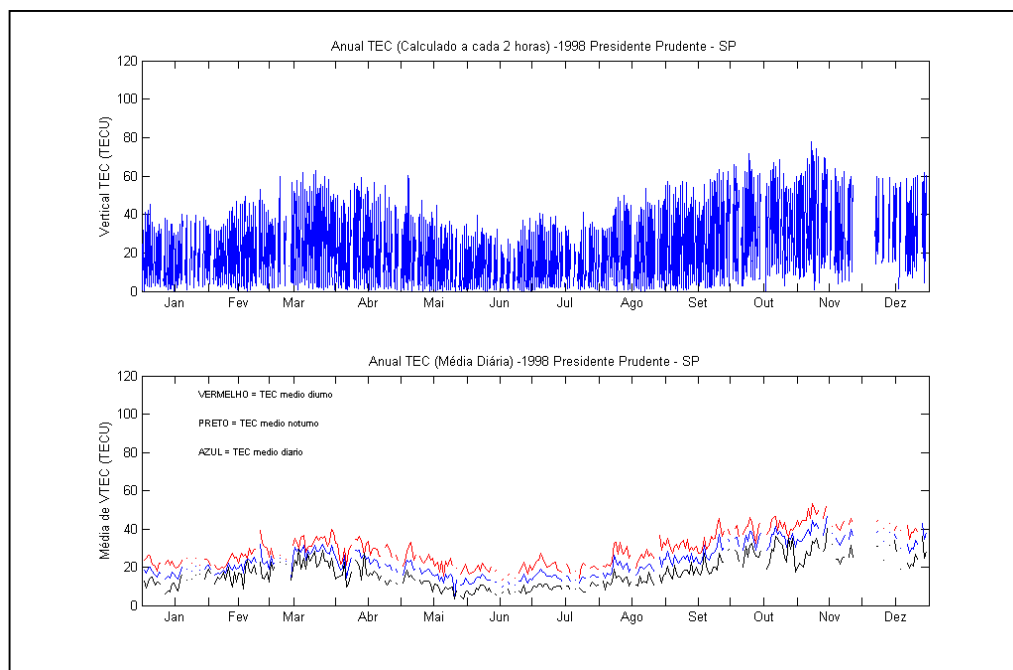


FIGURA 5.3: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1998



Já na figura 5.4, estão indicados os valores do TEC calculados para cada 2 horas na mesma estação. Observa-se que os 12 gráficos indicam o comportamento do TEC para cada mês do ano de 1998.

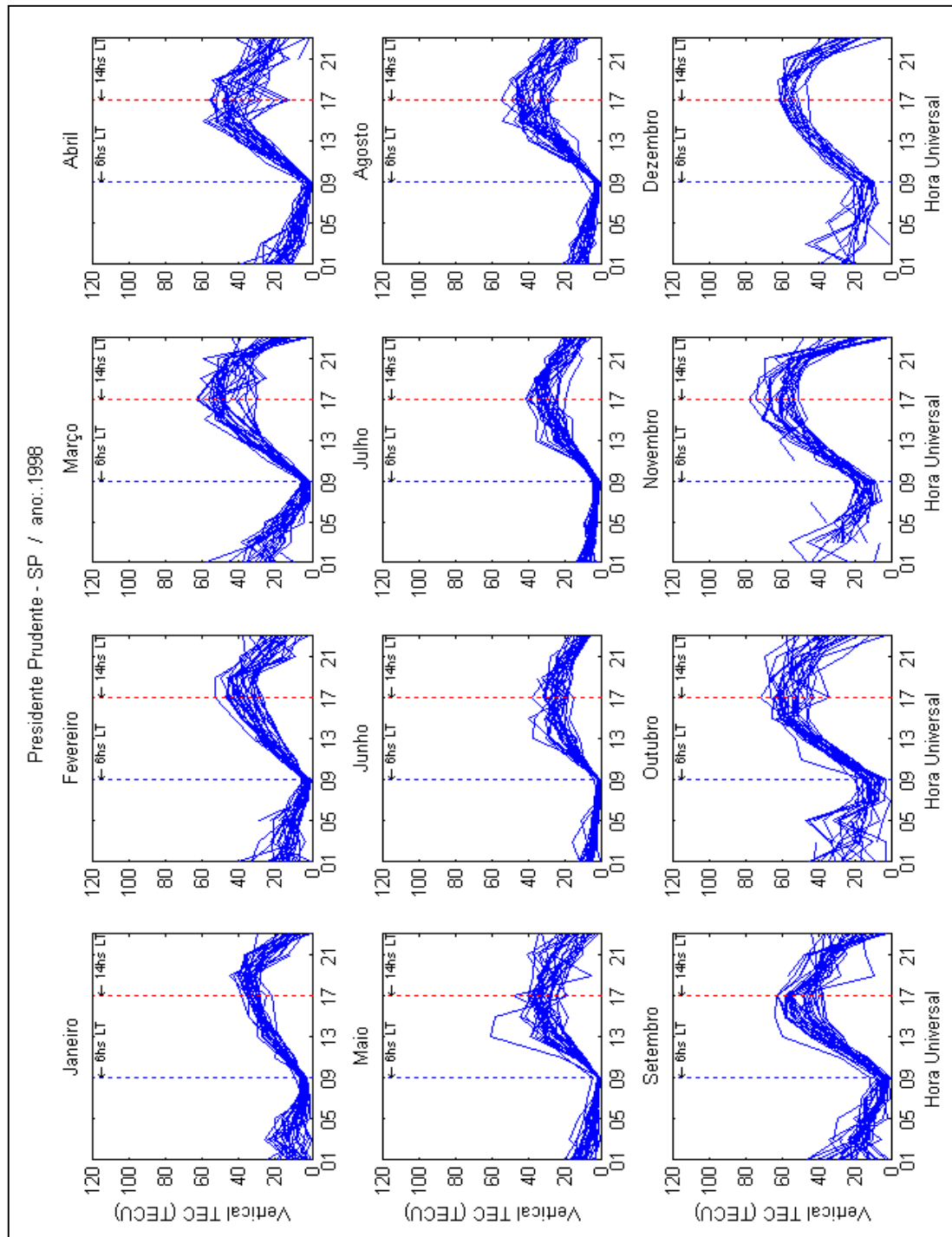


FIGURA 5.4: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1998

#### 5.4 Processamento dos Dados do Ano de 1999

No terceiro ano de operação (1999) a RBMC contava com doze estações, sendo que todas operaram durante todo o ano conforme mostra a tabela 5.4. O processamento dos dados disponíveis foi realizado em aproximadamente 200 horas.

TABELA 5.4: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC EM 1999

Nome da Estação	Sigla	Operação	1999																				
Bom Jesus da Lapa	BOMJ	18 / 02 / 97																					
Brasília (IGS)	BRAZ	03 / 03 / 95																					
Cuiabá	CUIB	18 / 06 / 97																					
Curitiba	PARA	13 / 12 / 96																					
Fortaleza (IGS)	FORT	13 / 05 / 93																					
Imperatriz	IMPZ	16 / 02 / 98																					
Manaus	MANA	28 / 04 / 97																					
Porto Alegre	POAL	28 / 10 / 98																					
Presidente Prudente	UEPP	18 / 12 / 96																					
Recife	RECF	06 / 07 / 99																					
Salvador	SALV	20 / 05 / 99																					
Viçosa	VICO	22 / 05 / 97																					

A seguir são apresentados os gráficos do TEC para a estação UEPP - Presidente Prudente no ano de 1999. Na figura 5.5 observa-se no gráfico superior o valor do TEC obtido a cada 2 horas. Já no gráfico inferior da mesma figura estão indicados as médias diurna, diária e noturna para o ano de referencia.

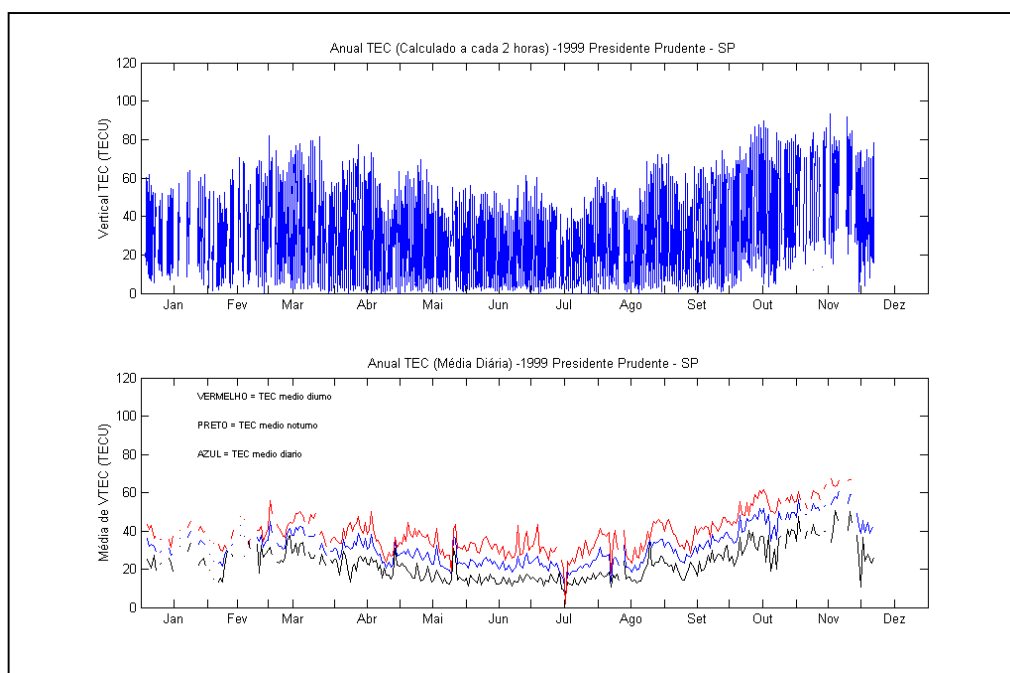


FIGURA 5.5: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1999

Na figura 5.6, estão indicados os valores do TEC calculados para cada 2 horas indicando o comportamento do TEC para os doze meses do ano de 1999.

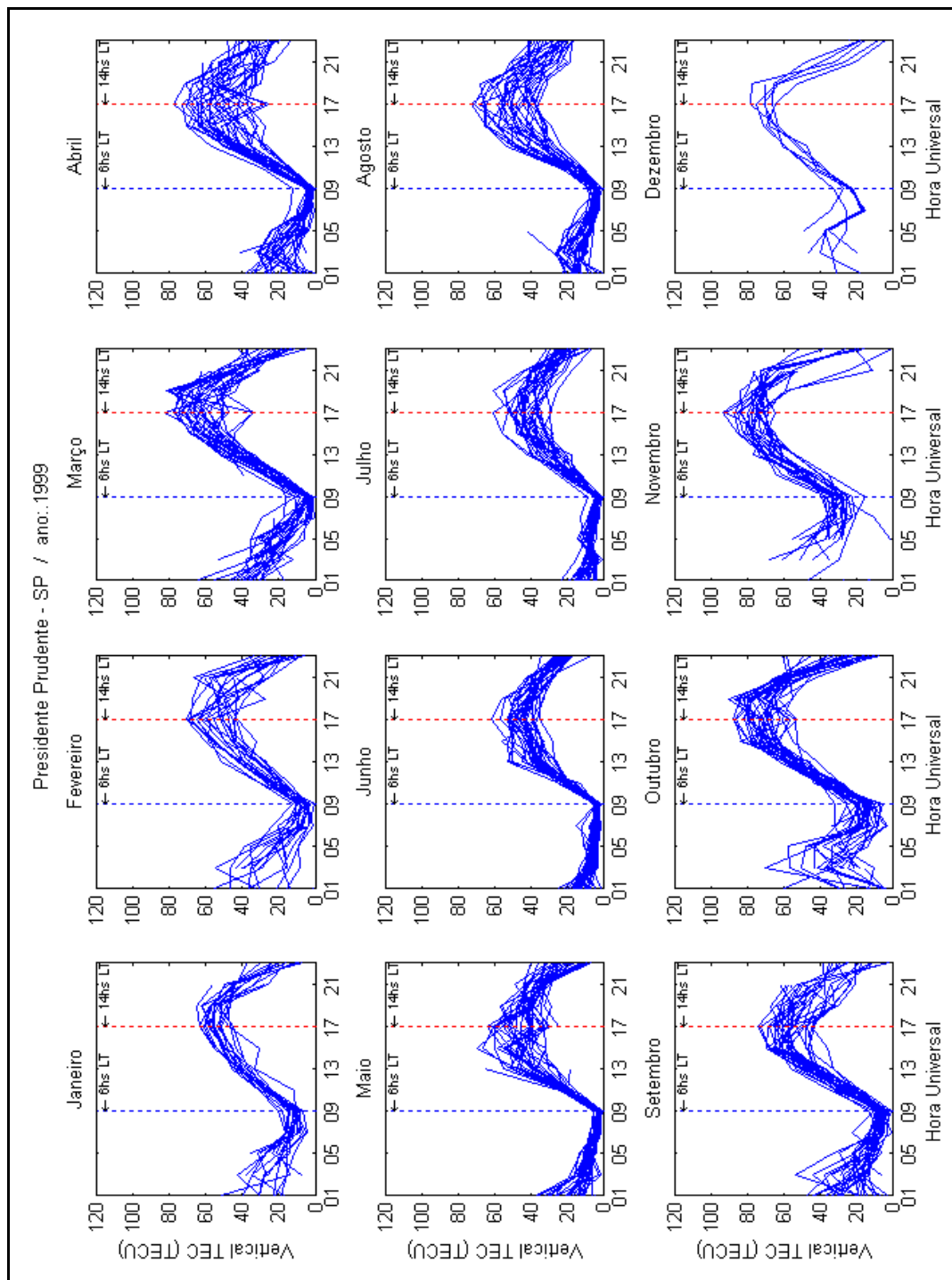


FIGURA 5.6: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 1999

## 5.5 Processamento dos Dados do Ano de 2000

No quarto ano de operação a RBMC contava com treze estações, sendo que cinco apresentaram problemas (tabela 5.5). O processamento de todos os dados disponíveis foi realizado em aproximadamente 219 horas.

TABELA 5.5: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC EM 2000

Nome da Estação	Sigla	Operação	2000																				
Bom Jesus da Lapa	BOMJ	18 / 02 / 97																					
Brasília (IGS)	BRAZ	03 / 03 / 95																					
Crato	CRAT	09 / 04 / 00																					
Cuiabá	CUIB	18 / 06 / 97																					
Curitiba	PARA	13 / 12 / 96																					
Fortaleza (IGS)	FORT	13 / 05 / 93																					
Imperatriz	IMPZ	16 / 02 / 98																					
Manaus	MANA	28 / 04 / 97																					
Porto Alegre	POAL	28 / 10 / 98																					
Presidente Prudente	UEPP	18 / 12 / 96																					
Recife	RECF	06 / 07 / 99																					
Salvador	SALV	20 / 05 / 99																					
Viçosa	VICO	22 / 05 / 97																					

A seguir é apresentado o gráfico do TEC para a estação UEPP - Presidente Prudente. Na figura 5.7 observa-se no gráfico superior o valor do TEC obtido a cada 2 horas. Enquanto que no gráfico inferior da mesma figura estão indicadas as médias diurnas, diária e noturna para aquele ano.

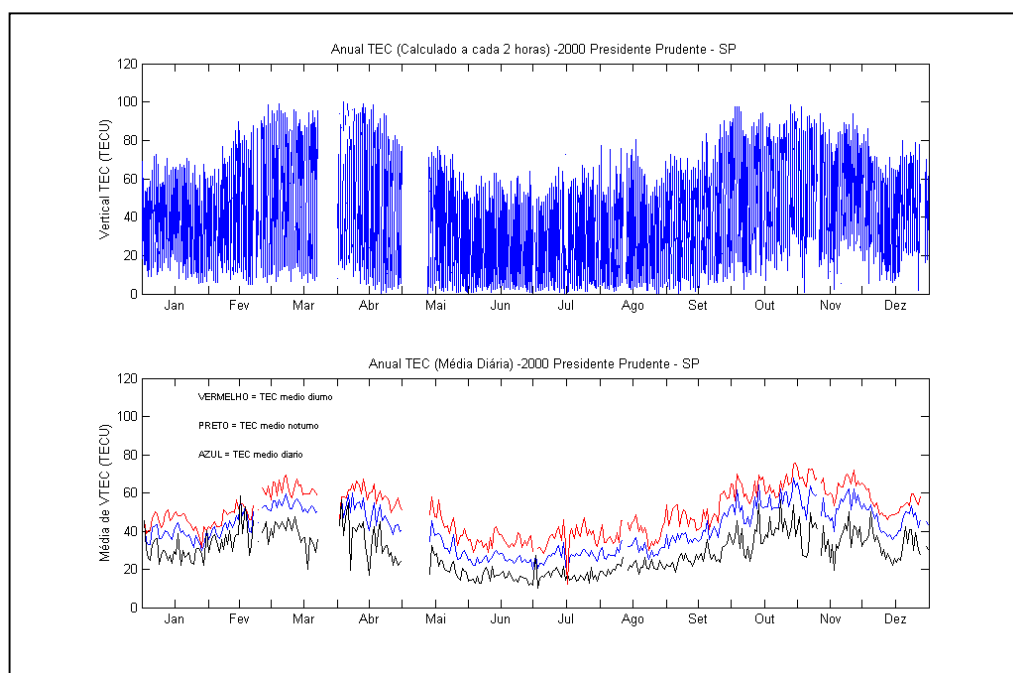


FIGURA 5.7: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 2000

Os 12 gráficos da figura 5.8 indicam o comportamento do TEC observado em cada um dos meses do ano de 2000.

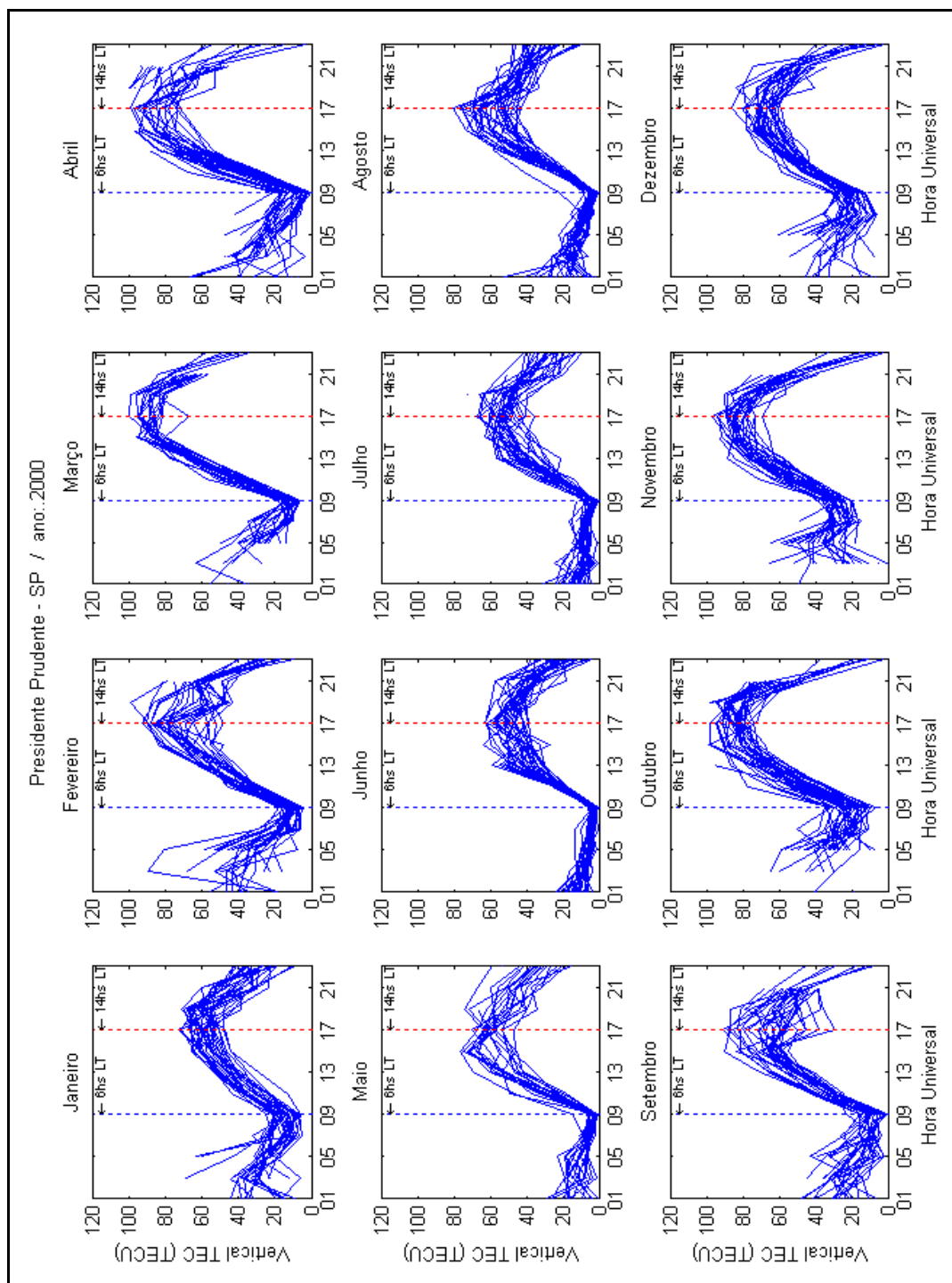


FIGURA 5.8: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 2000

## 5.6 Processamento dos Dados do Ano de 2001

No ano de 2001 a RBMC contava com treze estações, sendo que apenas duas (Bom Jesus da Lapa e Manaus) não estiveram operacionais durante os 12 meses do ano (tabela 5.6). O processamento dos dados disponíveis foi realizado em aproximadamente 212 horas.

TABELA 5.6: DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO TEC EM 2001

Nome da Estação	Sigla	Operação	2001																				
Bom Jesus da Lapa	BOMJ	18 / 02 / 97																					
Brasília (IGS)	BRAZ	03 / 03 / 95																					
Crato	CRAT	09 / 04 / 00																					
Cuiabá	CUIB	18 / 06 / 97																					
Curitiba	PARA	13 / 12 / 96																					
Fortaleza (IGS)	FORT	13 / 05 / 93																					
Imperatriz	IMPZ	16 / 02 / 98																					
Manaus	MANA	28 / 04 / 97																					
Porto Alegre	POAL	28 / 10 / 98																					
Presidente Prudente	UEPP	18 / 12 / 96																					
Recife	RECF	06 / 07 / 99																					
Salvador	SALV	20 / 05 / 99																					
Viçosa	VICO	22 / 05 / 97																					

Na figura 5.9 observa-se no gráfico superior o valor do TEC obtido a cada 2 horas. E no gráfico inferior da mesma figura estão indicadas as médias diurna, diária e noturna.

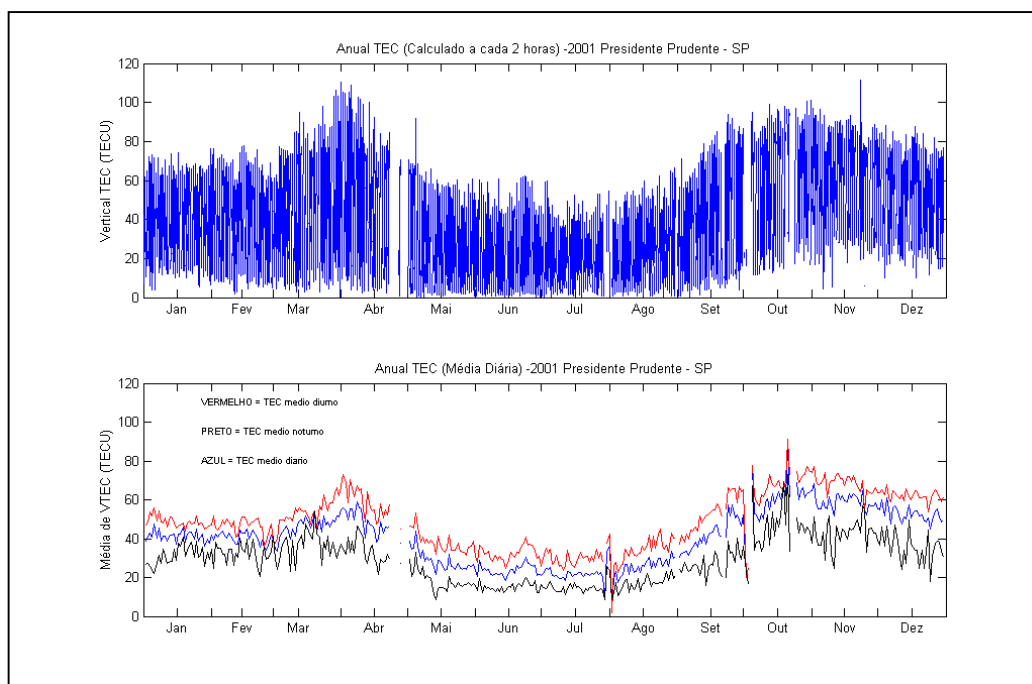


FIGURA 5.9: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 2001

Na figura 5.10 pode - se observar através dos 12 gráficos o comportamento do TEC para cada mês do ano de 2001.

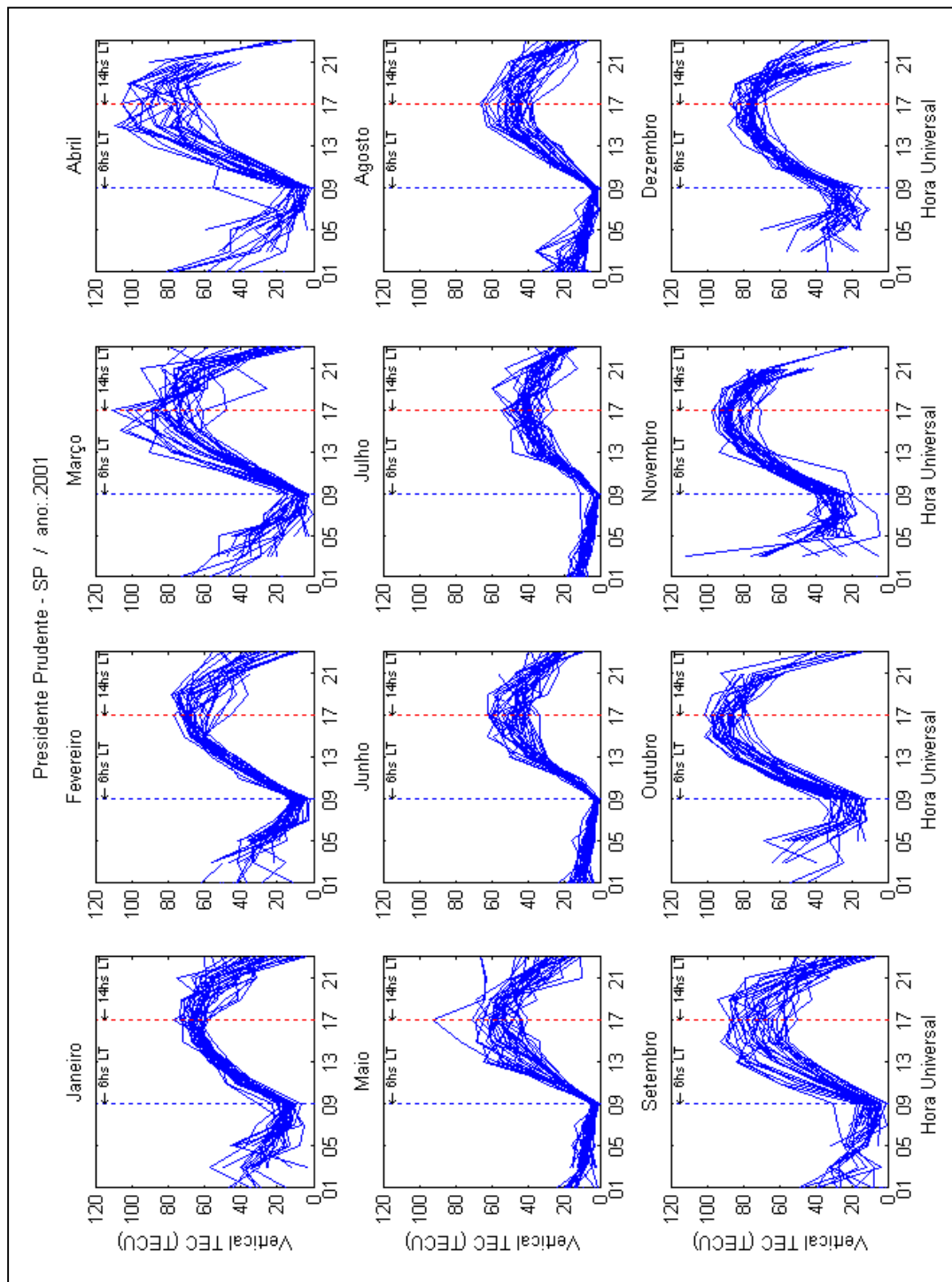


FIGURA 5.10: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE, 2001

Esses gráficos foram apresentados como uma amostra do comportamento do TEC, como ilustração do estado de operação das estações e descrição do que foi feito. Já os gráficos correspondentes as demais estações que integram a RBMC poderão ser observados nos anexos A (Gráficos dos valores calculados e valores médios do TEC) e B (Gráficos com os perfis diários do TEC).

## **5.7 Opções utilizadas no Processamento**

A ferramenta utilizada para o cálculo do TEC foi o programa *Bernese*, versão 4.2. Este programa apresenta uma gama variada de opções de processamento. No caso, as duas opções mais significativas estão relacionadas à altura da camada ionosférica e ao tipo de efeméride utilizada.

### **5.7.1 Escolha da Altura da Camada Ionosférica**

A escolha da camada ionosférica é um item bastante controverso, pois há autores que consideram que esta altura deva estar entre 200 e 400 km. Skone, 1998 realizou testes na região da aurora boreal, variando a altura da camada ionosférica (200, 250 e 300 km). Os resultados encontrados não foram conclusivos. Já Komjathy (1997), fixou a altura da camada em três níveis: 300, 350 e 400 km e concluiu que a altura que mais se aproximou do que ele chamou de verdade foi a de 400 km, considerando que os erros encontrados foram os menores. O mesmo autor ressaltou ainda que deveriam ser feitos testes com um número maior de estações e que tivessem uma cobertura global. Porém, Schaer (1999), utilizando o programa *Bernese* e dados de várias estações IGS, fez uma estimativa da altura da camada ionosférica e verificou que a altura média encontrada era de 450 km. Esse valor excedia o valor a priori que era de 400 km. Foi verificado pelo mesmo autor que, ao variar a altura da camada ionosférica de 50 km há um incremento médio de 0,5 TEC. Desde então, os mapas de ionosfera, produzidos pelo CODE – Center for Orbit Determination in Europe, adotaram o valor de 450 km para a altura da camada ionosférica. Deve-se considerar que os erros provocados ao se escolher diferentes alturas para a camada ionosférica podem ser considerados como de segunda ordem (Schaer, 1999).



Considerando que nesta pesquisa foi utilizado para o cálculo do TEC a mesma ferramenta de Schaer (1999), optou-se, por adotar a mesma altura para a camada ionosférica encontrada no experimento realizado pelo mesmo. A referida altura é um dos diversos parâmetros que devem ser inseridos antes da realização do processamento com o programa *Bernese*.

### **5.7.2 Escolha das Efemérides**

O IGS divulga atualmente 3 tipos distintos de efemérides: a primeira, chamada de ultra-rápida (IGU) e é divulgada a cada 12 horas (3 e 15 horas UTC) e foi desenvolvida para uso em aplicações em tempo real. A sua acurácia é de aproximadamente 25 cm (~ 5 ns). Já o segundo tipo de efeméride é denominado de rápida (IGR), e tem a sua divulgação uma vez ao dia, porém, com uma latência de 17 horas. A sua acurácia é de 5 cm (0,2 ns). E a terceira e última efeméride, denominada final (IGS) é divulgada aproximadamente 13 dias após o dia de referência e tem acurácia melhor que 5 cm (0,1 ns).

Atualmente as efemérides precisas divulgadas pelo IGS são as mais difundidas e as mais utilizadas pelos usuários e, considerando que todos os cálculos foram realizados a posteriori, ou seja, não houve nenhum processamento em tempo real, optou-se pelo uso das efemérides precisas (finais) geradas pelo mesmo.

Outro fator, que contribuiu para a escolha das efemérides precisas, está correlacionado com a redução do tempo de processamento pois, ao se utilizar efemérides transmitidas o referido programa realiza duas operações a mais que ao se utilizar efemérides precisas.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão discutidos e analisados os resultados do TEC encontrados durante o processamento dos dados para o período de cinco anos.

### 6.1 Análise dos Gráficos do TEC

Nas figuras de 6.1 a 6.13 são apresentados quatro gráficos distintos. O gráfico superior indica o valor do TEC calculado a cada 2 horas para cada uma das treze estações que compõem a RBMC. No segundo gráfico é apresentada a média diária ao longo de todo o período de estudos. Já no terceiro gráfico é apresentada a média do TEC diurno, ou seja, a média calculada entre 6 e 16 horas. E, no último gráfico, é apresentada a média noturna para cada dia.

Ao analisar detalhadamente as figuras observa-se que o comportamento do TEC acompanha o ciclo solar que, no caso, abrangeu um intervalo de tempo de 5 anos onde pode ser observado um período de baixa atividade solar para o ano de 1997, e um período de intensa atividade para os anos 2000 e 2001. Pode ser observado ainda que, a cada ano ocorrem dois períodos em que o valor de TEC é máximo (março/abril e setembro/outubro) coincidindo com o equinócio de outono e o equinócio de primavera. Verifica-se também que, há a ocorrência de apenas um período onde o valor de TEC é mínimo (junho/julho) havendo, neste caso, uma coincidência com o solstício de inverno para os habitantes do hemisfério sul. Quanto ao valor médio do TEC, verifica-se que é maior no segundo semestre quando comparado com o primeiro semestre do ano. Esta constatação é válida para os 5 anos de análise.

Na análise dos valores médios diurno e noturno, observa-se que apesar do valor numérico do TEC noturno ser inferior (quarto gráfico) ao valor numérico do TEC diurno (terceiro gráfico), há uma maior dispersão da média. Isto indica que os eventos de curta duração passam a atuar com maior intensidade e podem ser, então, detectados já que a maior fonte perturbadora da ionosfera, o Sol, não está presente. Desta forma, eventos de curta duração, como por exemplo a cintilação, podem ser detectados.

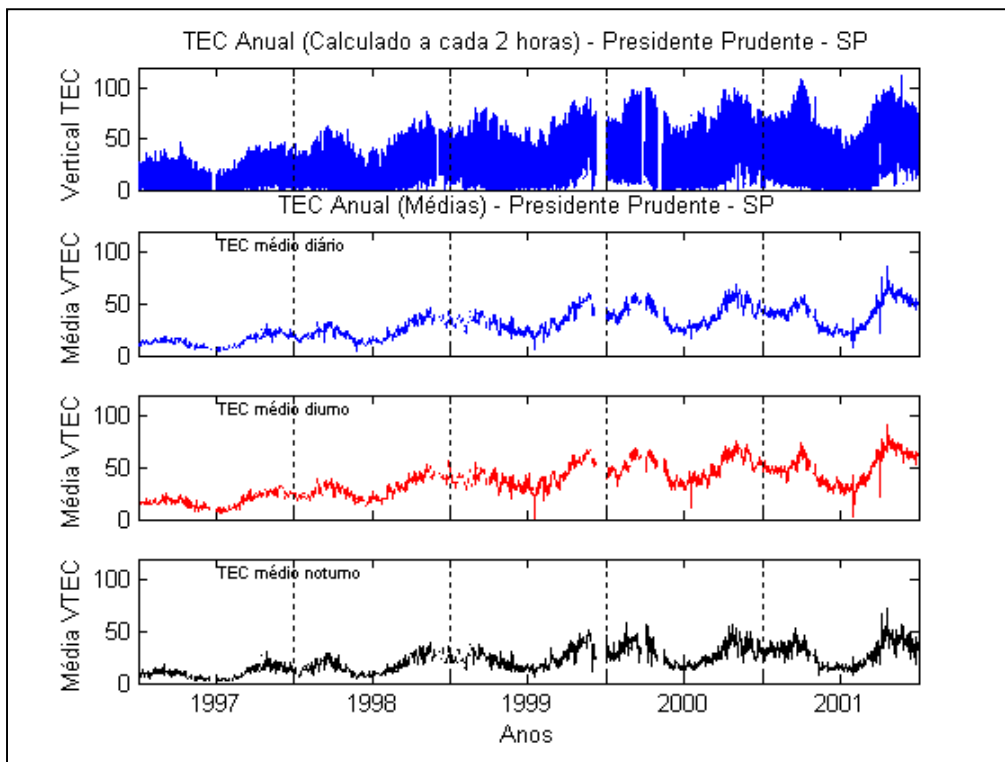


FIGURA 6.1: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE – SP

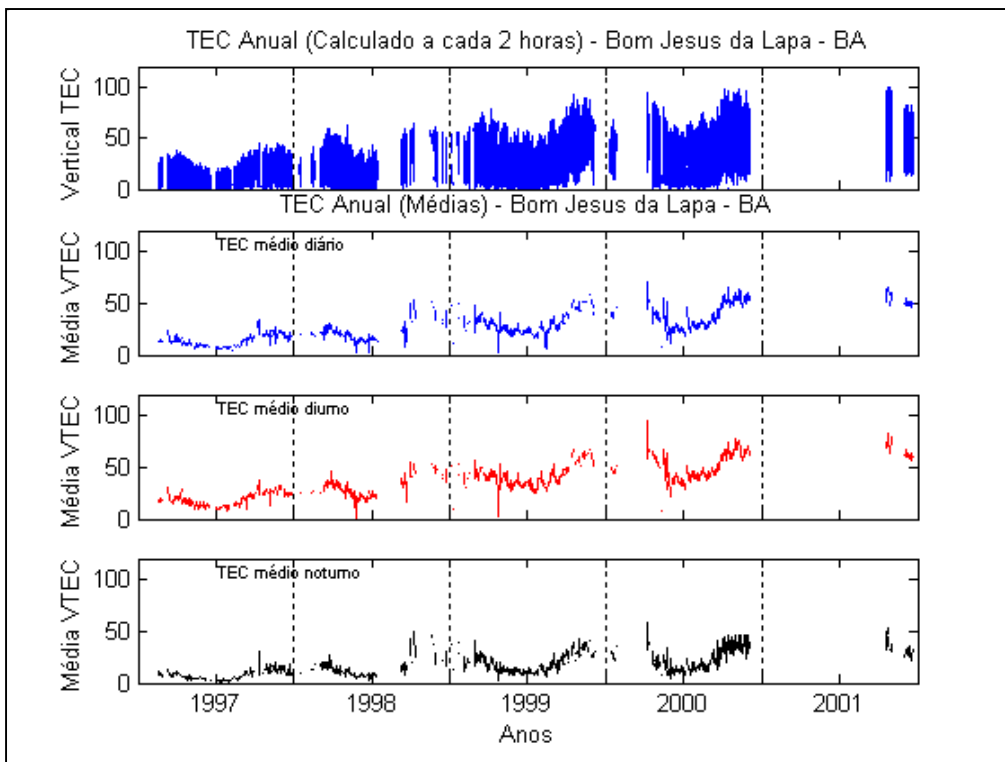


FIGURA 6.2: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - BA

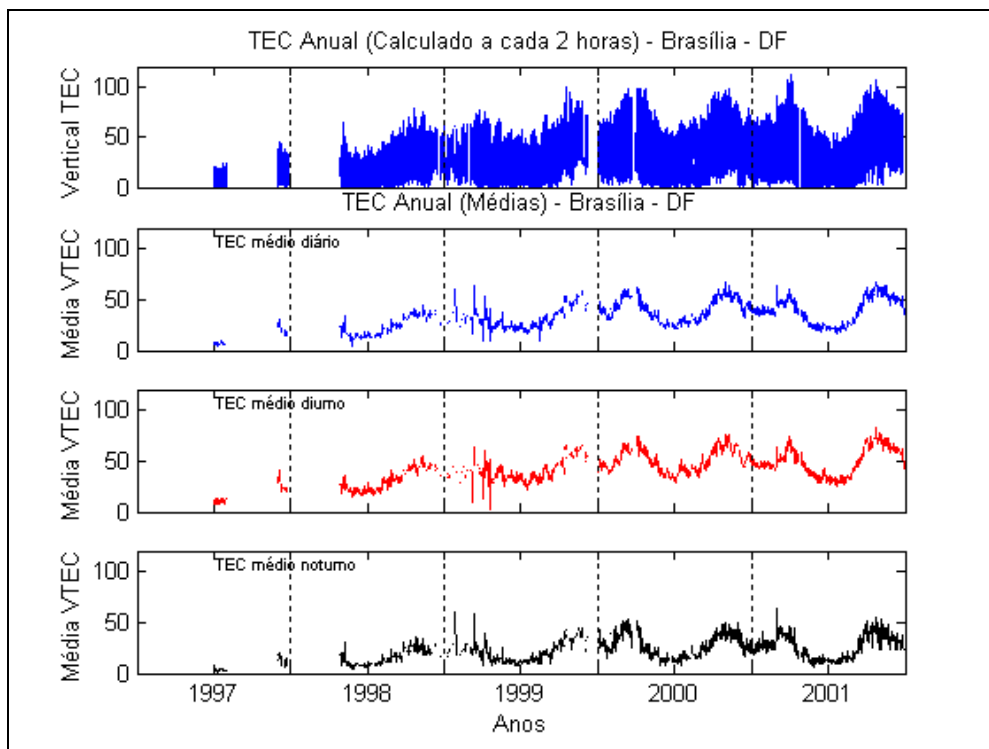


FIGURA 6.3: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA – DF

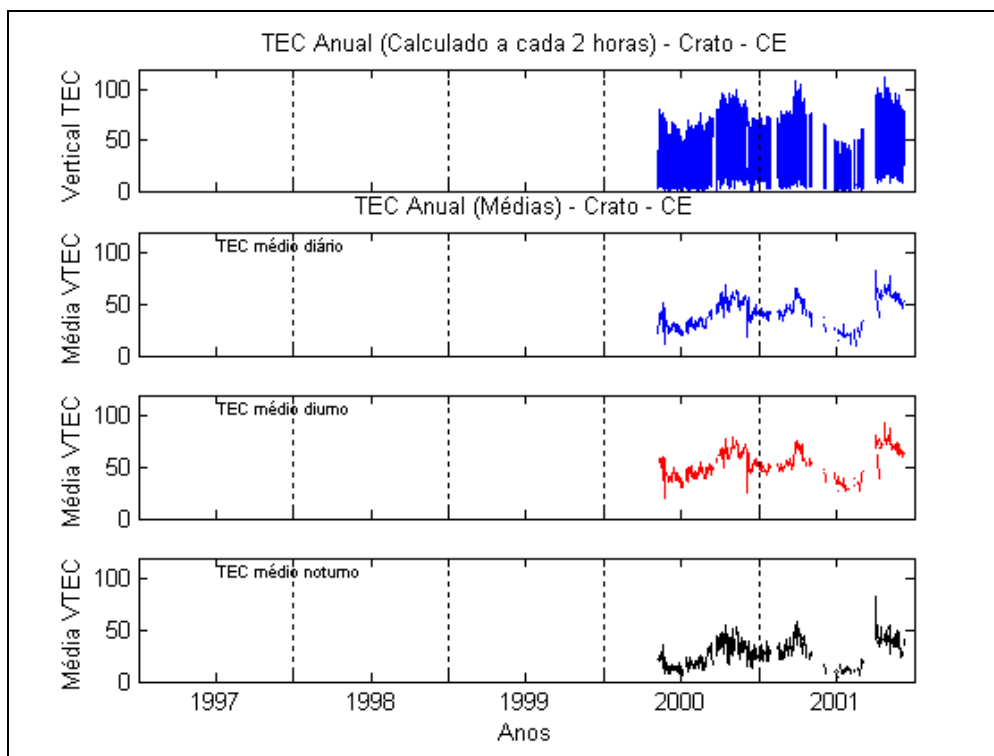


FIGURA 6.4: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE CRATO - CE

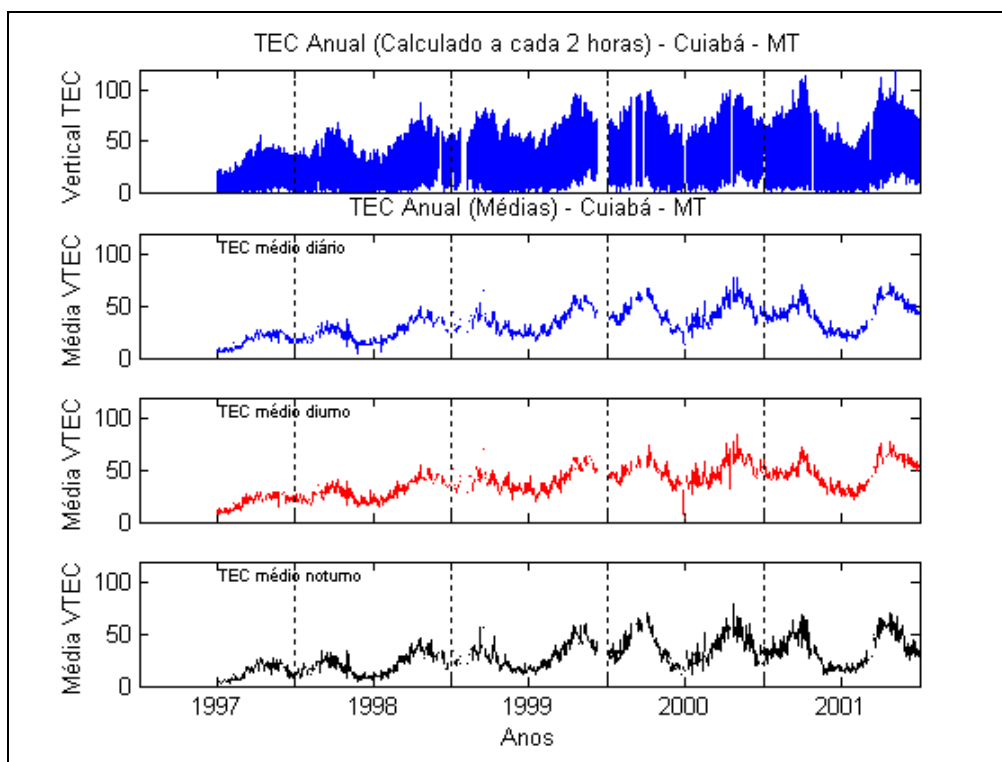


FIGURA 6.5: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - MT

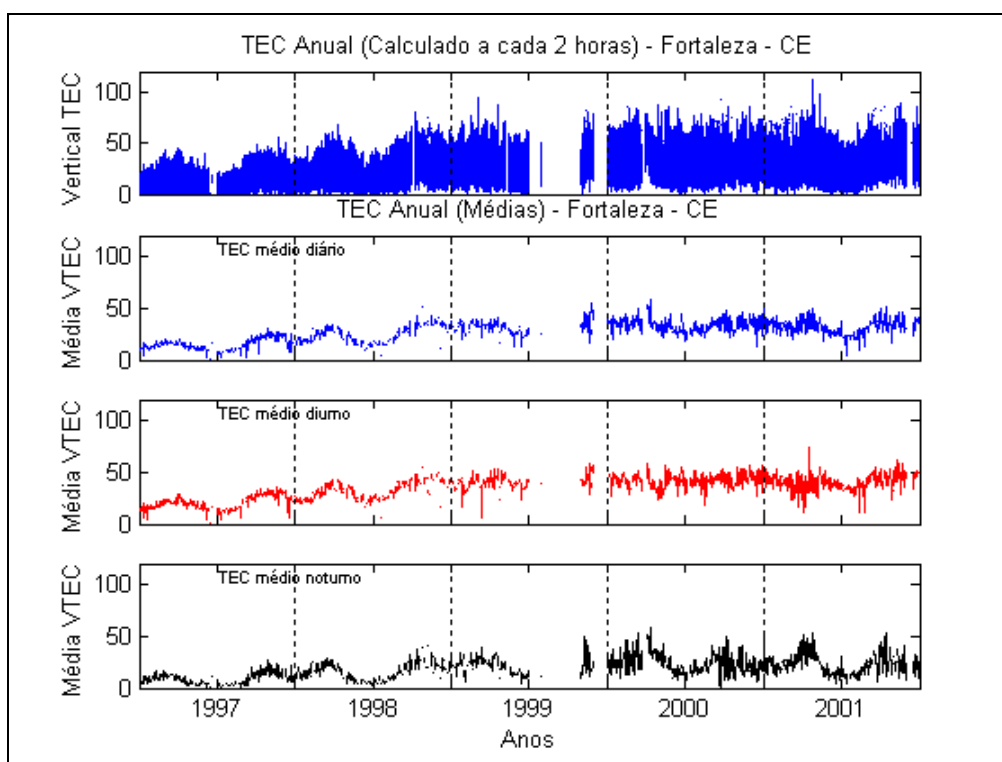


FIGURA 6.6: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA - CE

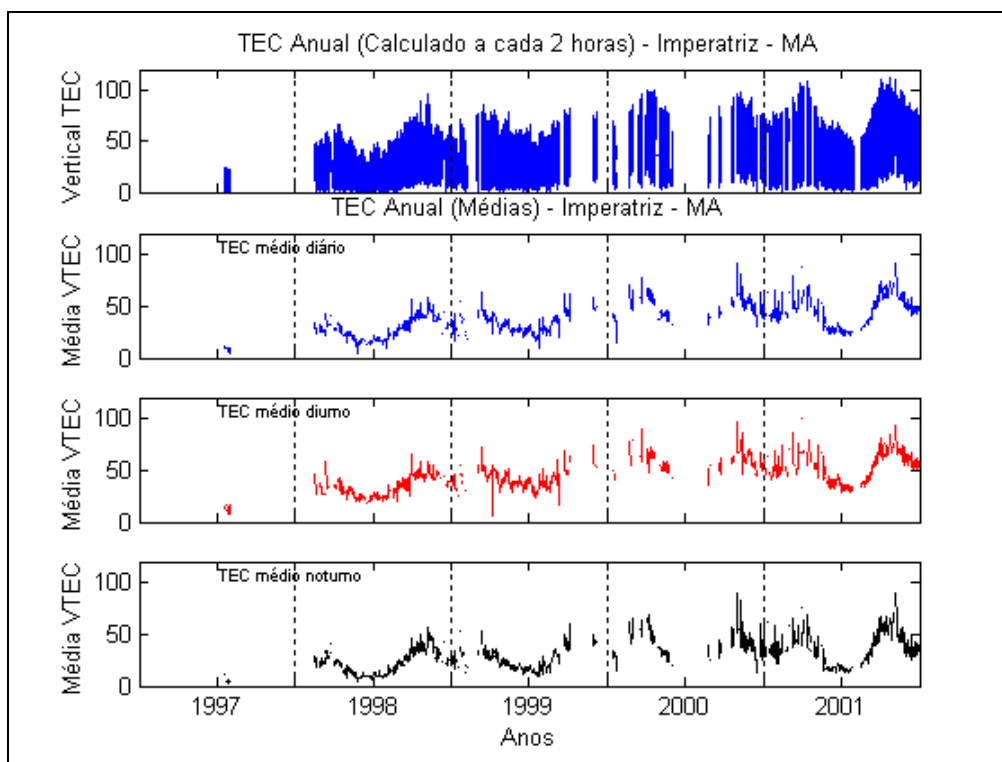


FIGURA 6.7: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – MA

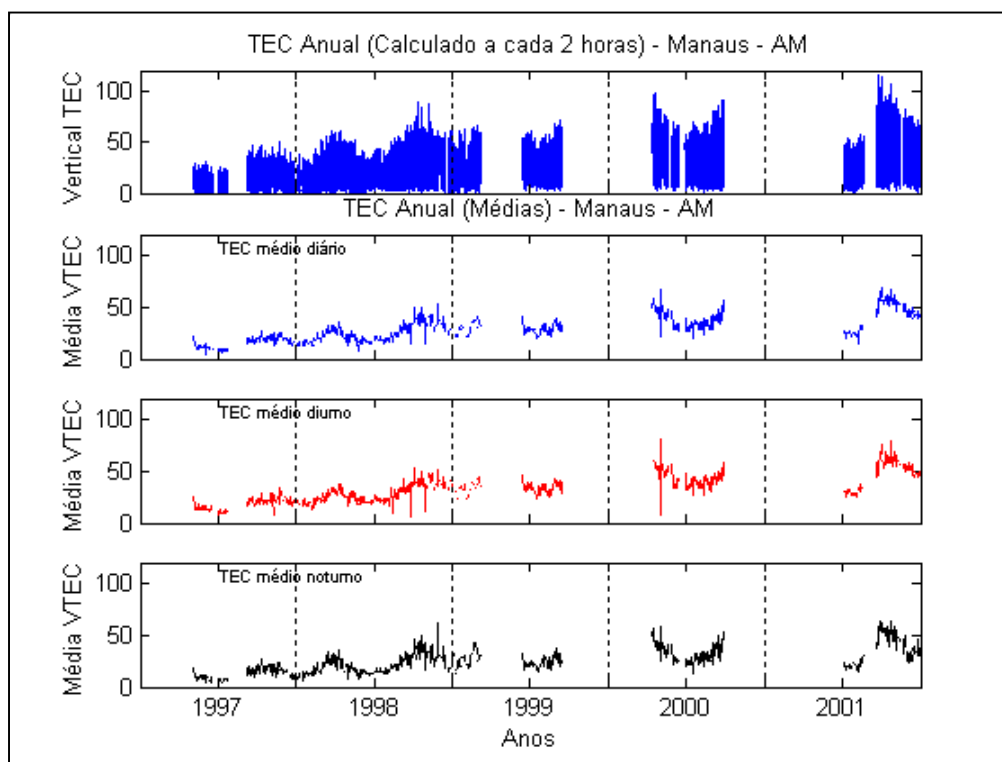


FIGURA 6.8: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – AM.

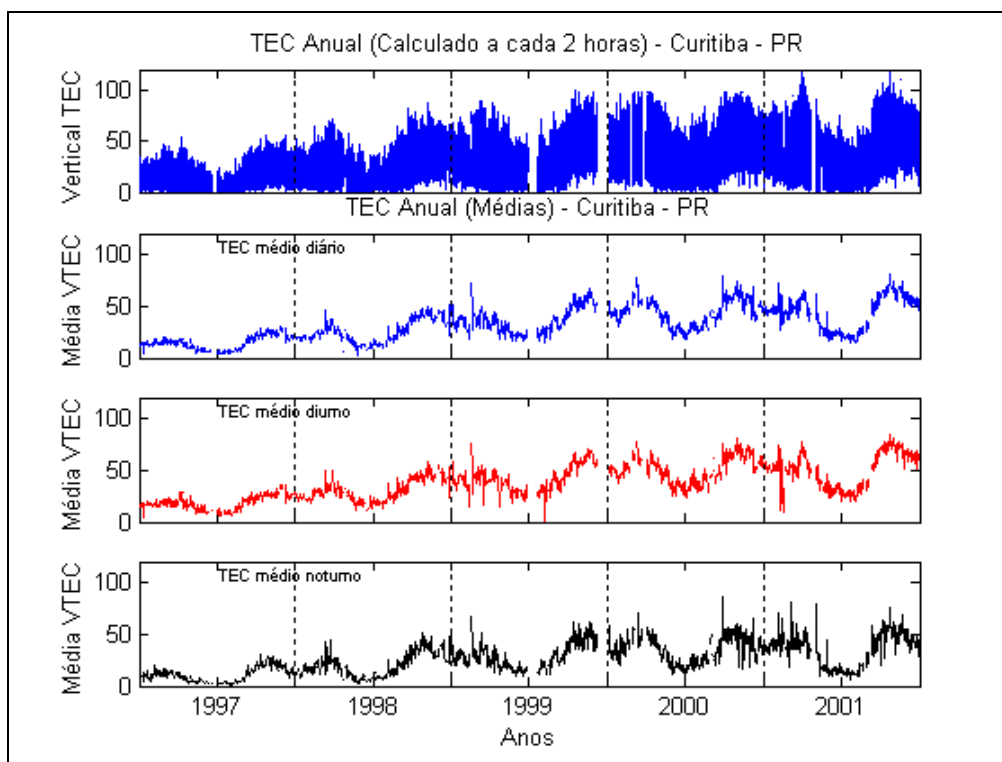


FIGURA 6.9: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA – PR.

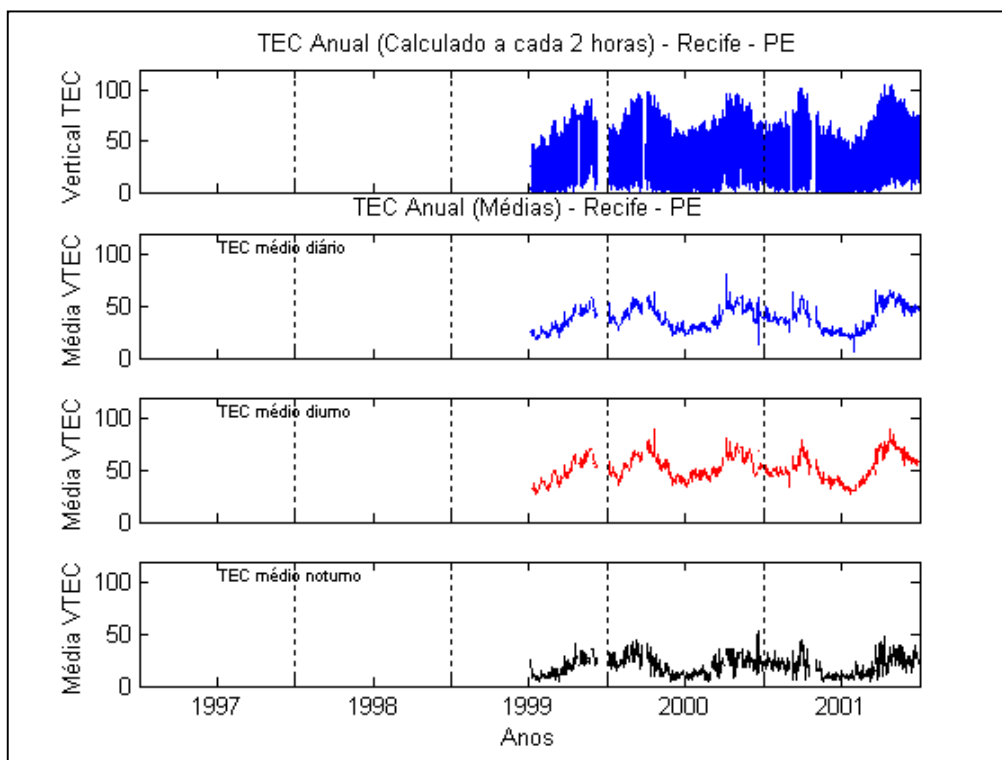


FIGURA 6.10: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE RECIFE - PE

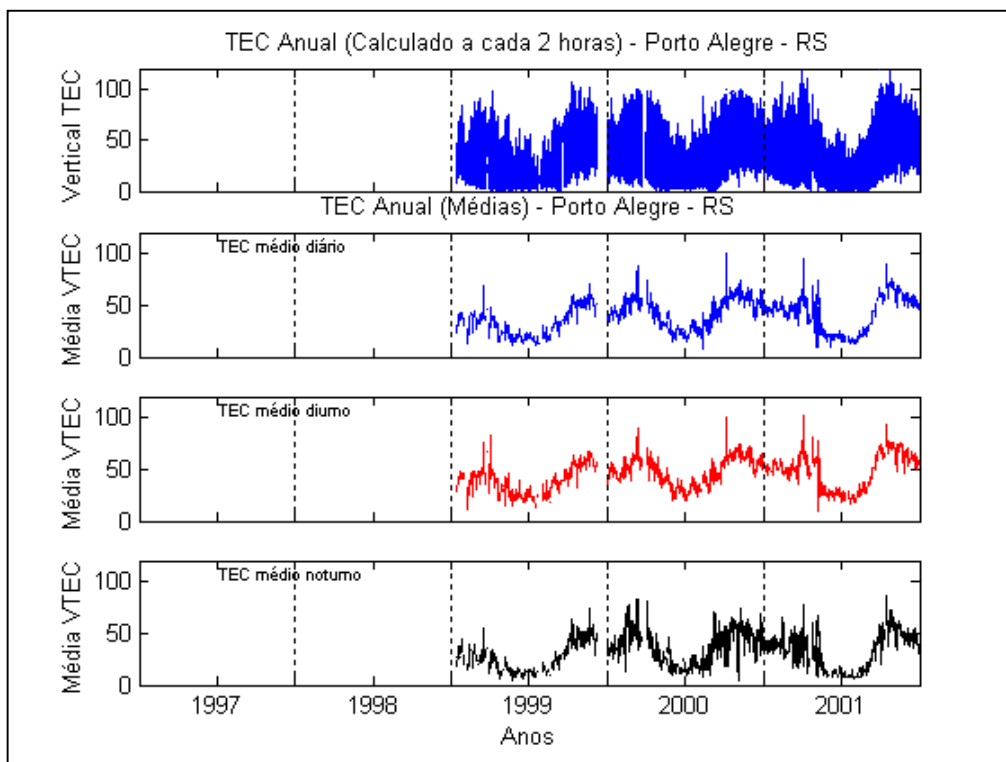


FIGURA 6.11: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE – RS

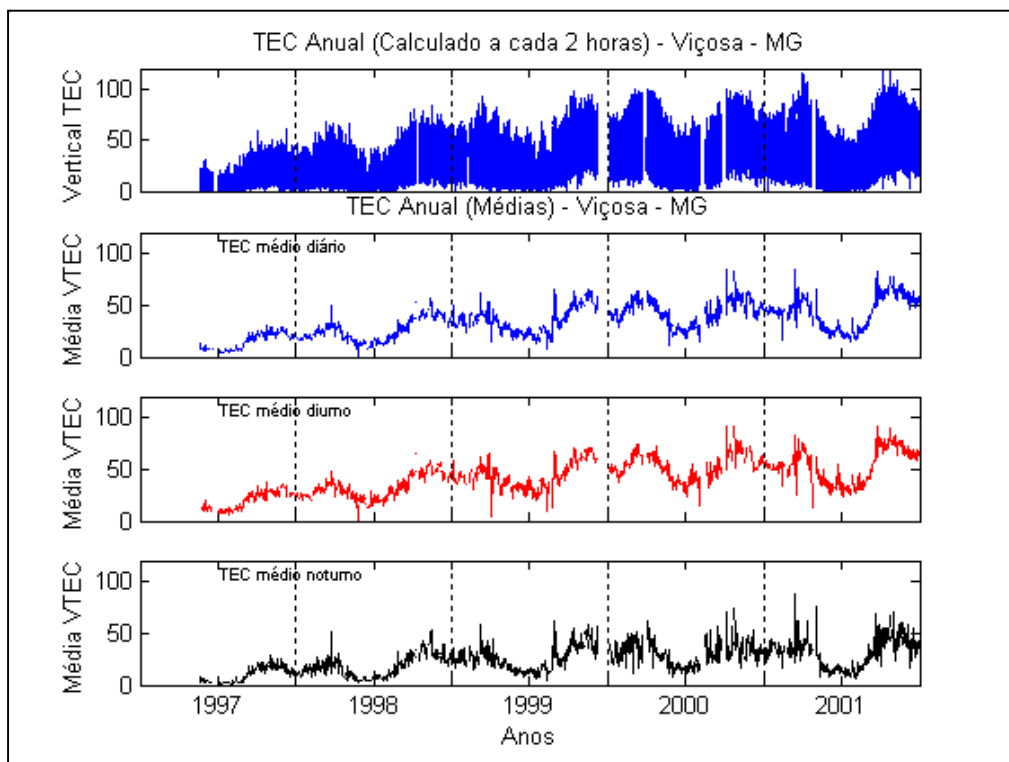


FIGURA 6.12: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE SALVADOR - BA



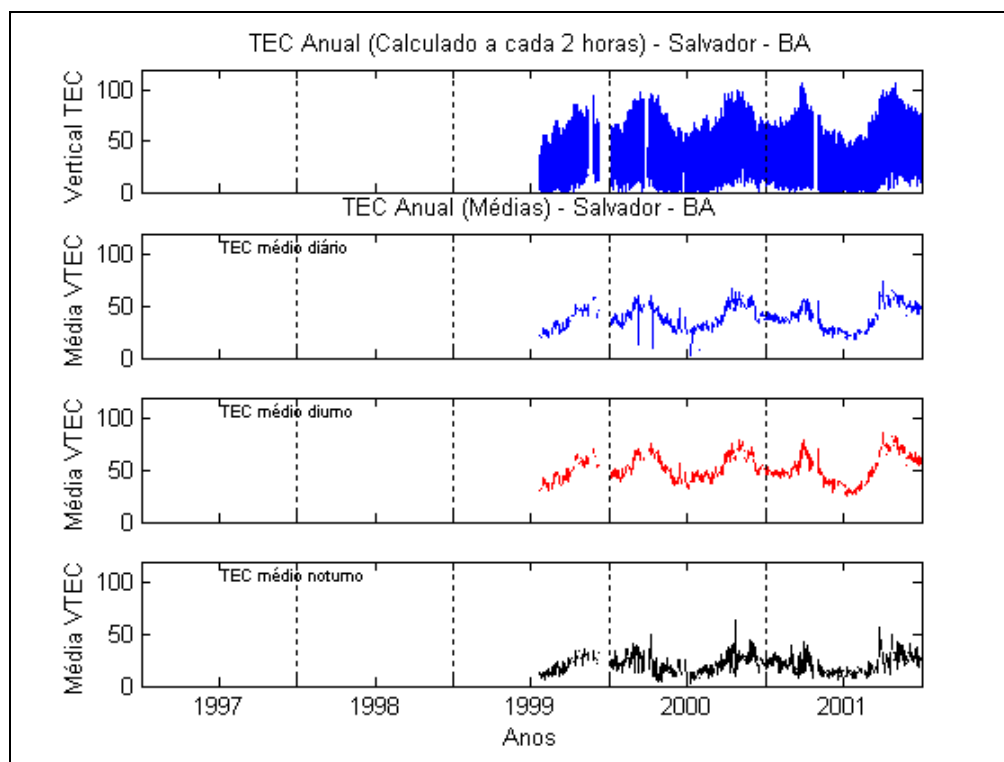


FIGURA 6.13: VALOR CALCULADO E RESPECTIVAS MÉDIAS PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA - MG

## 6.2 Análise Espectral dos Resultados

De posse dos valores médios diários do TEC das estações da RBMC foi realizada a análise espectral para verificar o período de repetibilidade dos dados. Para tanto, foi utilizado o programa denominado ANHA.FOR desenvolvido no LEGOS - Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiale - Toulouse, França. Esse programa teve que ser modificado, pelo autor desta pesquisa, para que se adaptasse ao conjunto de dados utilizados na análise espectral.

Na figura 6.14 são apresentados, também, três gráficos. O primeiro representa a análise espectral realizada para todo o conjunto de dados que perfaz um total de 5 anos ou seja, 1826 valores médios do TEC. O segundo gráfico apresenta apenas os primeiros 500 dias da análise e podem ser observados picos que correspondem a uma periodicidade de aproximadamente 368 dias. Enquanto no terceiro e último gráfico verifica-se que o pico ocorre com periodicidade de aproximadamente 186 dias. Neste gráfico, há ainda, um outro pico que ocorre com periodicidade de aproximadamente 120 dias. Tais resultados estão diretamente relacionados ao comportamento do Sol. No caso do pico anual, verifica-se que esta periodicidade é diretamente relacionada

com a translação da Terra. Para o pico de 186 dias verifica-se que há uma relação entre o TEC calculado e o hemisfério terrestre que está recebendo maior incidência de raios solares. No caso do pico de 120 dias, o mesmo está diretamente relacionado às quatro estações do ano, ou seja, à região da Terra que recebe maior ou menor insolação bem como, ao afastamento entre o Sol e a Terra.

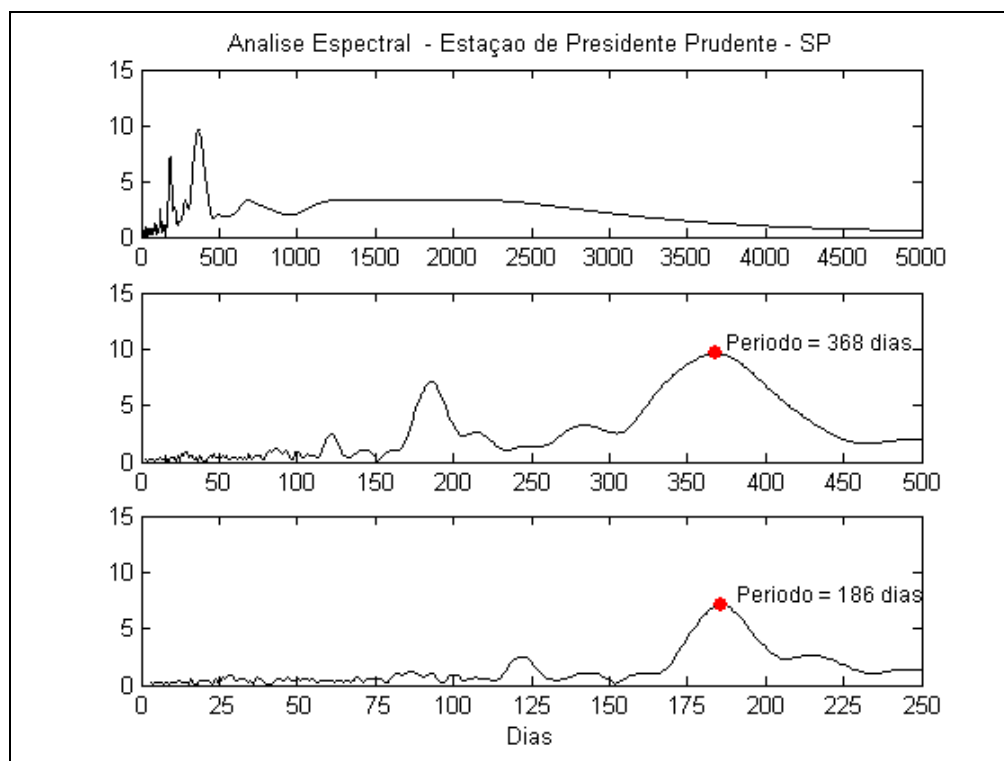


FIGURA 6.14: ANÁLISE ESPECTRAL - ESTAÇÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE – SP (1997 – 2001)

No caso da estação de Curitiba - PR (figura 6.15) e da estação de Viçosa - MG (figura 6.16), assim como, para todas as outras estações da RBMC, é possível verificar o mesmo comportamento observado na estação de Presidente Prudente - SP. Existe apenas uma diferença de  $\pm 1$  dia, para os valores de picos obtidos após as análises espectrais, fato este que não modifica a tendência geral observada.

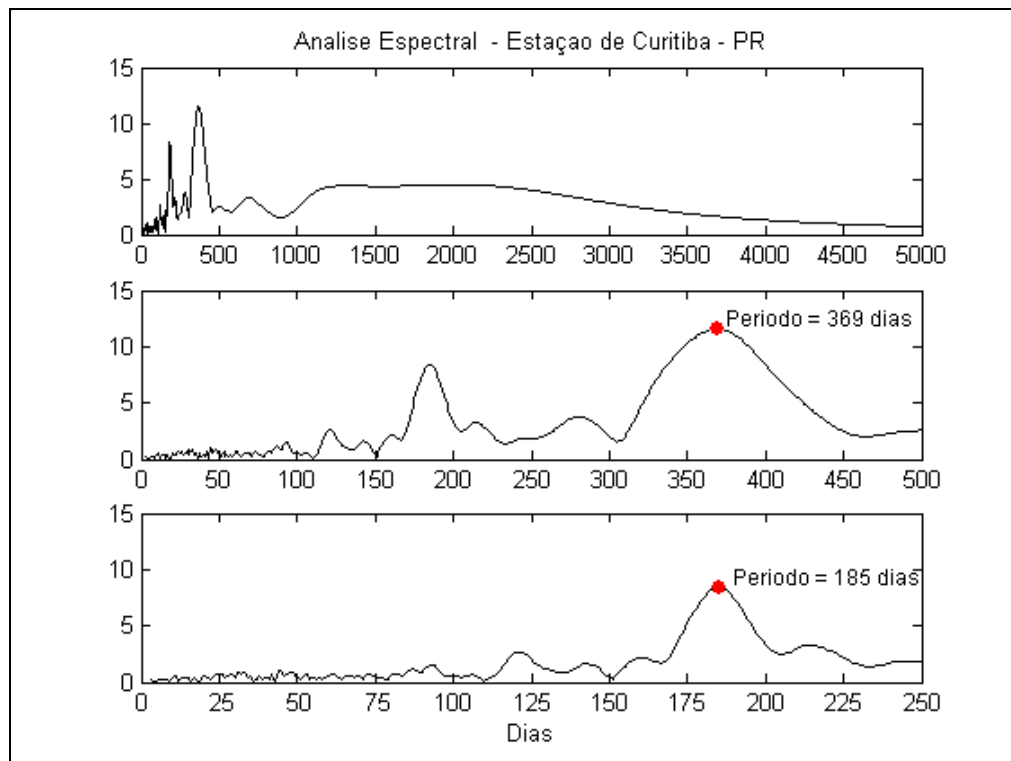


FIGURA 6.15: ANÁLISE ESPECTRAL - ESTAÇÃO DE CURITIBA – PR (1997 – 2001)

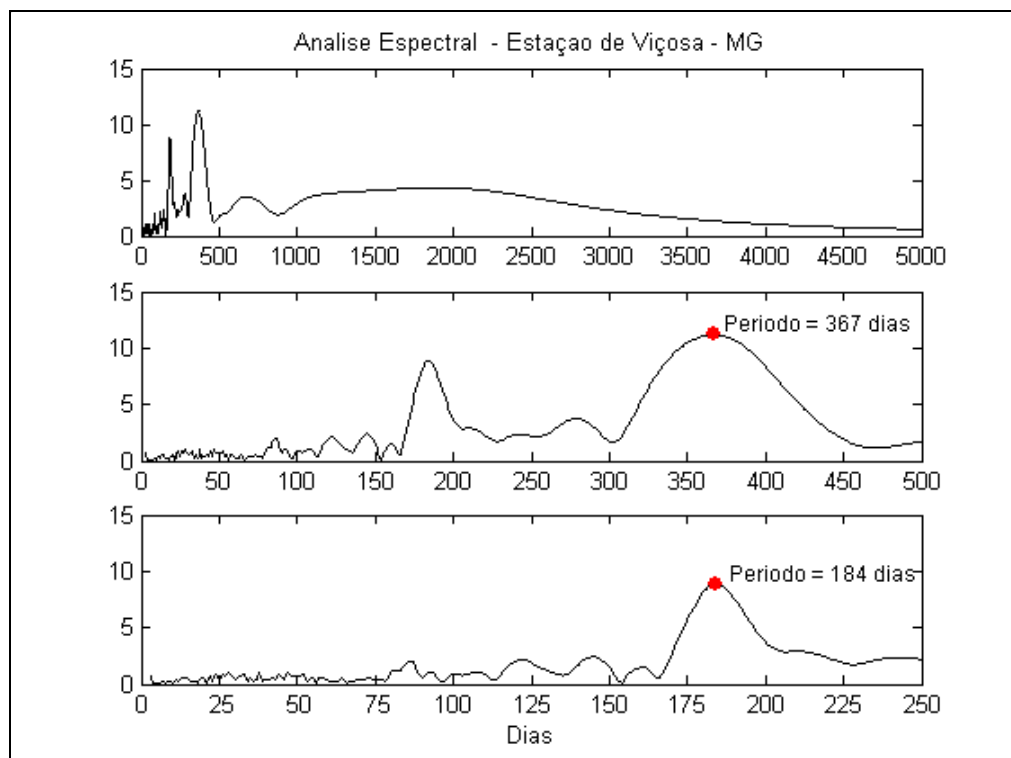


FIGURA 6.16: ANÁLISE ESPECTRAL - ESTAÇÃO DE VIÇOSA – MG (1997 – 2001)

### 6.3 Análise Diária dos Resultados

Nas figuras 6.17 a 6.21 estão representados os valores diários do TEC mês a mês, calculados para a estação Curitiba - PR. O período estudado abrange 5 anos e teve seu início em janeiro de 1997 e seu término em dezembro de 2001. Este período abrangeu aproximadamente meio ciclo solar ( $\cong 5,5$  anos).

Em todas as figuras com dados da estação Curitiba-PR, nota-se que há dois picos para o valor do TEC. O primeiro e mais intenso, alcança valores máximos e normalmente ocorre por volta das 14 horas (17 horas UT). No caso do segundo pico, o mesmo ocorre por volta das 22 horas (1 hora UT) e tem, em geral, valores máximos menores do que os valores máximos do pico diurno.

Verifica-se ainda, que à medida que o ciclo solar se aproxima do máximo de sua atividade (2000/2001), ocorre um aumento efetivo dos valores do TEC calculados, como também, há um aumento na dispersão dos valores do TEC, se comparados diariamente.

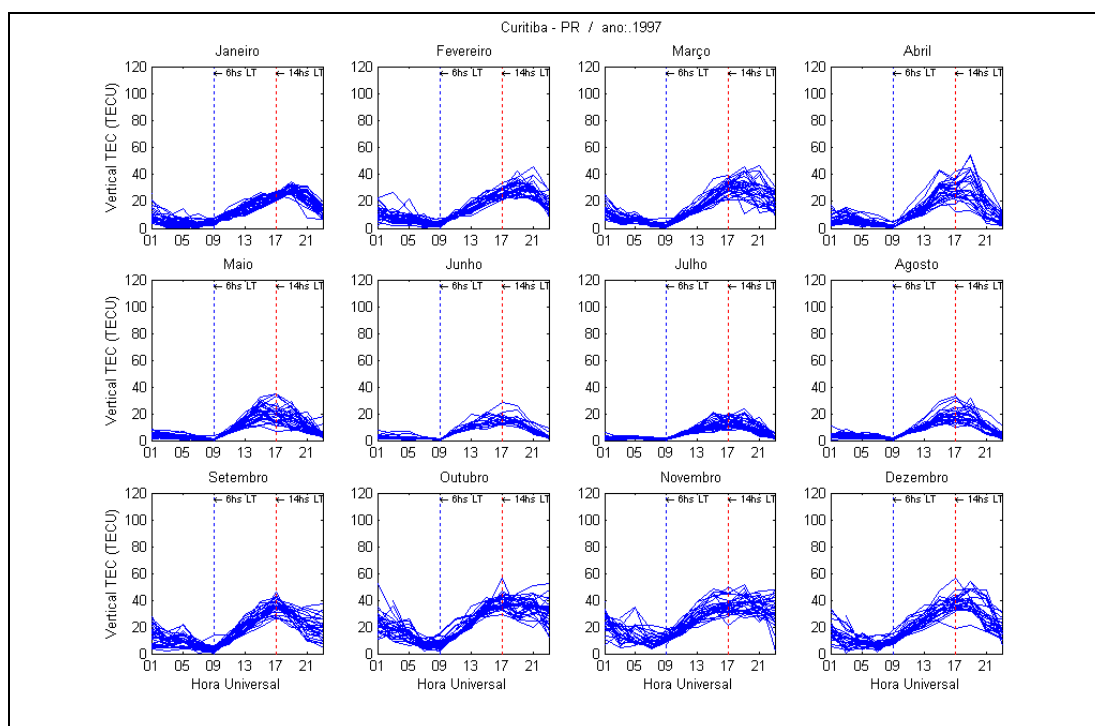
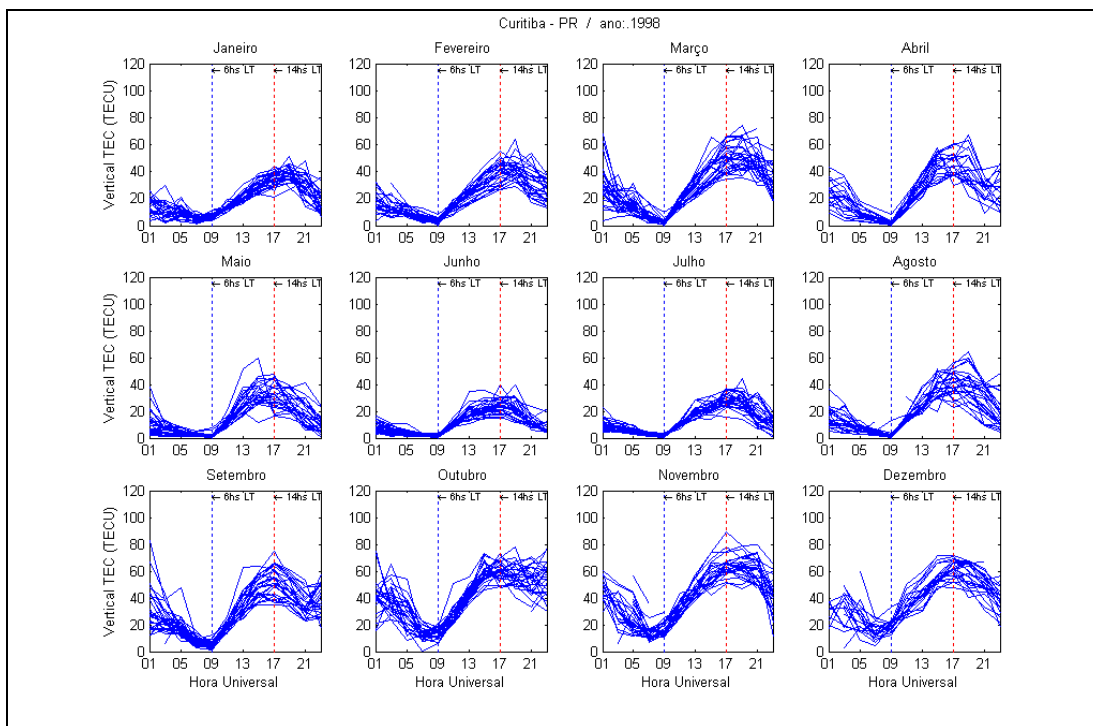
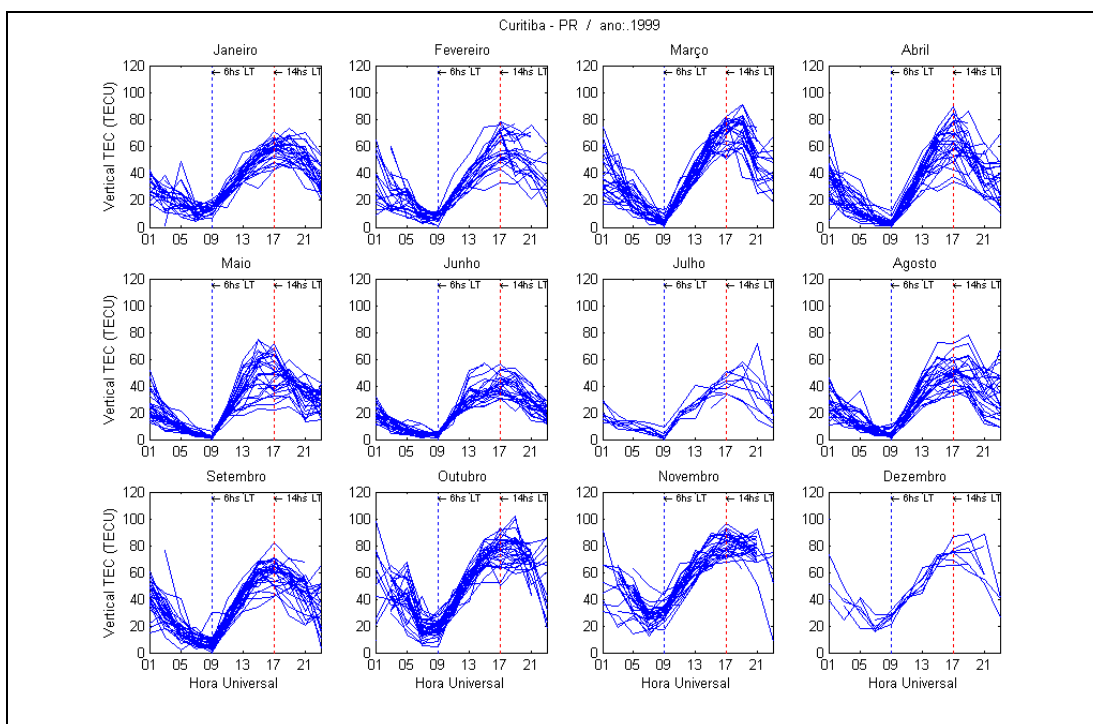


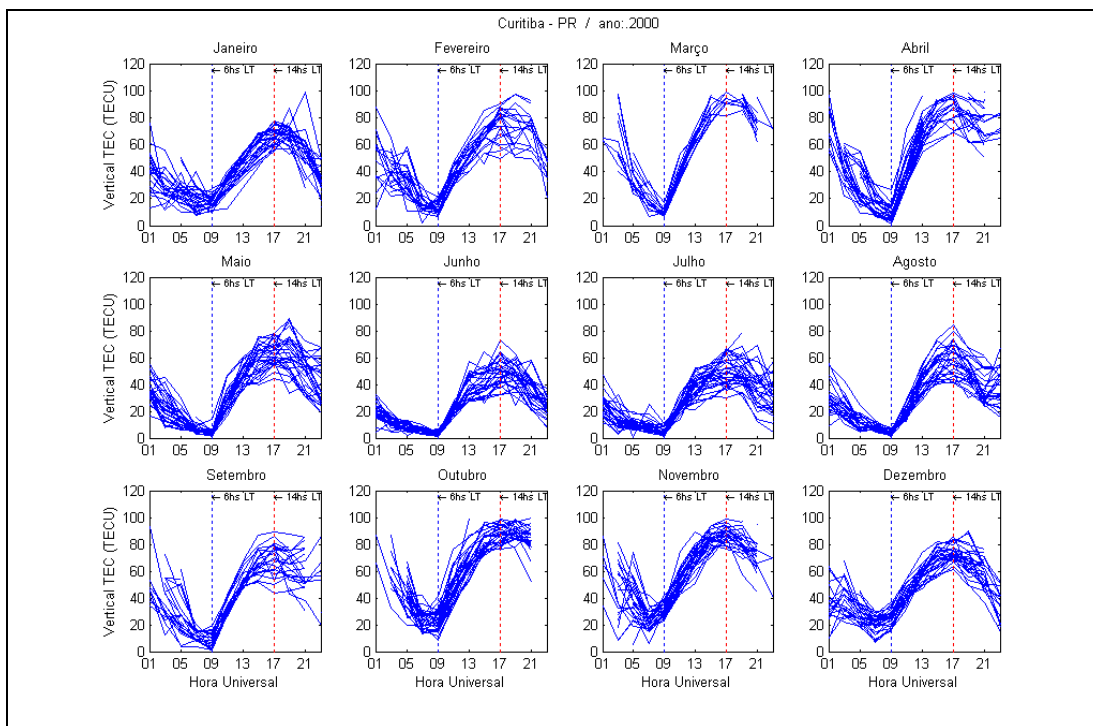
FIGURA 6.17: VALORES DIÁRIOS DO TEC CALCULADOS PARA A ESTAÇÃO CURITIBA – PR EM 1997



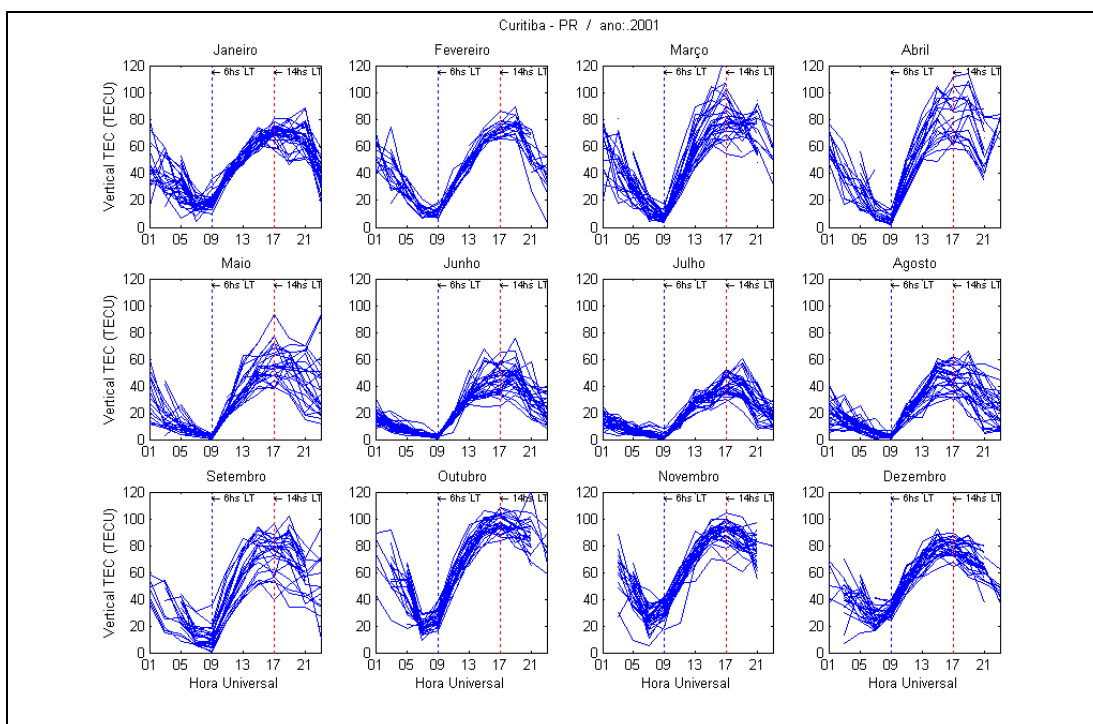
**FIGURA 6.18: VALORES DIÁRIOS DO TEC CALCULADOS PARA A ESTAÇÃO CURITIBA – PR EM 1998**



**FIGURA 6.19: VALORES DIÁRIOS DO TEC CALCULADOS PARA A ESTAÇÃO CURITIBA – PR EM 1999**



**FIGURA 6.20: VALORES DIÁRIOS DO TEC CALCULADOS PARA A ESTAÇÃO CURITIBA - PR EM 2000**



**FIGURA 6.21: VALORES DIÁRIOS DO TEC CALCULADOS PARA A ESTAÇÃO CURITIBA - PR EM 2001**

Ao analisar as figuras 6.17 a 6.21 fica claro que, seja qual for a intensidade da atividade solar, os meses de junho e julho apresentam sempre os menores valores do TEC. Pode-se constatar que há dois períodos diários em que a atividade ionosférica é mais intensa, que são às 14 e às 22 horas (17 e 1 horas UT) e um período em que a atividade ionosférica está bem calma, que é às 6 horas (9 horas UT).

Lembrando que nesta pesquisa foram calculados 12 valores de TEC, ou seja, um valor a cada 2 horas de observações GPS. Constatou-se que ao longo do período de estudos, dois dos doze valores previstos do TEC não foram, em geral, calculados. A quantidade de valores não calculados aumentou à medida em que o ciclo de atividade solar se aproximava de seu máximo. Este fato, ocorreu, em geral, às 20 e às 22 horas (23 e 01 hora UT), e está relacionado com a cintilação (Ver item 3.3) que deve ter provocado a perda de sintonia do receptor com os satélites que estavam sendo rastreados.

#### **6.4 Mapa Ionosférico do Brasil**

Um dos produtos gerados nesta pesquisa foram os mapas (isolinhas) dos valores do TEC para o Brasil (ou parte). Nas figuras de 6.22 a 6.25 observa-se a atividade ionosférica ao longo de todo o dia para quatro épocas distintas do ano de 2000.

Na figura 6.22 pode ser observado o mapa do comportamento da ionosfera próximo ao equinócio de outono. Já na figura 6.23 o mapa representa a atividade ionosférica durante o solstício de inverno. Enquanto que na figura 6.24 está representado o comportamento da ionosfera próximo ao equinócio de primavera. E finalmente, na figura 6.25 estão representados os doze mapas diários para o solstício de verão.

Verifica-se que, para um melhor detalhamento do comportamento da ionosfera ao longo do dia sobre o Brasil, há a necessidade de aumentar o número de estações de monitoramento contínuo, principalmente na região amazônica e no extremo sul do país.

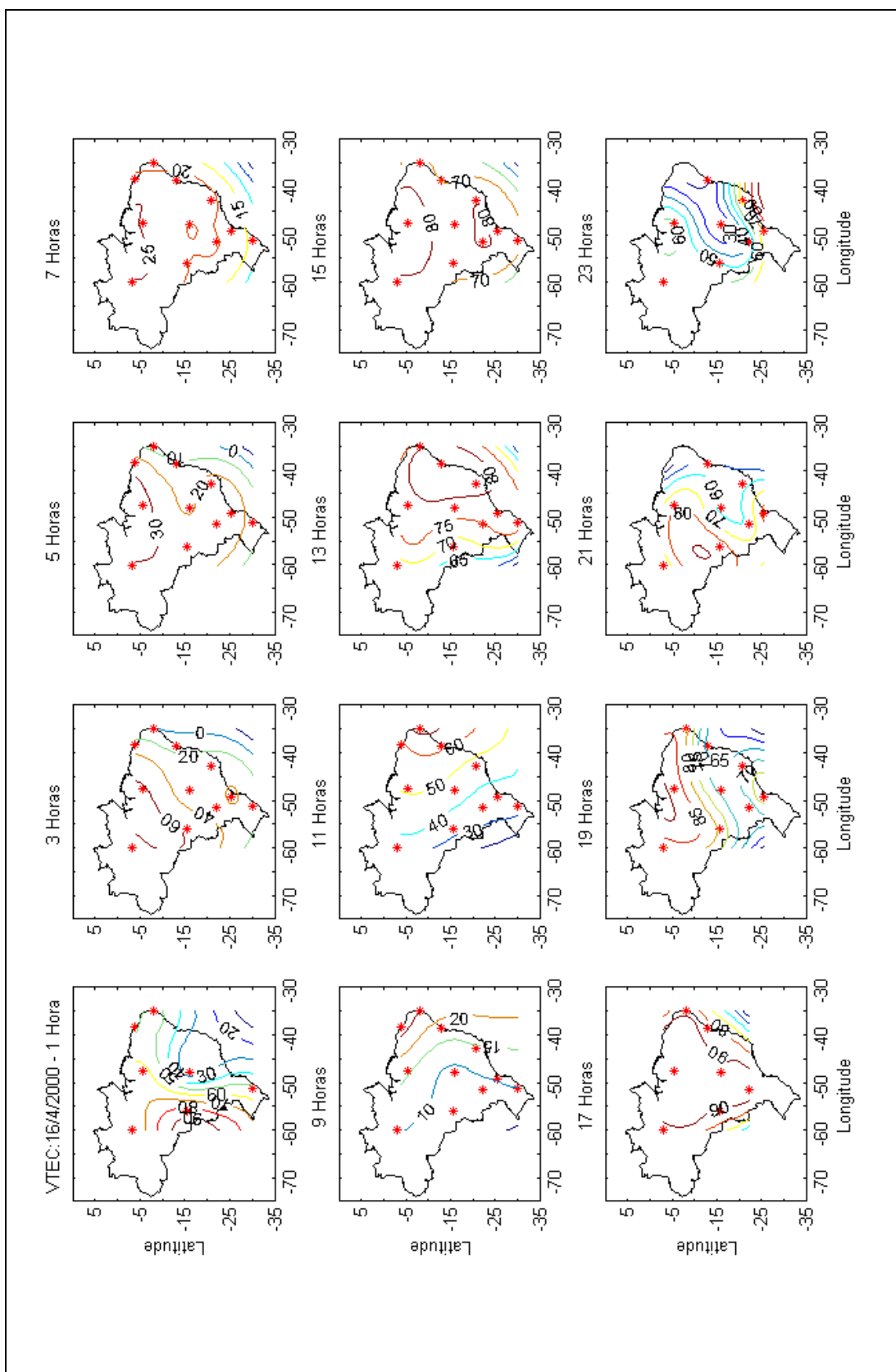


FIGURA 6.22: MAPA DO TEC CALCULADO A CADA 2 HORAS PRÓXIMO AO EQUINÓCIO DE OUTONO



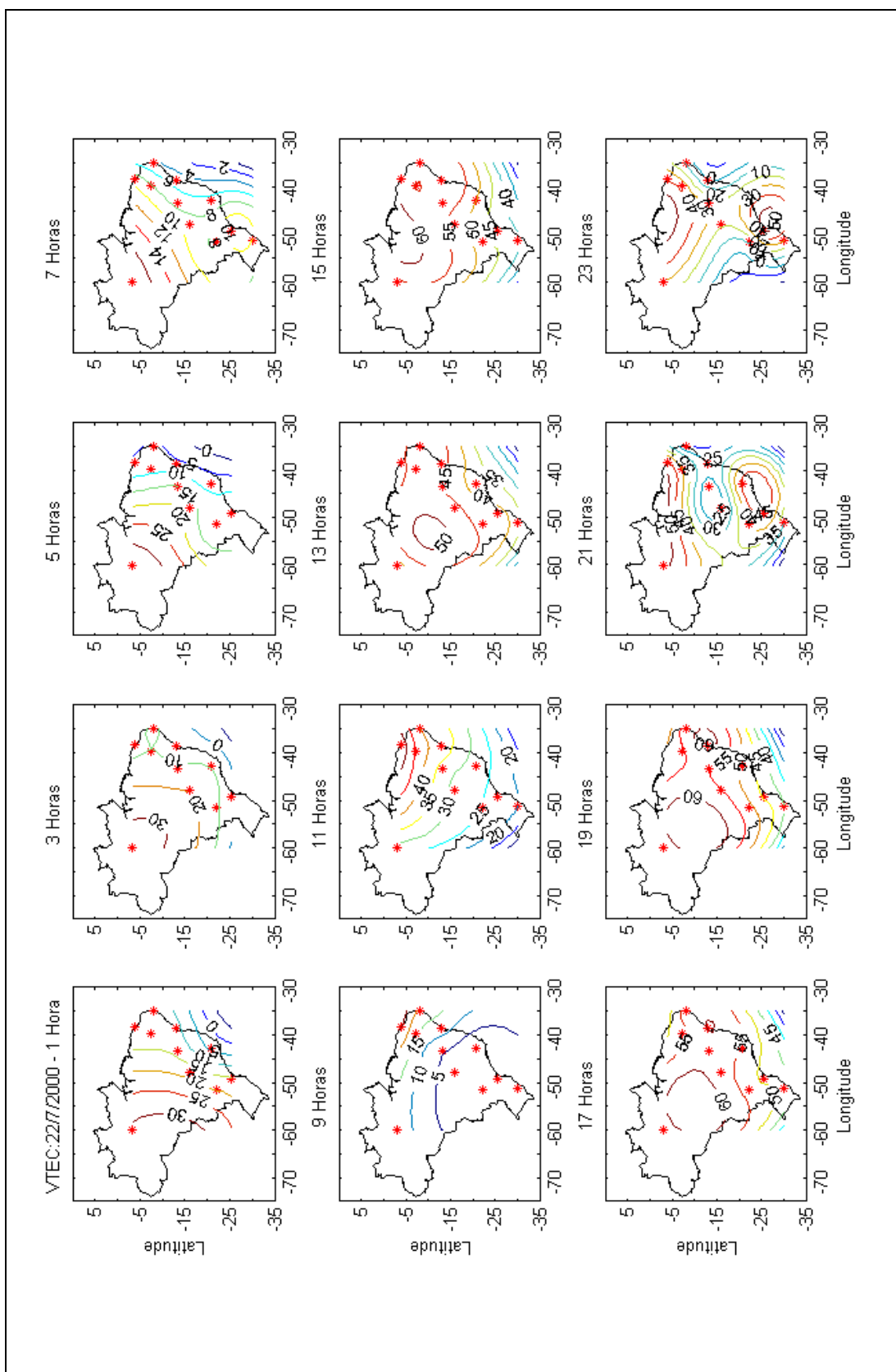


FIGURA 6.23: MAPA DO TEC CALCULADO A CADA 2 HORAS PROXIMO AO SOLSTÍCIO DE INVERNO

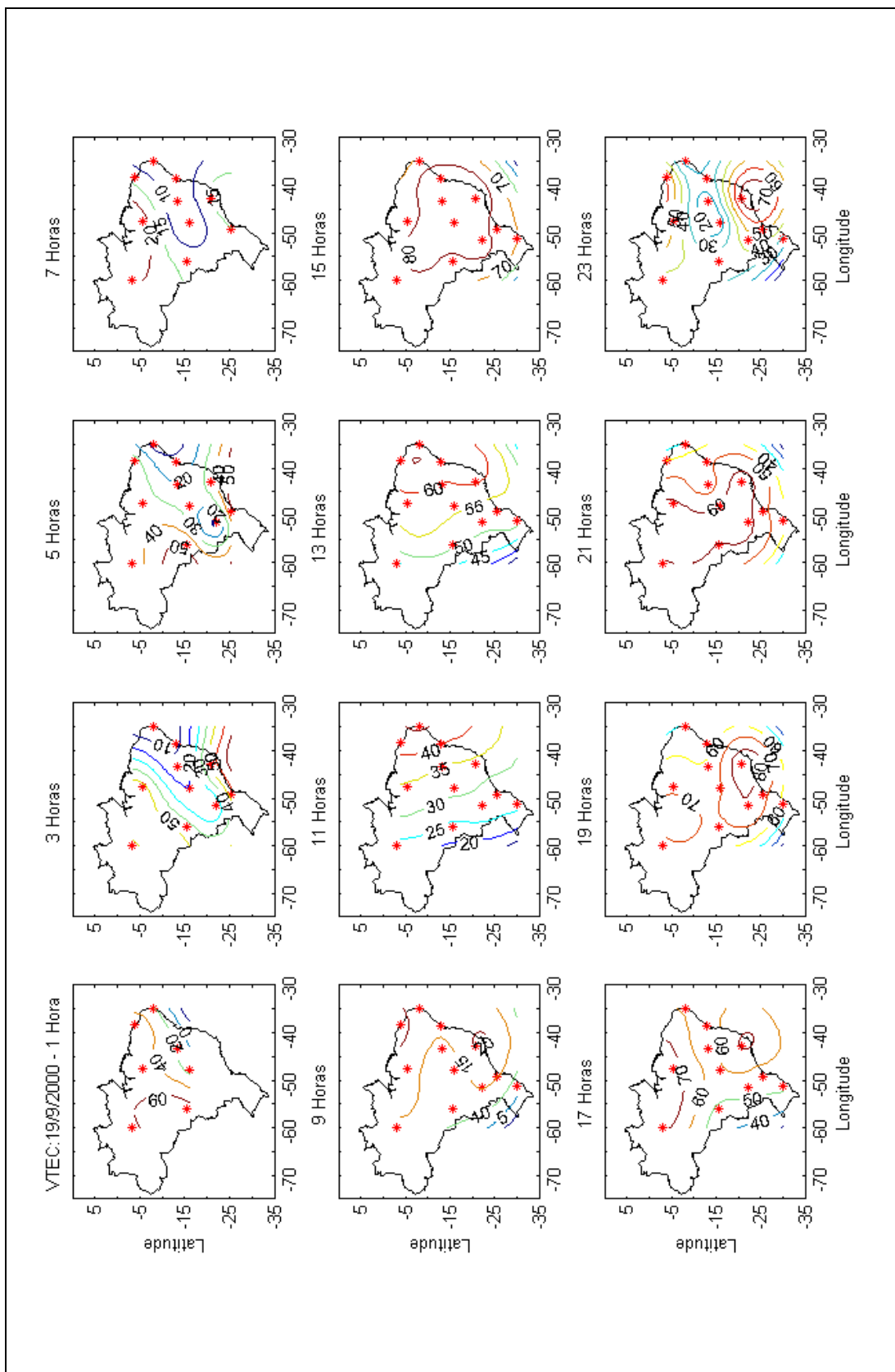


FIGURA 6.24: MAPA DO TEC CALCULADO A CADA 2 HORAS PRÓXIMO AO EQUINÓCIO DE PRIMAVERA

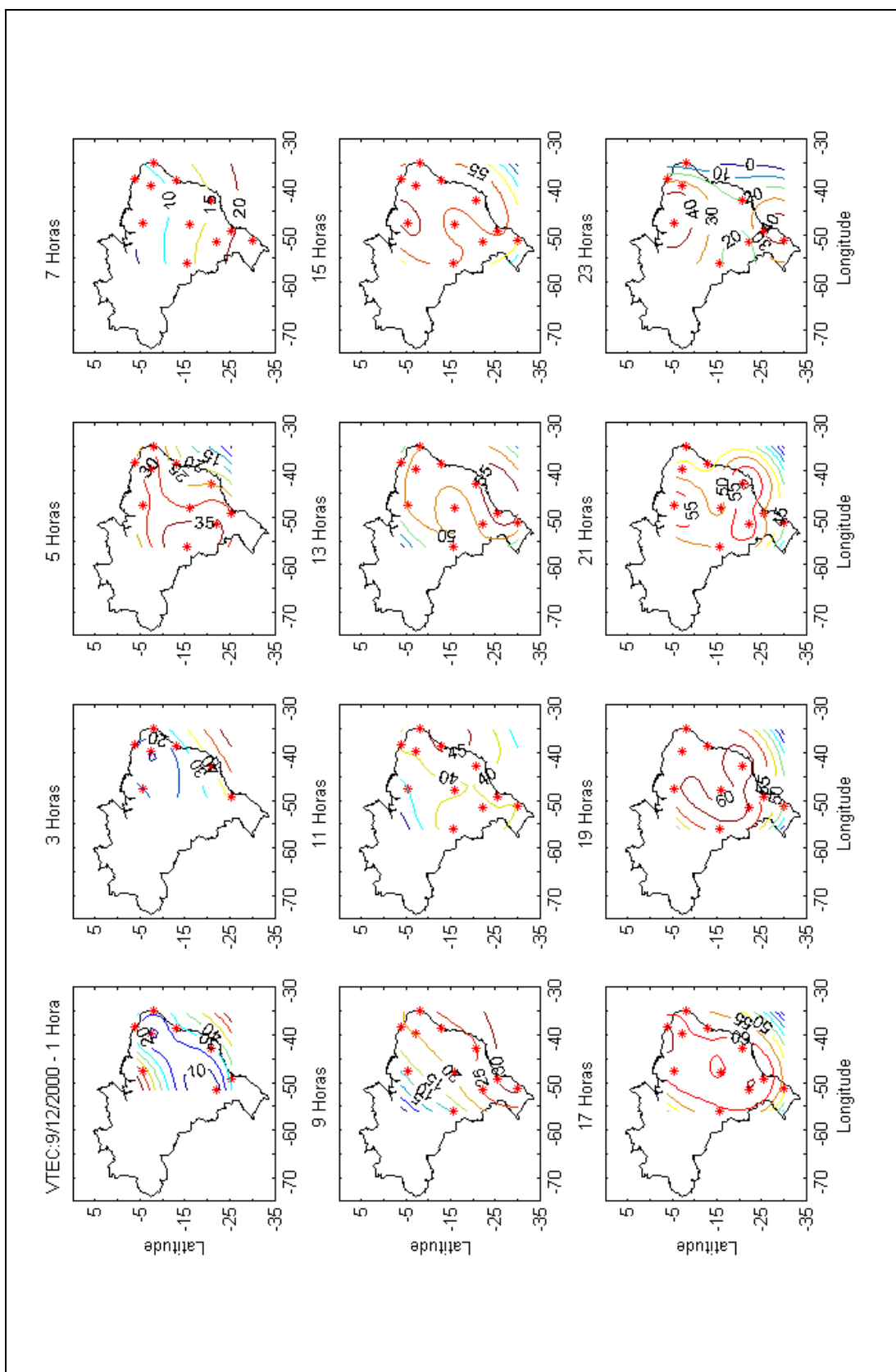


FIGURA 6.25: MAPA DO TEC CALCULADO A CADA 2 HORAS: PRÓXIMO AO SOLSTÍCIO DE VERÃO

### 6.5 Análise da Latitude Geomagnética versus Intensidade do TEC

Foi realizada a transformação das coordenadas geodésicas das estações da RBMC em coordenadas geomagnéticas (época 2001) permitindo assim, a análise da variação do TEC em função da variação da latitude geomagnética. As coordenadas foram transformadas utilizando-se o programa GEO-CGM.FOR desenvolvidos por Tsyganenko et al, 1987 e modificado posteriormente por Gustafsson, et al, 1992. Este programa está disponível na página da internet do NSSDC - National Space Science Data Center. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/cgm/cgm.html> - 2/03/2002).

Ao analisar as coordenadas geomagnéticas das estações da RBMC (Tabela 6.1), verifica-se que todas as estações estão dentro da região tropical (Fig. 3.2), ou seja, dentro da região onde a ionosfera é mais ativa.

TABELA 6.1: COORDENADAS GEOMAGNÉTICAS DAS ESTAÇÕES DA RBMC

<b>Estação</b>	<b>Latitude Geomagnética</b>	<b>Latitude Geodésica</b>	<b>Longitude Geomagnética</b>	<b>Longitude Geodésica</b>
Manaus	6.21	-3.12	13.04	299.94
Fortaleza	-0.15	-3.87	34.86	321.57
Imperatriz	-0.36	-5.50	25.51	312.50
Crato	-1.10	-7.38	32.24	320.33
Recife	-3.56	-8.05	36.28	325.05
Cuiabá	-6.58	-15.55	13.88	303.93
Bom Jesus da Lapa	-8.74	-13.25	26.27	316.58
Brasília	-9.99	-15.94	21.22	312.12
Salvador	-10.18	-13.00	30.99	321.50
Presidente Prudente	-14.26	-22.12	16.42	308.59
Viçosa	-16.47	-20.76	24.24	317.13
Curitiba	-17.97	-25.45	17.54	310.77
Porto Alegre	-21.19	-30.07	15.22	308.88

A seguir são apresentadas cinco figuras (6.26 a 6.30) contendo gráficos das diferenças do TEC médio entre a estação Fortaleza, tomada como estação de referência, e as outras cinco estações distribuídas em diferentes latitudes

geomagnéticas. Os gráficos foram gerados tomando o valor médio do TEC para o período de 5 anos e subtraindo o mesmo dos valores médios mensais (a cada 2 horas) obtendo-se desta forma, os resíduos em relação à média. Posteriormente, foi realizada a diferença entre os resíduos da estação de referência (Fortaleza) e as outras estações para a geração dos gráficos. Todo este procedimento foi realizado utilizando a rotina RBMCtecDIFF desenvolvida para o ambiente Matlab.

Na figura 6.26 observa-se o gráfico das diferenças do TEC médio entre as estações de Fortaleza e Manaus.

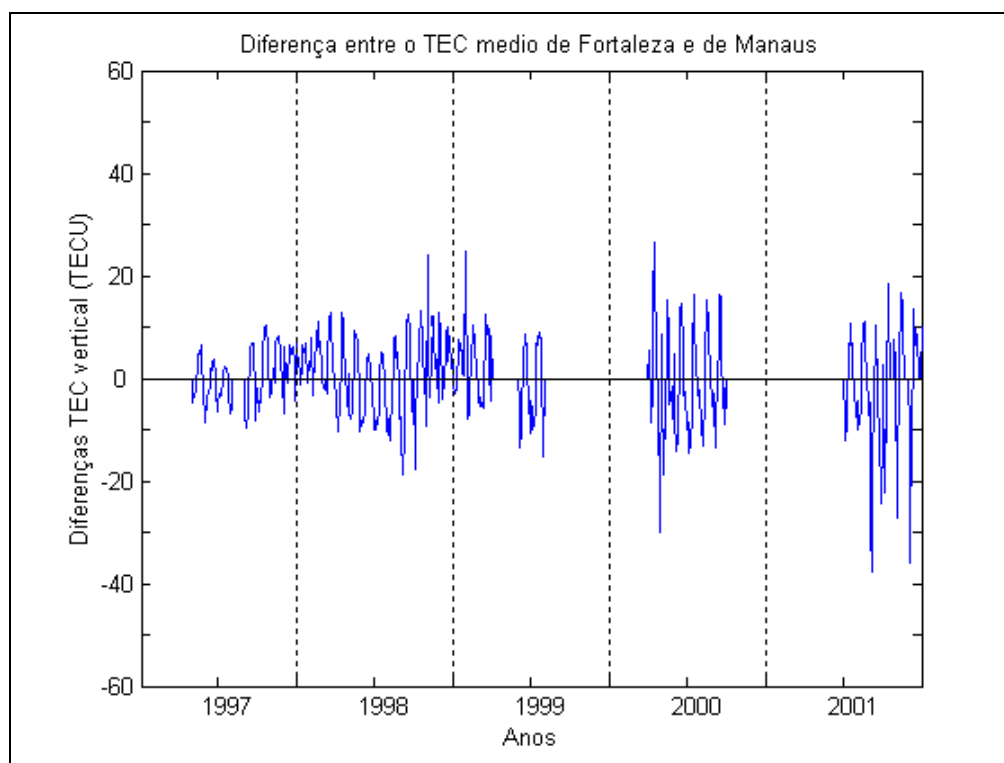


FIGURA 6.26: DIFERENÇAS ENTRE O TEC MÉDIO DE FORTALEZA E DE MANAUS

Já na figura 6.27 está representada através de gráfico a diferença encontrada entre a estação de referência (Fortaleza) e a estação de Bom Jesus da Lapa. Nas figuras de 6.28 a 6.30 observam-se os gráficos de diferenças entre a estação de referência e as estações de Presidente Prudente, Viçosa e de Curitiba, respectivamente.

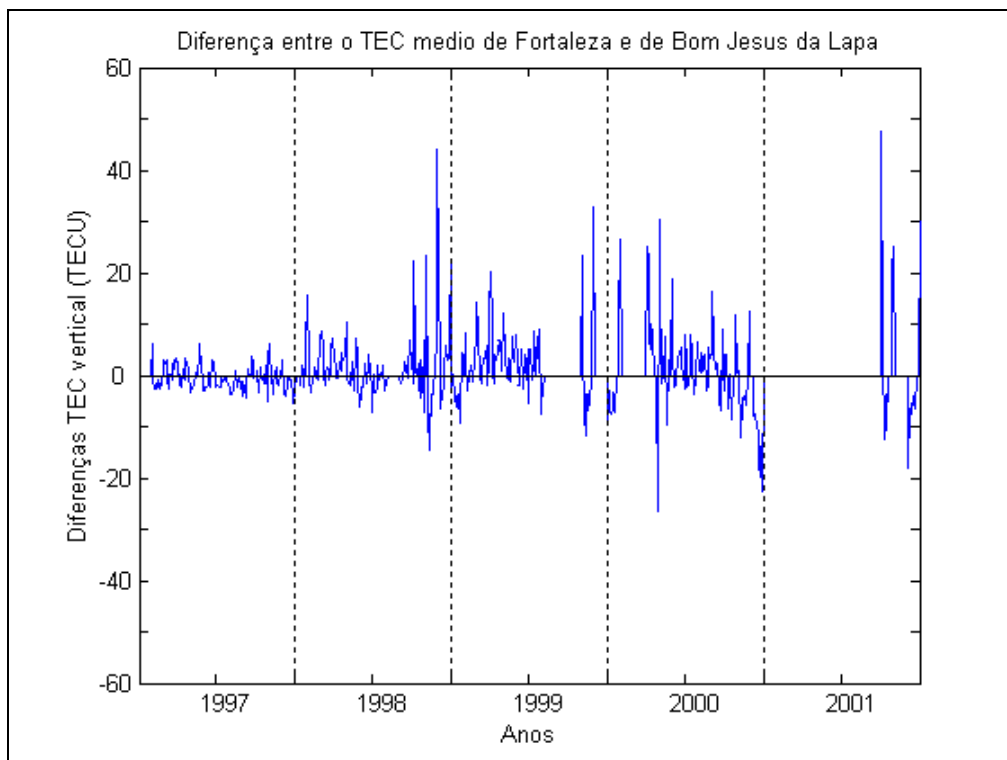


FIGURA 6.27: DIFERENÇAS ENTRE O TEC MÉDIO DE FORTALEZA E DE BOM JESUS DA LAPA

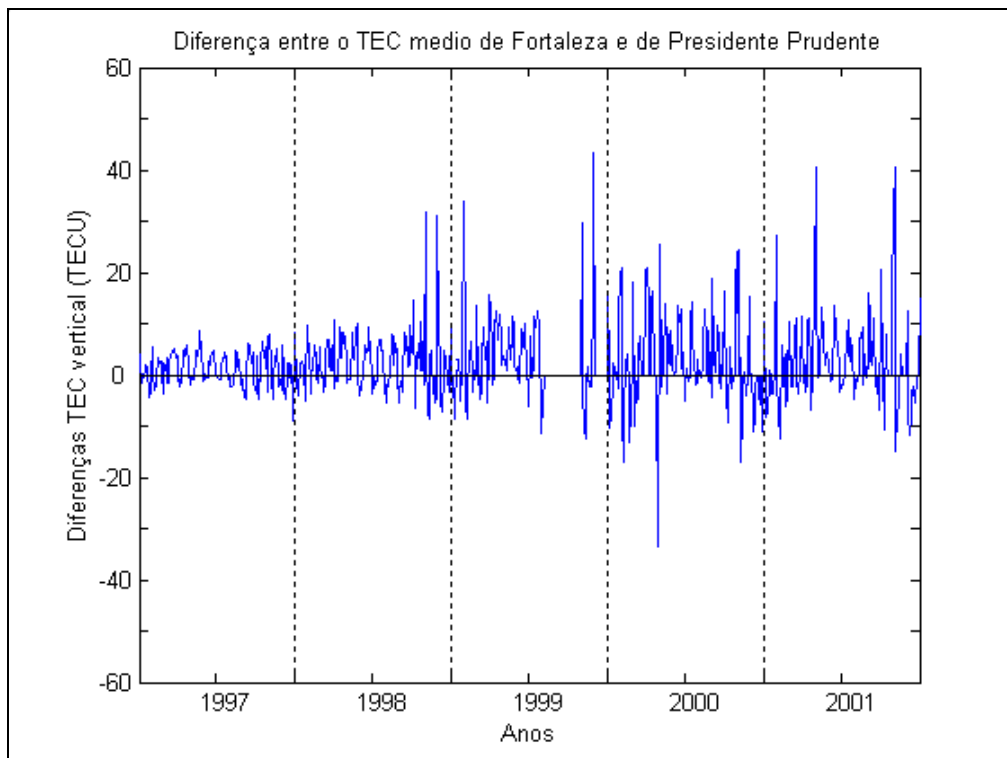


FIGURA 6.28: DIFERENÇAS ENTRE O TEC MÉDIO DE FORTALEZA E DE PRESIDENTE PRUDENTE

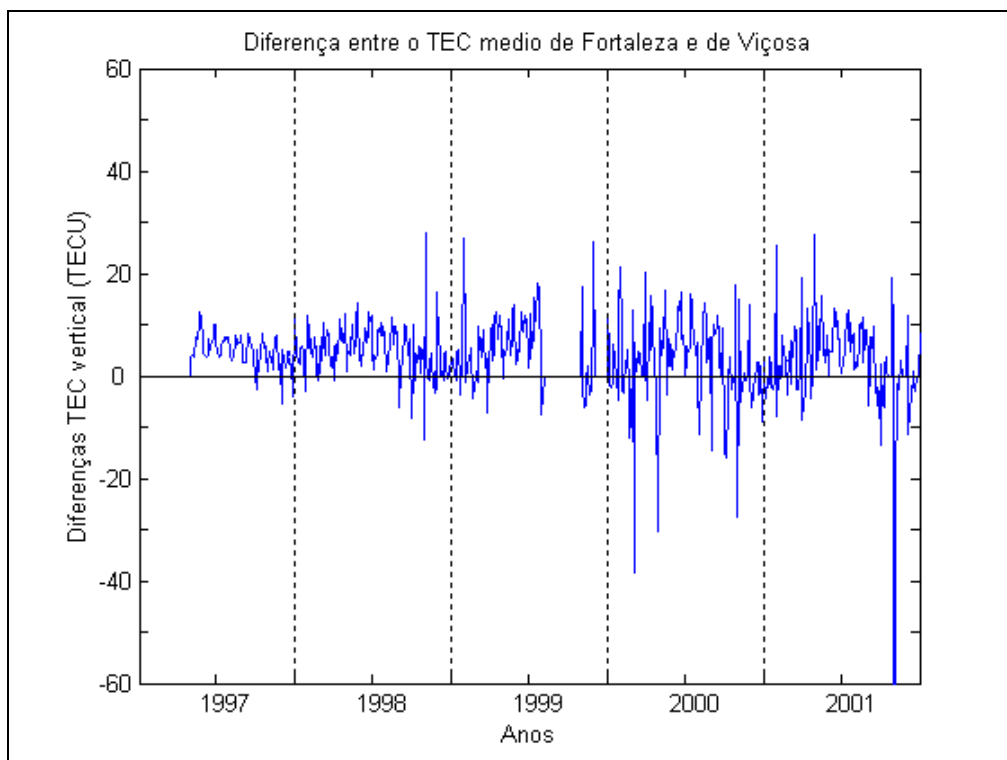


FIGURA 6.29: DIFERENÇAS ENTRE O TEC MÉDIO DE FORTALEZA E DE VIÇOSA

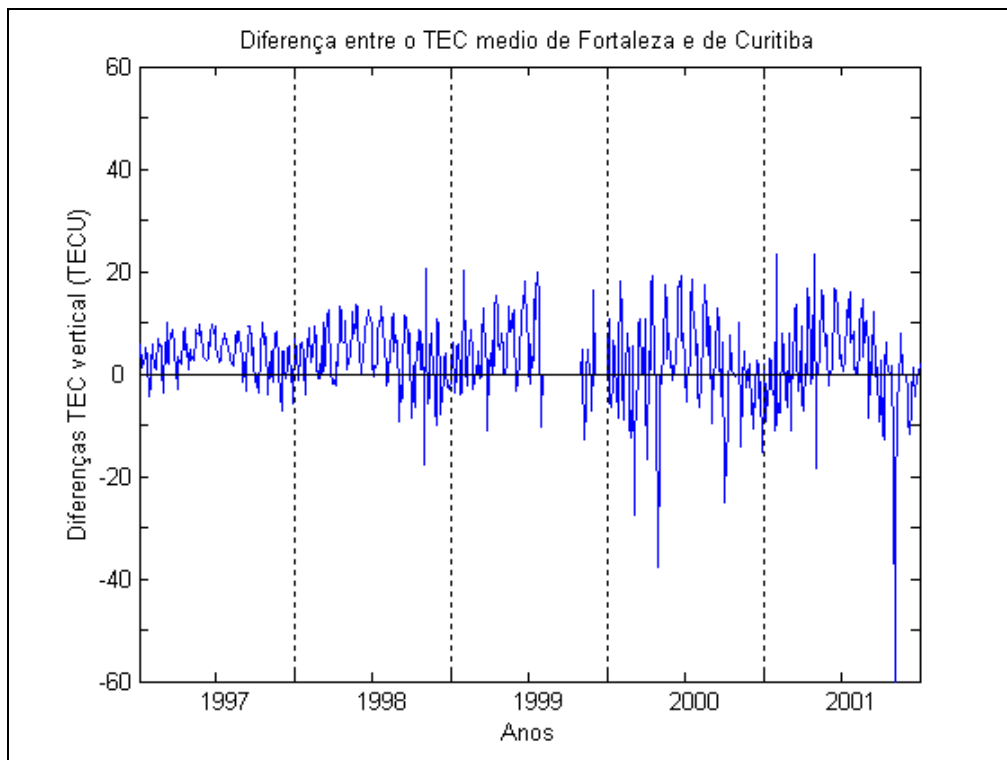


FIGURA 6.30: DIFERENÇAS ENTRE O TEC MÉDIO DE FORTALEZA E DE CURITIBA

Ao analisar as figuras 6.26 a 6.30 constata-se que existe uma dispersão maior dos dados à medida que se aproxima do ápice do ciclo solar do ano de 2001. Verifica-se ainda, que há um pequeno aumento nas diferenças encontradas (figuras 6.27 a 6.30), indicando que à medida em que a latitude geomagnética aumenta o valor do TEC calculado decresce. Esta variação é pequena pois todas as estações analisadas encontram-se dentro da região tropical e, estão sujeitas aos efeitos da Anomalia Equatorial (Anomalia Apbleton) (Hargraves, 1992).

No Brasil, ocorre um fenômeno único no mundo, denominado de SAMA – South Atlantic Magnetic Field Anomaly (Anomalia Magnética do Atlântico Sul). Nesta região a intensidade do campo geomagnético é a mais baixa encontrada na Terra e, seu valor é inferior a 23000 nanoTeslas (nT). A figura 6.31 mostra a posição deste fenômeno, que na época 2000,0 estava sobre a região de Foz do Iguaçu. As curvas isodinâmicas (em vermelho) indicam intensidade total (nT) e as curvas isopóricas (em azul) indicam a variação anual (nT).

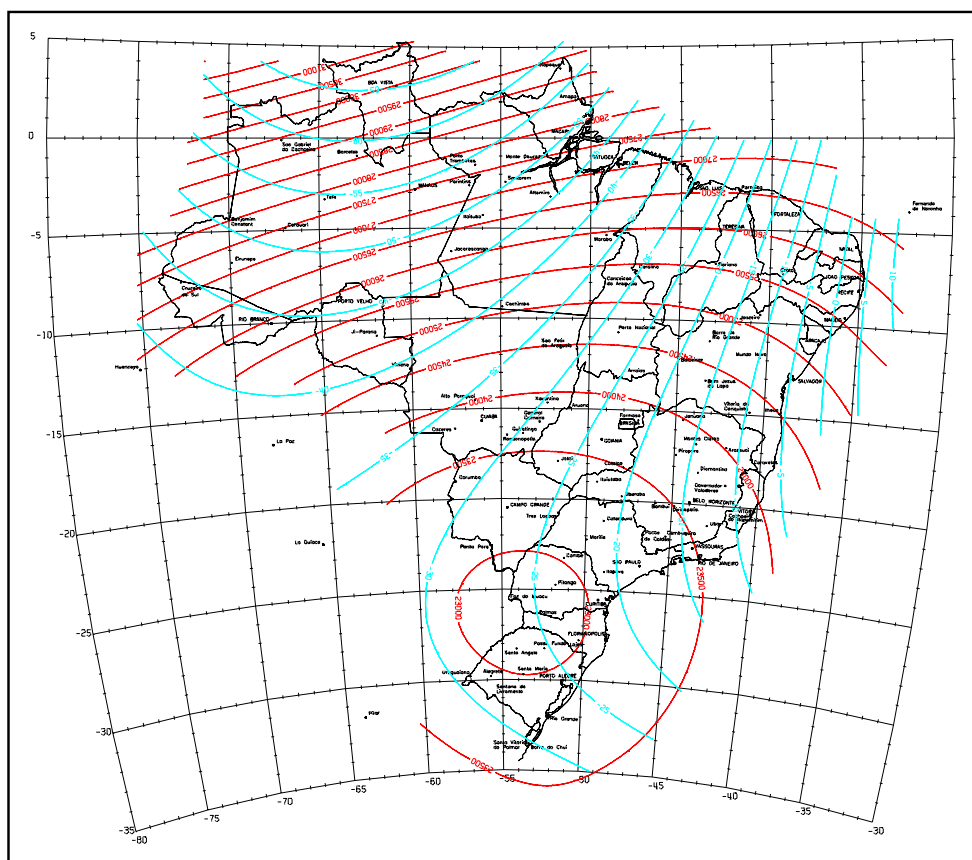


FIGURA 6.31: REPRESENTAÇÃO DA INTENSIDADE DO CAMPO TOTAL  
Fonte: Observatório Nacional - DGE, 2001



Na busca de identificar alguma influência da SAMA nos valores do TEC, foi realizada uma comparação, considerando que as estações de Curitiba e de Presidente Prudente tenham o mesmo afastamento em relação ao centro da anomalia e a estação de Viçosa, tomada como estação de comparação, esteja afastada do centro da anomalia de duas vezes e meia a distância entre Curitiba e o centro da anomalia. Ao analisar visualmente as figuras 6.28 a 6.30, não fica claro nenhuma influência da referida anomalia que provoque aumento no valor nominal do TEC ou seja, não se pode estabelecer uma relação direta entre a anomalia do campo geomagnético e as variações da intensidade do TEC. Uma comparação melhor poderá ser feita se forem colocados receptores na mesma latitude geomagnética porém, em diferentes longitudes.

### **6.6 Análise da Influência das Tempestades Magnéticas sobre os Valores do TEC**

Utilizando o índice Dst, descrito no capítulo 3 deste trabalho, serão apresentados gráficos comparando o referido índice com os valores calculados do TEC. Para tanto, foi realizado o cálculo da média mensal do valor do TEC, com o programa RBMCTECxDST desenvolvido no ambiente Matlab e, posteriormente comparado com os valores diários do TEC. Foram geradas ainda figuras para estações situadas em diferentes latitudes geomagnéticas, para quatro períodos em que ocorreram tempestades magnéticas. Os períodos selecionados foram:

- de 26 a 29 de agosto de 1998;
- de 18 a 23 de outubro de 1998;
- de 20 a 25 de outubro de 1999;
- de 12 a 17 de julho de 2000;
- de 1 a 6 de outubro de 2000.

Para análise das tempestades ocorrida entre 26 e 29 de agosto de 1998 foram utilizados os valores do TEC calculados para as estações de Fortaleza, Brasília, Presidente Prudente, Viçosa e Curitiba, como pode ser observado através das figuras 6.32 a 6.36.

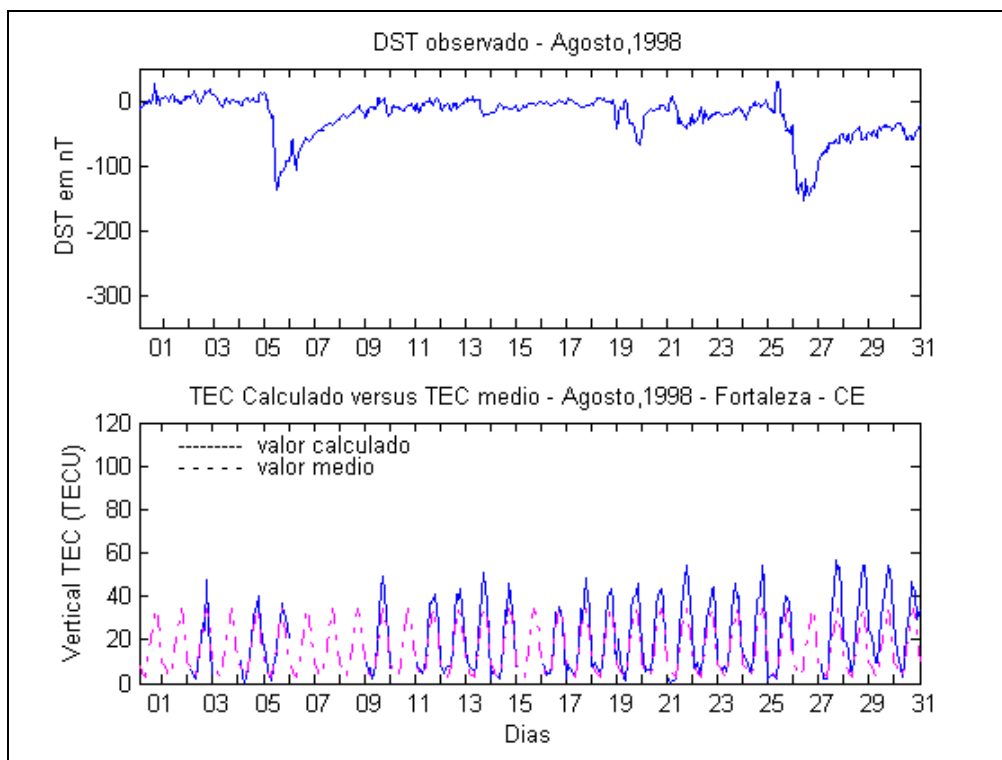


FIGURA 6.32: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM FORTALEZA - 08/98

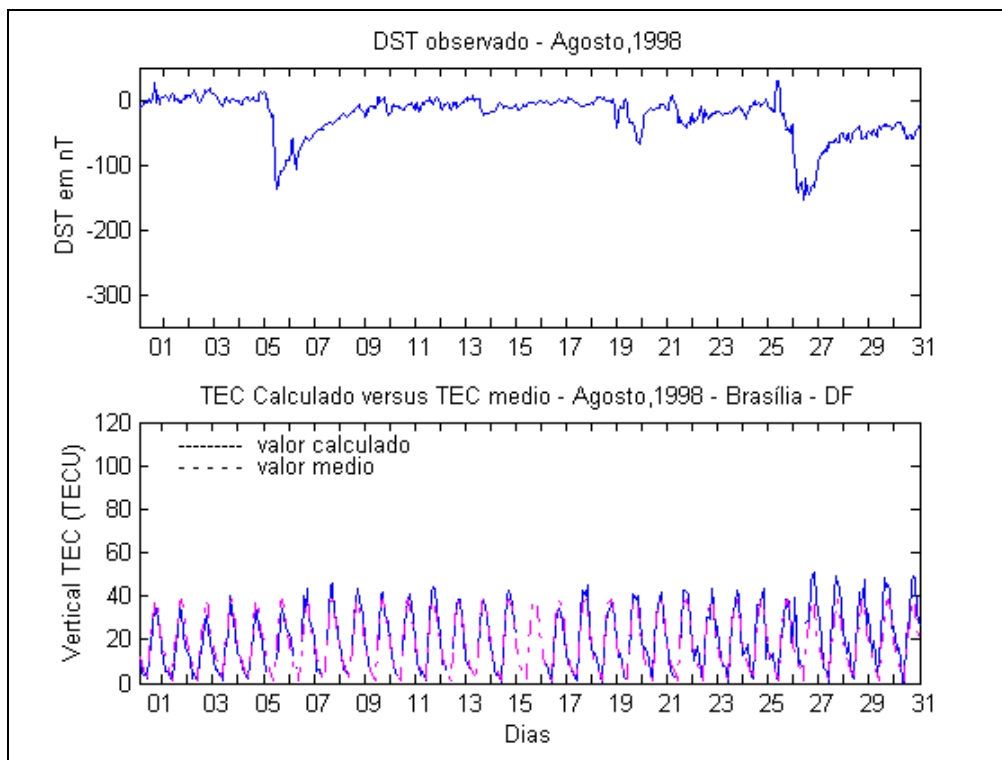


FIGURA 6.33: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM BRASÍLIA - 08/98

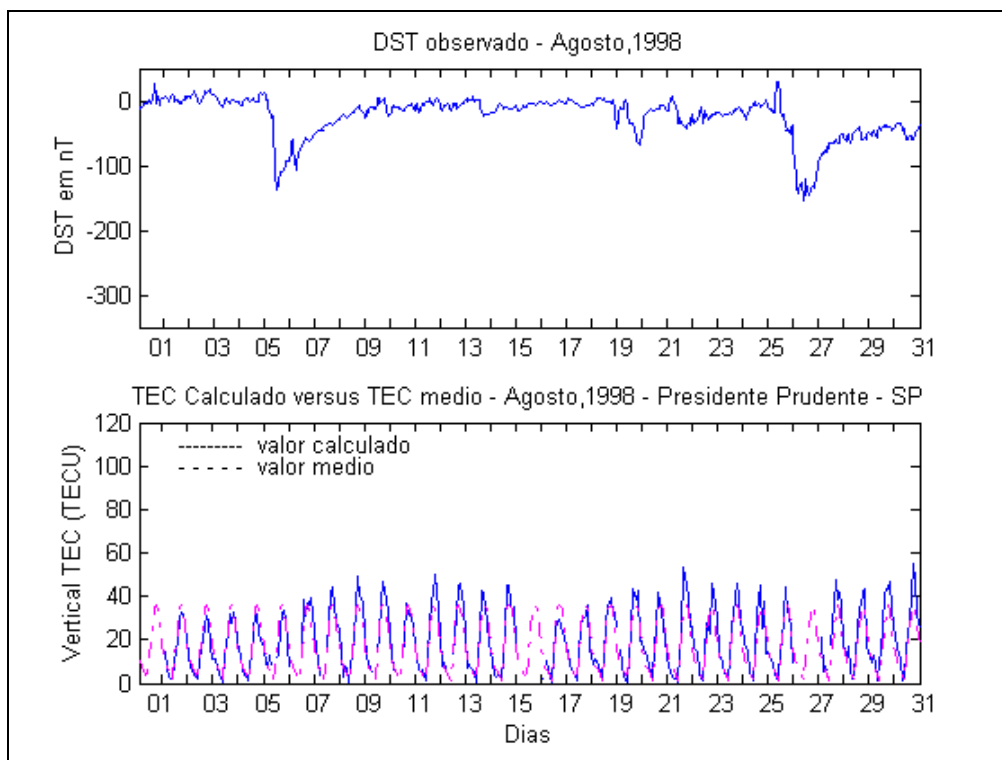


FIGURA 6.34: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM PRES. PRUDENTE - 08/98

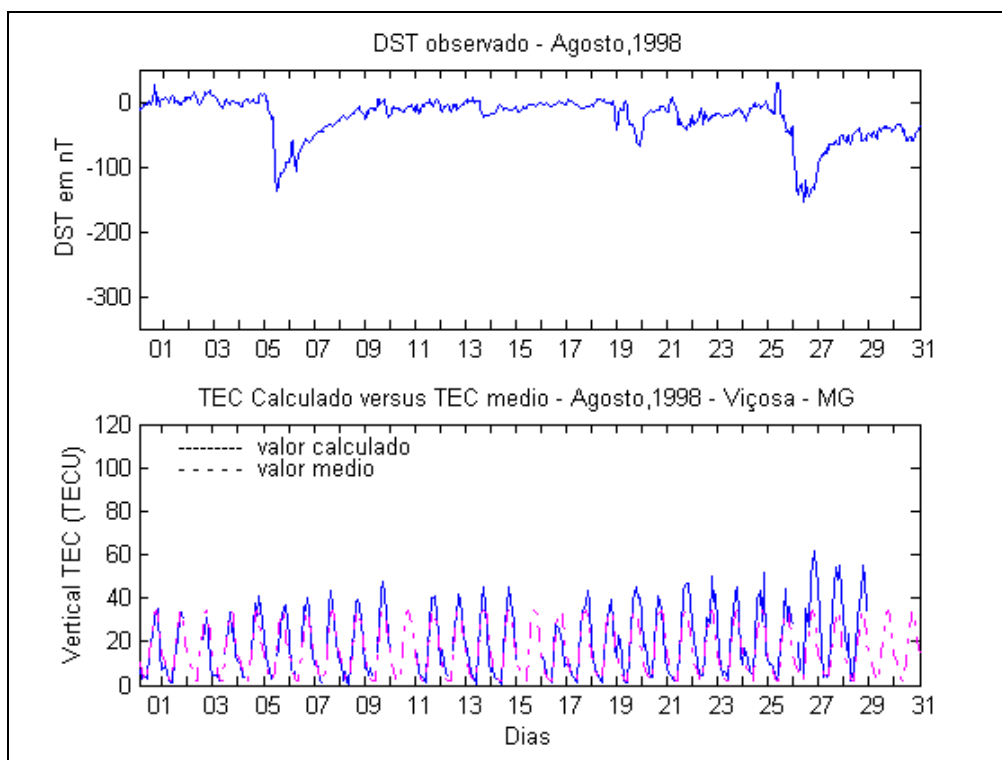


FIGURA 6.35: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM VIÇOSA - 08/98

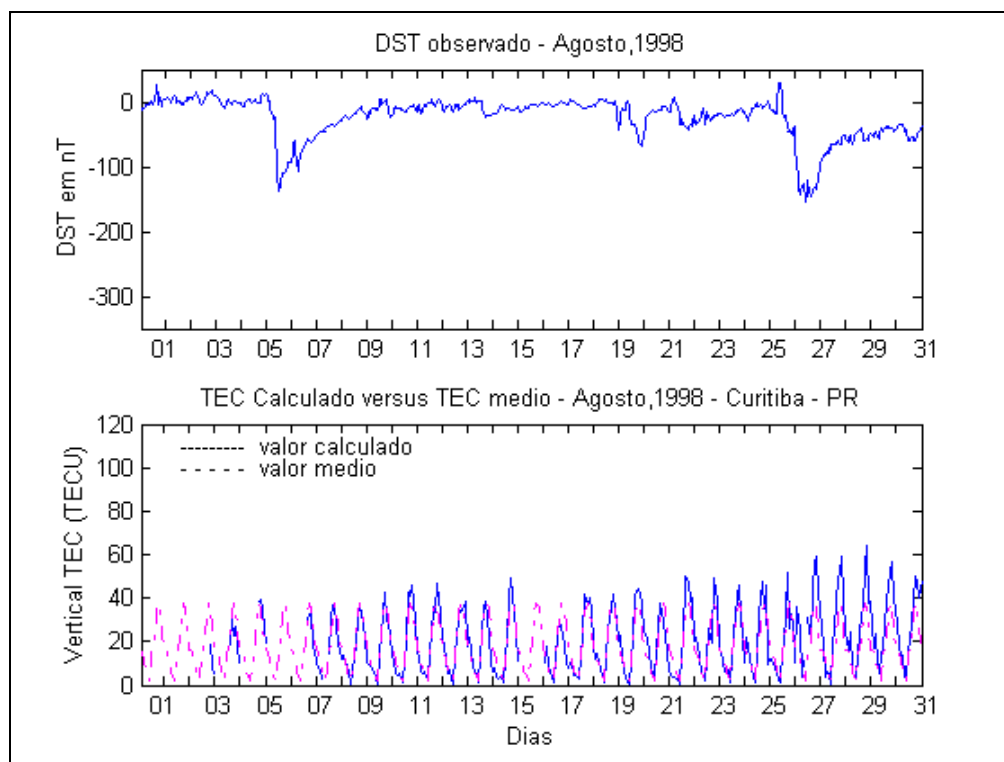


FIGURA 6.36: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM CURITIBA - 08/98

A partir da análise das figuras de 6.32 a 6.36, para uma tempestade magnética considerada de extrema intensidade ( $Dst < -120$  nT), verifica-se que o evento foi detectado em todas as estações analisadas. Em algumas estações houve um aumento do valor do TEC ou uma variação brusca de sua intensidade, em outras o receptor perdeu a sintonia com os satélites não permitindo a avaliação do valor do TEC no momento de ocorrência do evento porém, indicando claramente uma variação intensa do TEC devido à tempestade.

Já para análise da tempestade ocorrida entre 18 e 23 de outubro de 1998 foram utilizados os valores do TEC calculados para as mesmas estações da análise anterior, conforme mostram as figuras 6.37 a 6.41.

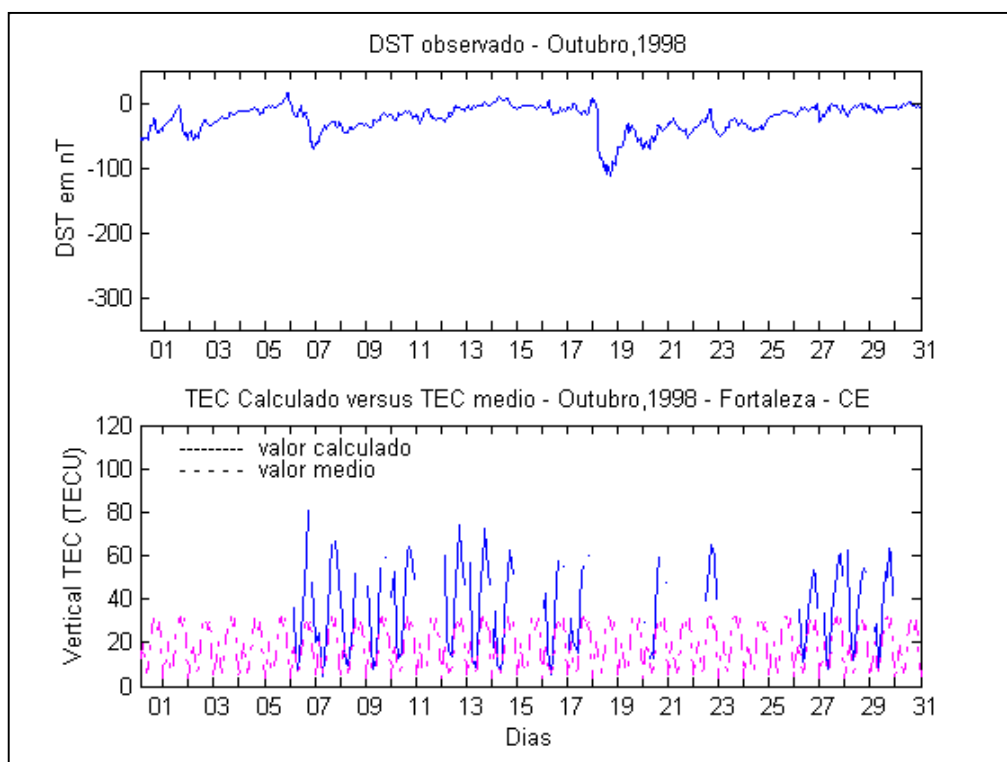


FIGURA 6.37: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM FORTALEZA - 10/98

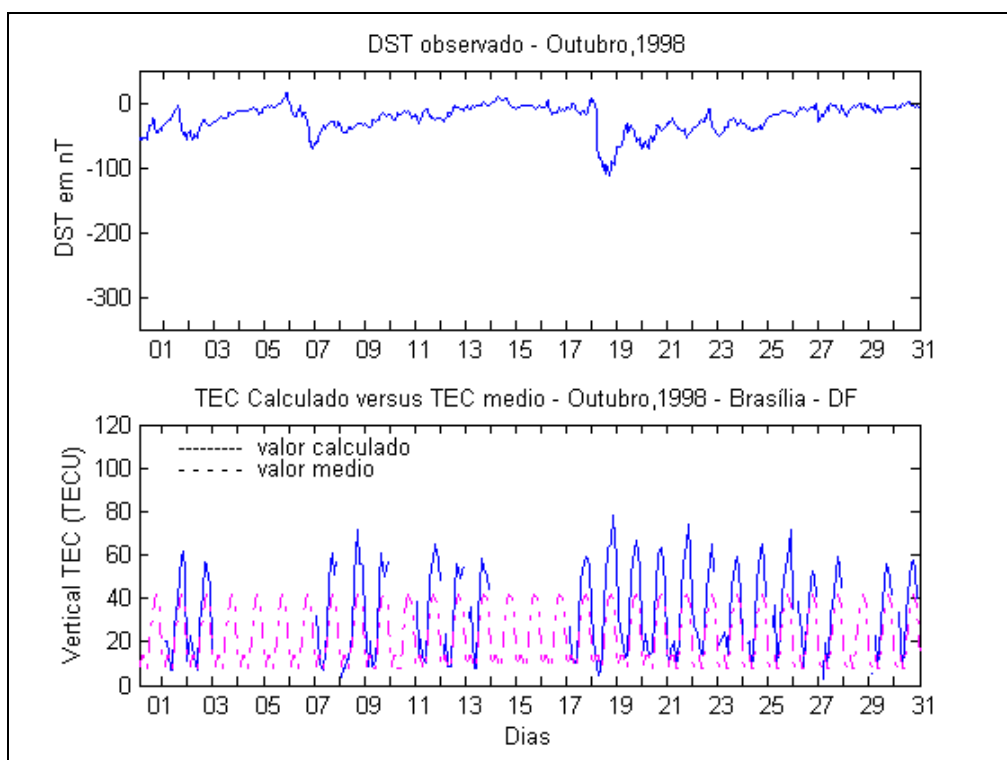


FIGURA 6.38: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM BRASÍLIA - 10/98

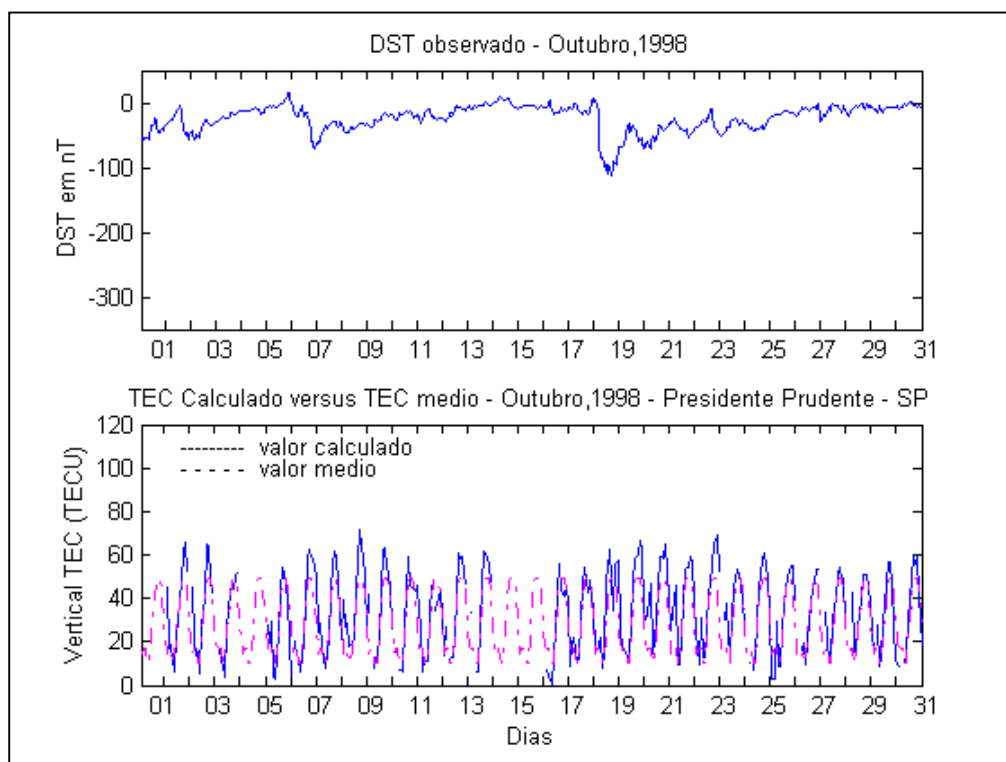


FIGURA 6.39: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM PRESIDENTE PRUDENTE - 10/98

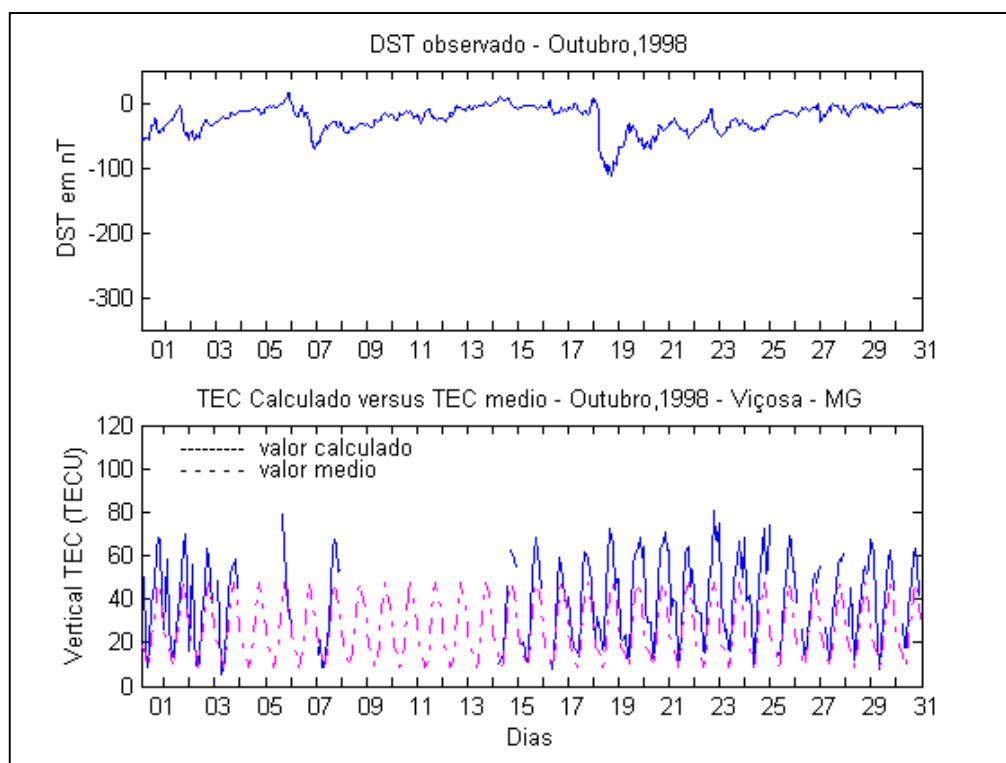


FIGURA 6.40: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM VIÇOSA - 10/98

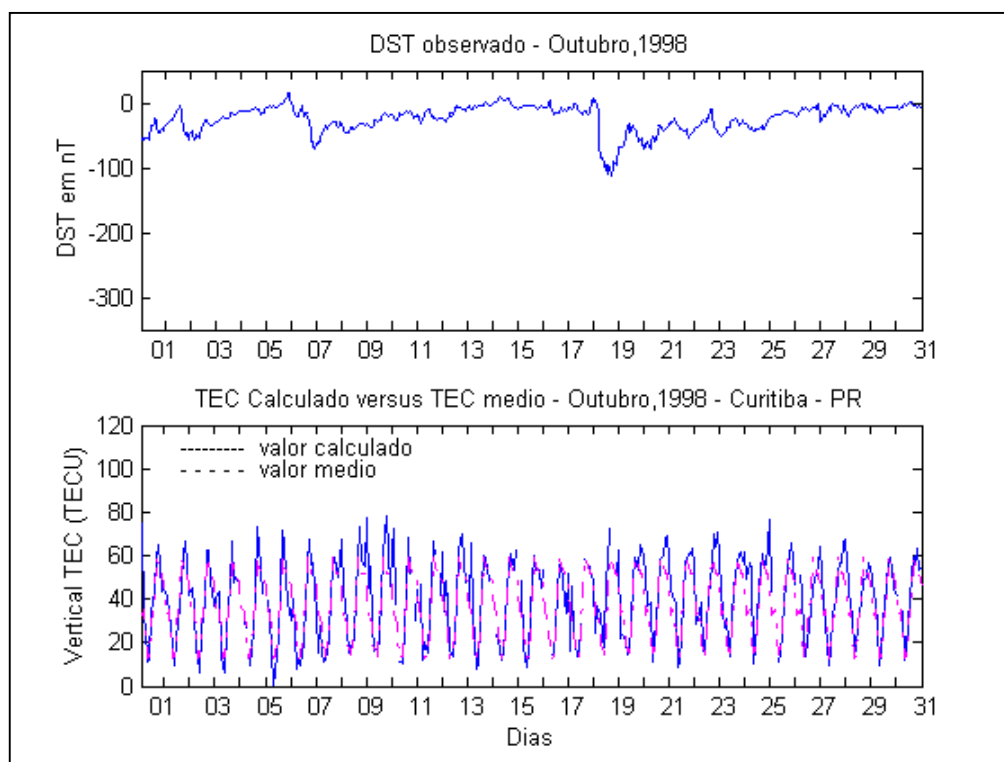


FIGURA 6.41: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM CURITIBA - 10/98

Ao analisar as figuras de 6.37 a 6.41, para uma tempestade magnética considerada de alta intensidade ( $-50 \text{ nt} > \text{Dst} > -100 \text{ nT}$ ), verifica-se que não foi possível detectar o evento em Fortaleza (Fig. 6.37), pois a referida estação não estava operacional. Para as demais estações observa-se que na estação de Brasília (Fig. 6.38) o maior valor do TEC ocorreu justamente durante a tempestade. Já, nas demais estações observam-se que a tempestade sob análise foi detectada.

As estações Brasília (Fig. 6.42), Presidente Prudente (Fig. 6.43), Viçosa (Fig. 6.44) e Curitiba (Fig. 6.45) foram utilizadas para a análise da tempestade ocorrida entre 20 e 25 de outubro de 1999.

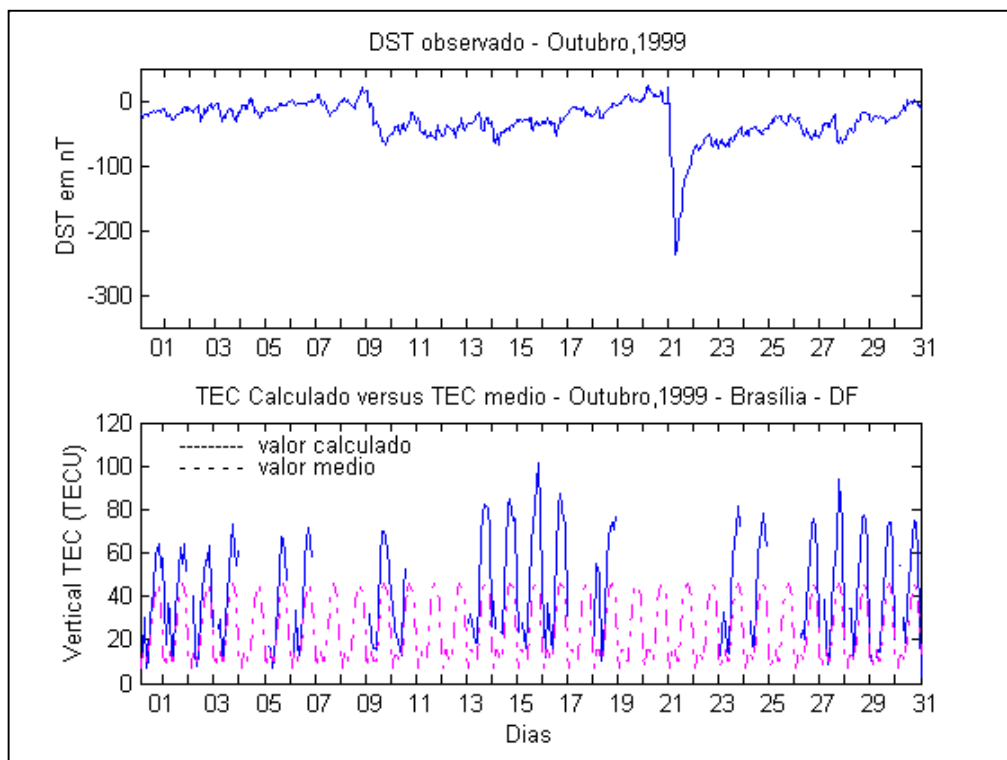


FIGURA 6.42: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM BRASÍLIA - 10/99

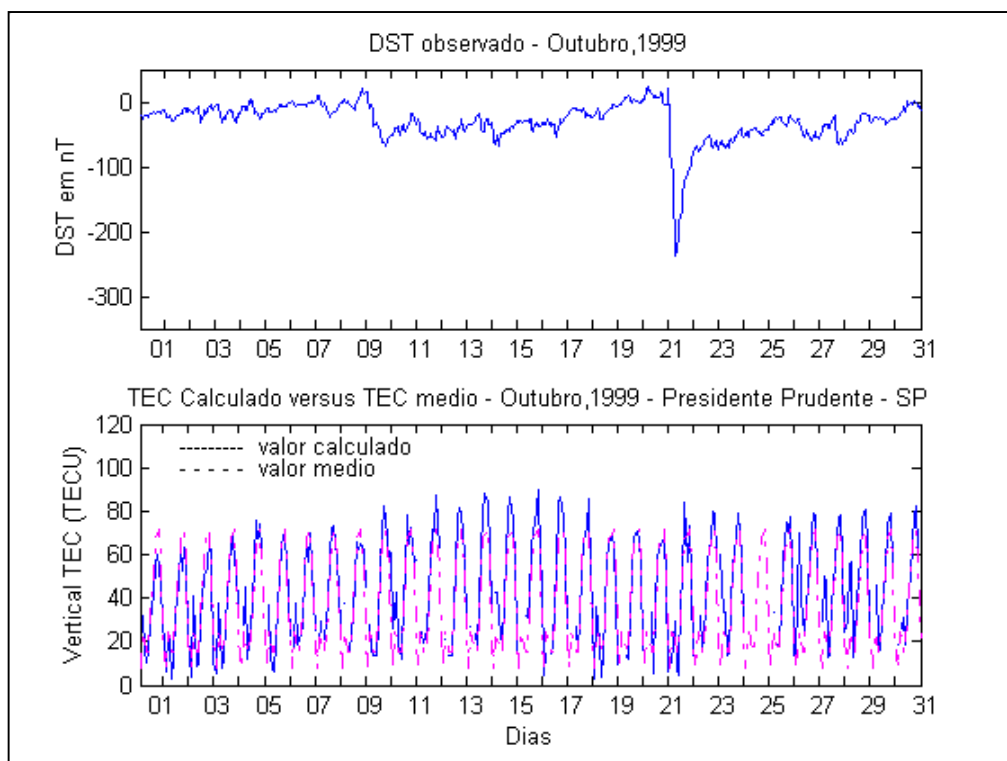


FIGURA 6.43: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM PRESIDENTE PRUDENTE - 10/99



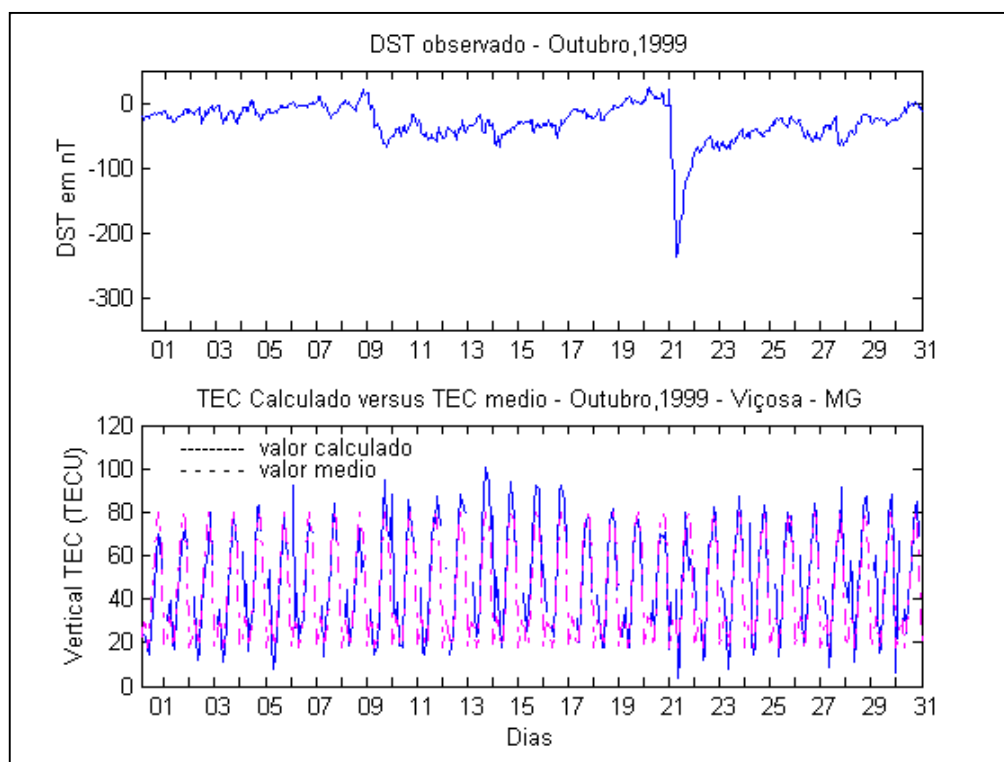


FIGURA 6.44: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM VIÇOSA - 10/99

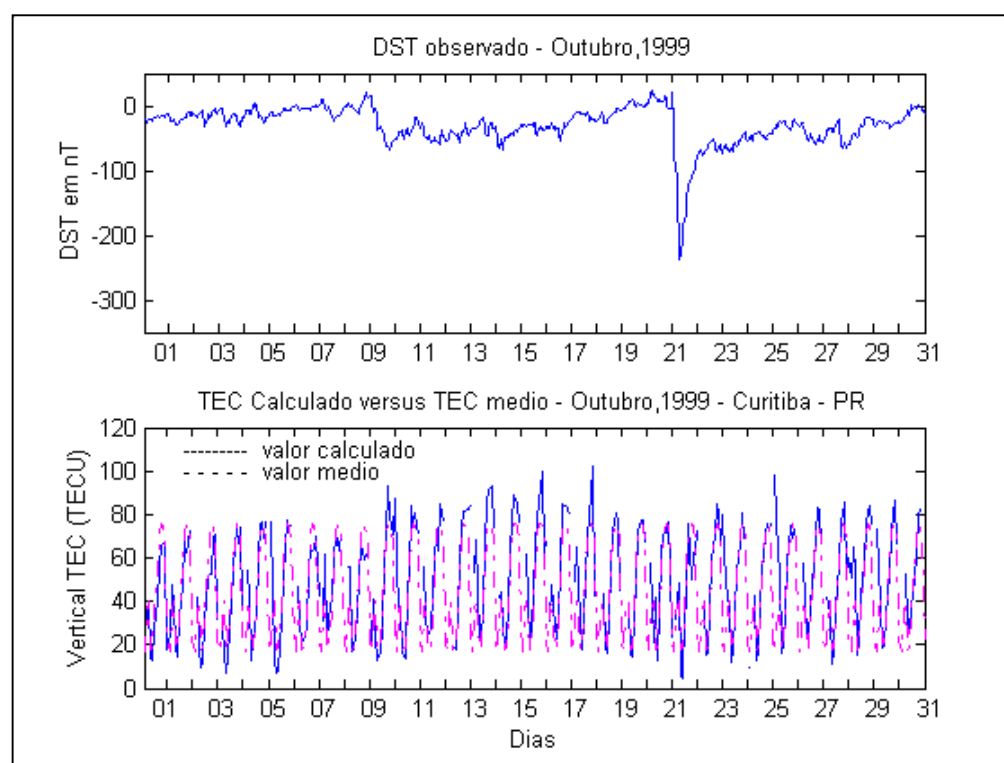


FIGURA 6.45: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM CURITIBA - 10/99

Na análise dessas figuras, para uma tempestade magnética considerada de extrema intensidade ( $Dst < -200$  nT), verifica-se que o evento foi detectado em todas as estações.

Para as tempestades ocorridas entre 12 e 17 de julho de 2000 foram utilizadas as informações oriundas das estações de Fortaleza, Brasília, Presidente Prudente, Viçosa e Curitiba, como mostram as figuras a seguir.

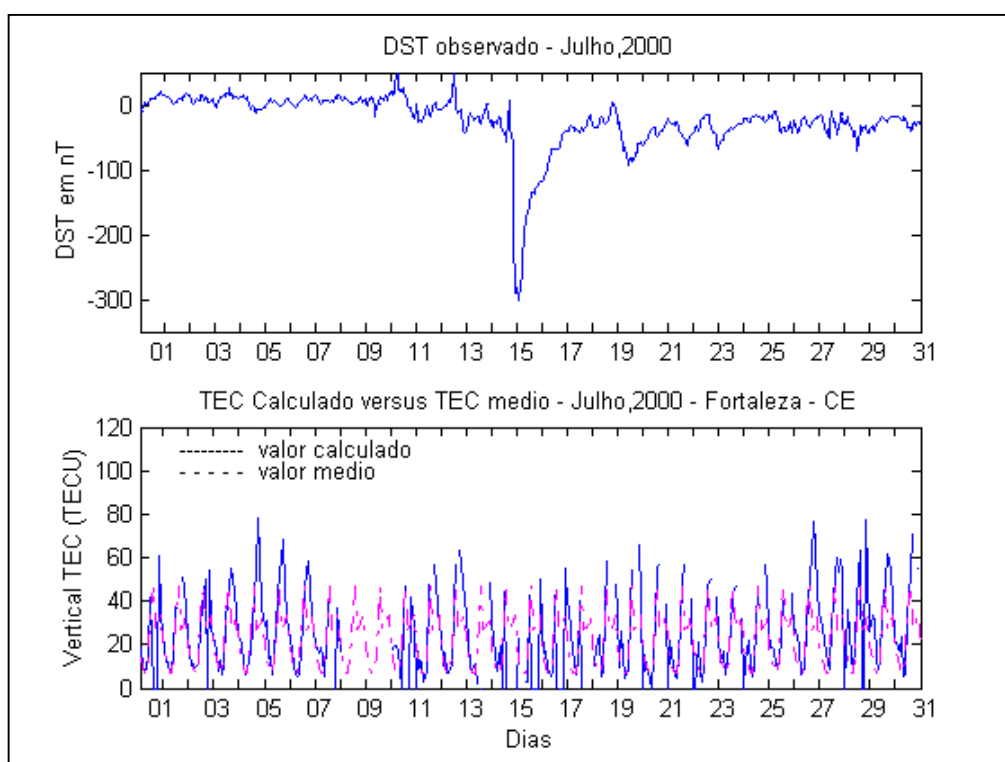


FIGURA 6.46: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM FORTALEZA - 07/00

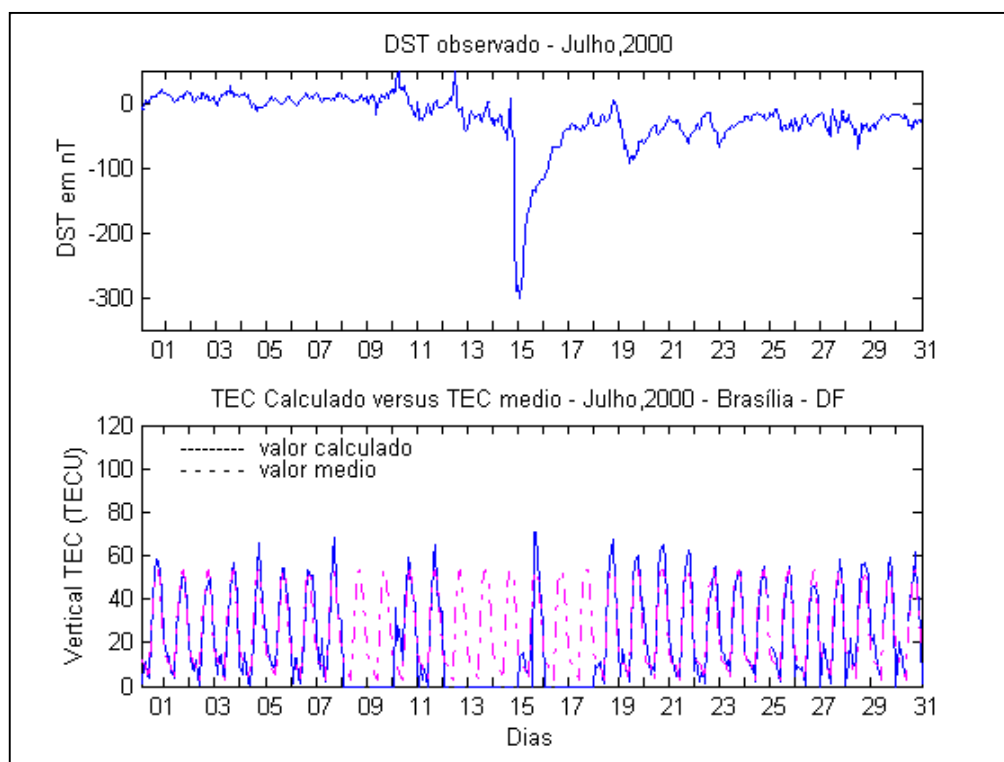


FIGURA 6.47: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM BRASÍLIA – 07/00

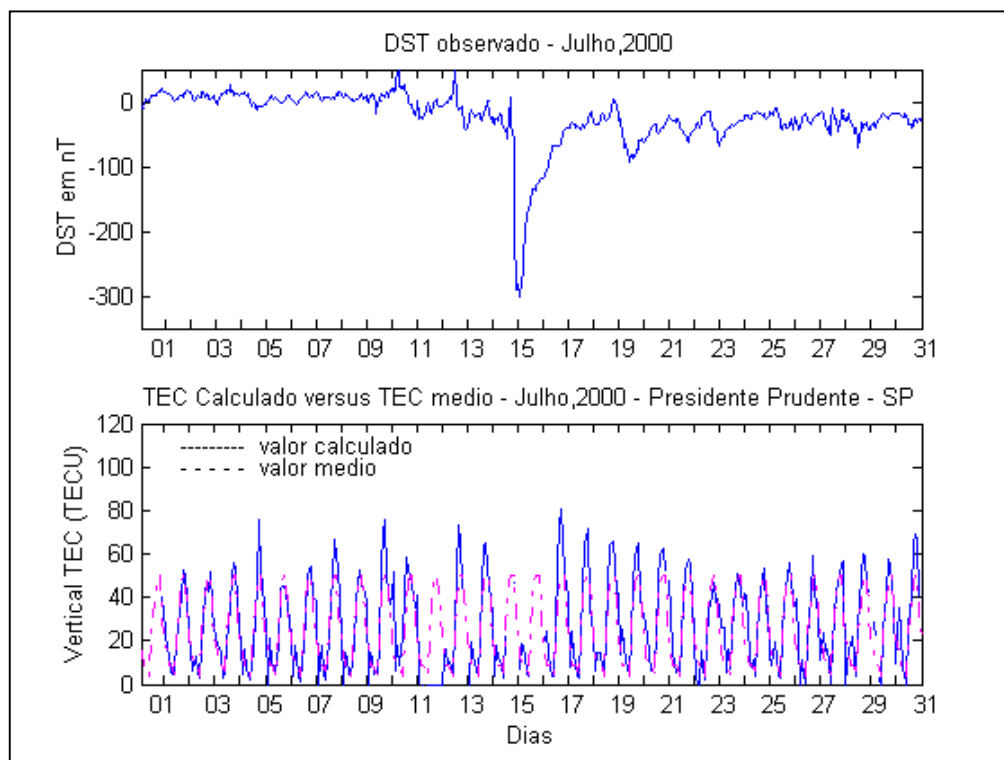


FIGURA 6.48: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM PRESIDENTE PRUDENTE – 07/00

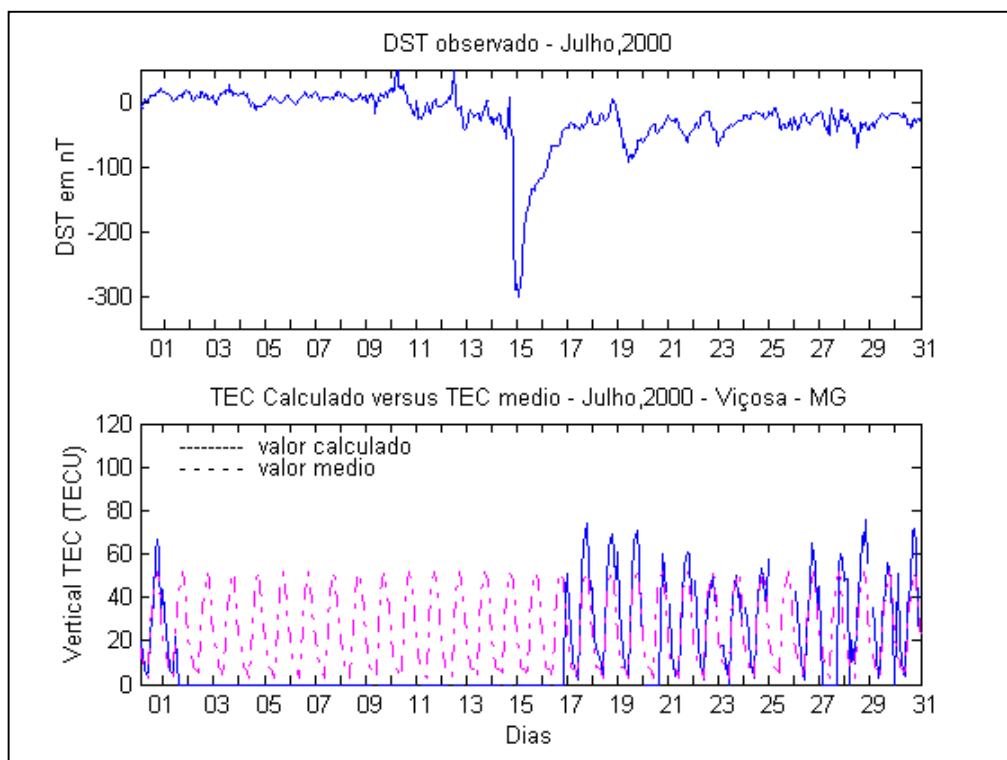


FIGURA 6.49: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM VIÇOSA – 07/00

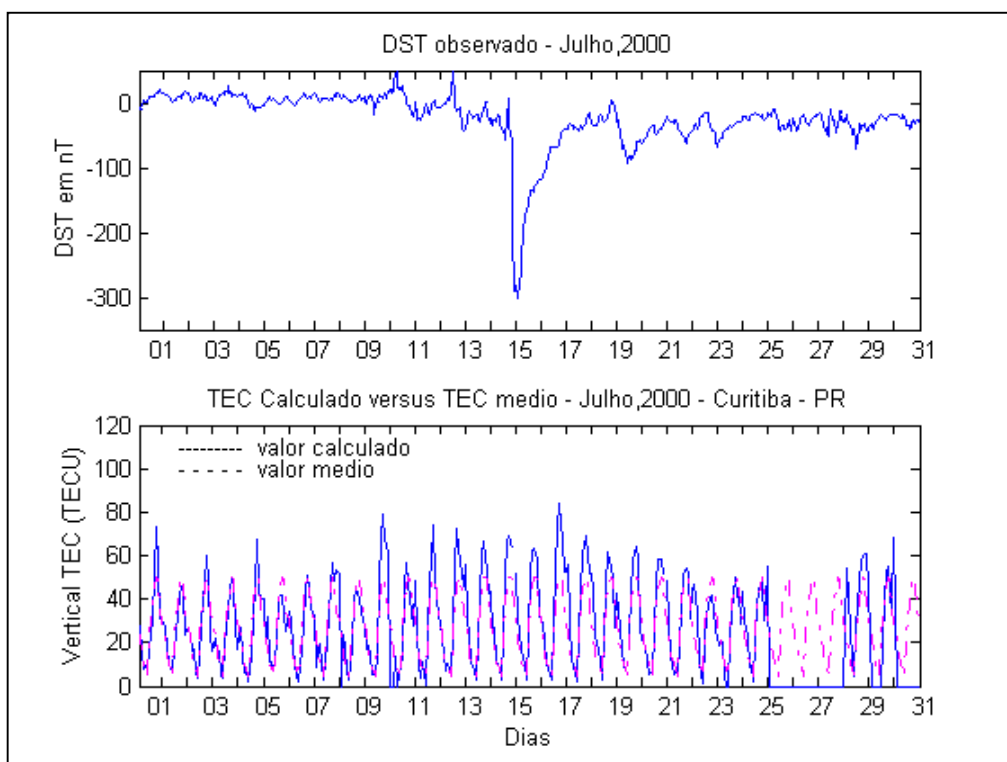


FIGURA 6.50: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM CURITIBA – 07/00

Na análise das figuras de 6.46 a 6.50, para uma tempestade magnética considerada de extrema intensidade ( $Dst < -300$  nT), observa-se que o evento afetou todas as estações provocando a perda de sintonia e, conseqüentemente não foi possível realizar o cálculo do TEC.

Já para a tempestade ocorrida entre 1 e 6 de outubro de 2000 foram utilizadas as informações oriundas das mesmas estações utilizadas para o evento ocorrido em julho do mesmo ano, como pode ser observado através das figuras 6.51 a 6.55.

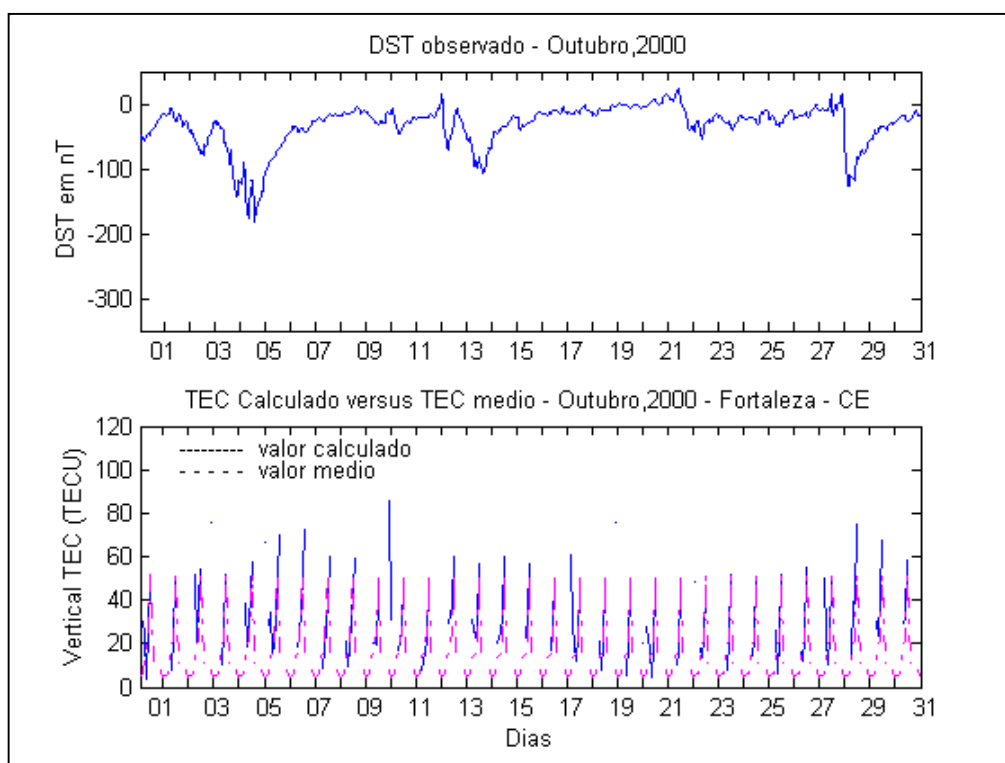


FIGURA 6.51: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM FORTALEZA – 10/00

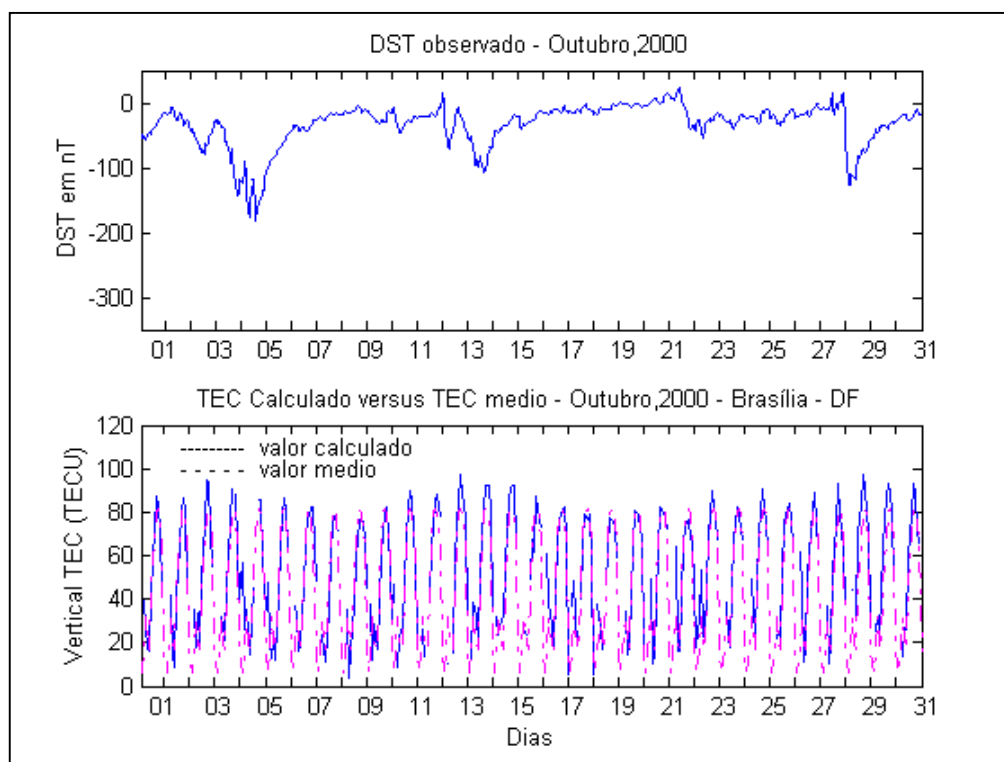


FIGURA 6.52: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM BRASÍLIA – 10/00

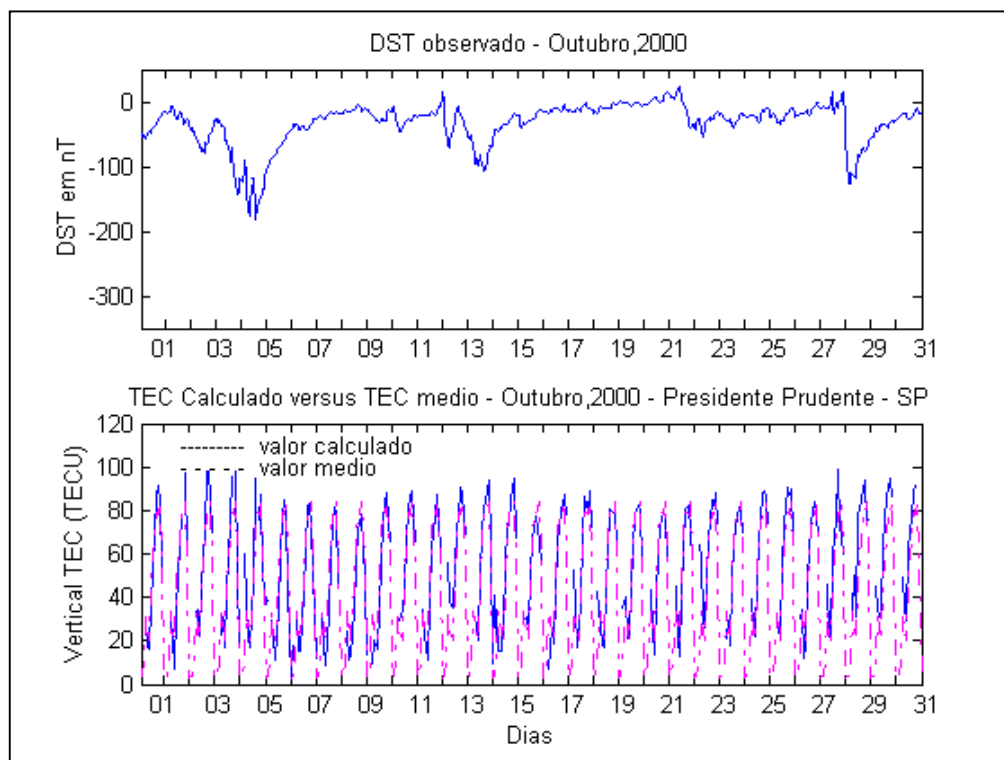


FIGURA 6.53: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM PRESIDENTE PRUDENTE – 10/00

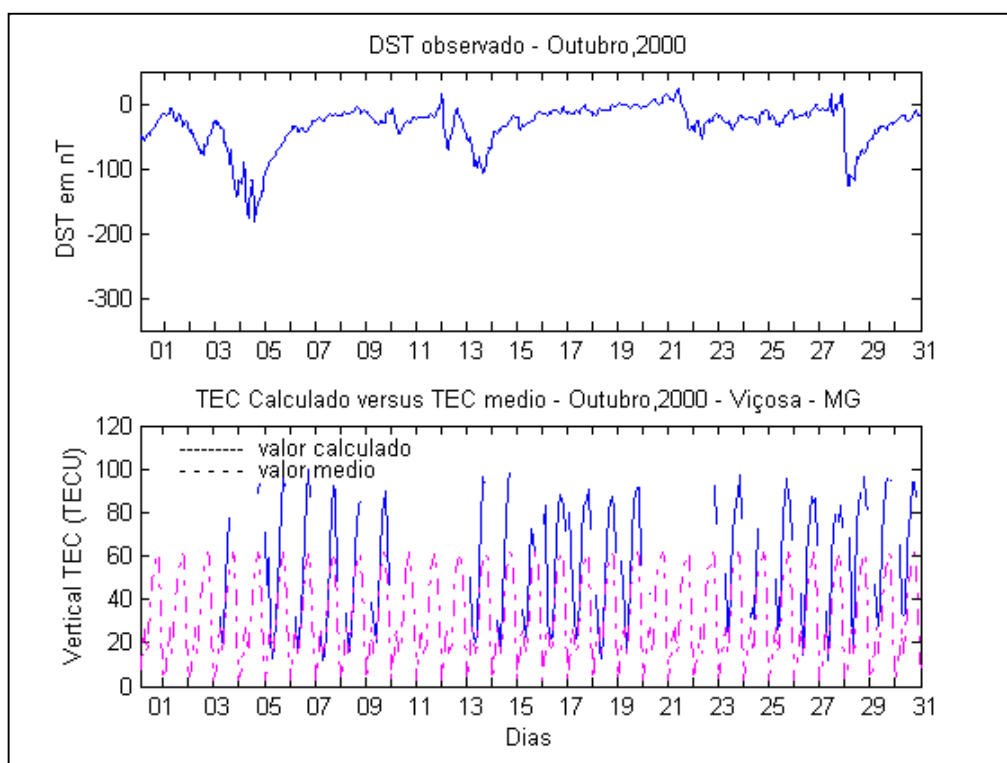


FIGURA 6.54: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM VIÇOSA – 10/00

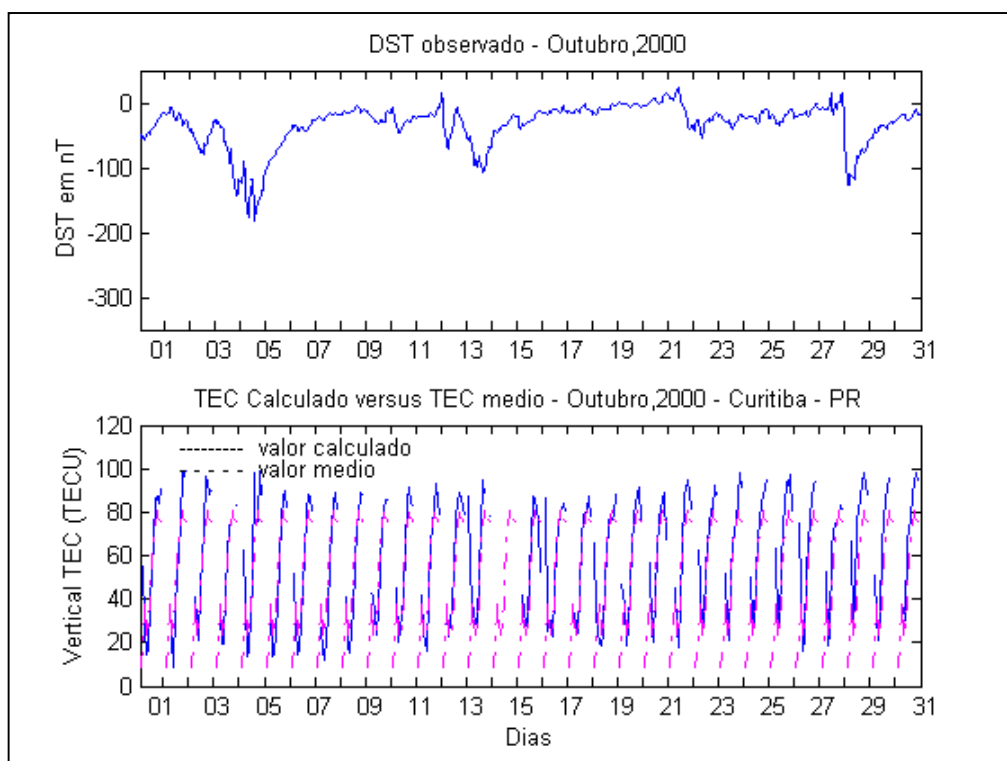


FIGURA 6.55: COMPARAÇÃO ENTRE TEC E Dst EM CURITIBA – 10/00

Analisando essas figuras verifica-se que não foi possível uma análise concreta da correlação entre o índice Dst e o TEC para o período considerado. Este fato ocorreu pois, coincidiu com o período em que o ciclo solar alcançou o máximo, fazendo com que a atividade ionosférica fosse muito ativa durante todo o tempo. Além disso, a intensa atividade ionosférica e a ocorrência de tempestades magnéticas de alta e de extrema intensidade durante o mês em análise, tiveram papel importante na perda de sintonia do receptor o que provocou a perda de dados e, conseqüentemente, impossibilitou o cálculo do TEC nos intervalos previstos.

De qualquer forma a análise realizada indica que é possível detectar tempestades magnéticas através das variações do TEC.



## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foi realizada uma revisão dos efeitos provocados pela ionosfera sobre as observáveis do sistema GPS. Tais efeitos reduzem a acurácia posicional para todos os usuários do sistema, notadamente aqueles que utilizam receptores de apenas uma frequência. Na tentativa de eliminar ou minimizar tais efeitos, diversos modelos foram desenvolvidos e aprimorados. Porém, no Brasil a ionosfera é muito ativa, tornando-se extremamente difícil a previsão do seu comportamento. Desta forma, os diferentes modelos não conseguem eliminar mais do que 80% do seu efeito. Para que esses modelos possam evoluir, faz-se necessário o conhecimento mais detalhado do que ocorre na ionosfera nas zonas de baixa latitude, região em que o Brasil está inserido. Com este propósito, esta pesquisa determinou, pela primeira vez no Brasil, através do uso das observáveis GPS nas frequências L1 e L2 o conteúdo total de elétrons (TEC) para cada uma das estações da RBMC. A determinação do TEC abrangeu cinco anos de observações GPS que remontam ao ano de 1997, início de operação da RBMC, dando início a uma série histórica dos efeitos da ionosfera para o Brasil. Estes dados podem contribuir para um melhor conhecimento da ionosfera o que permitirá aprimorar os modelos existentes, ou mesmo o desenvolvimento de novos modelos que se adequem à região equatorial.

### 7.1 Conclusões

Em termos de longos períodos, o conteúdo total de elétrons mostrou-se, dentro do período avaliado diretamente correlacionado com a atividade solar.

O comportamento anual do TEC indica dois períodos em que o seu valor é máximo, abrangendo os meses de março e abril e de setembro e outubro, coincidindo com o Equinócio de outono e o Equinócio de primavera, respectivamente. Verifica-se que há a ocorrência de um período onde o valor do TEC é mínimo nos meses de junho e julho, ou seja, durante o Solstício de inverno. Deve-se observar ainda que tais eventos ocorreram em todos os anos analisados indicando que suas ocorrências independem do período de 11 anos, que define o ciclo solar. Os valores médios do TEC apresentam uma maior dispersão no período noturno, se comparado ao período diurno. Esta dispersão deve ter como causa variações rápidas do conteúdo total de

elétrons na ionosfera possivelmente devido à cintilação (ver item 3.3), fenômeno que provoca grandes variações na densidade de elétrons e que torna-se detectável quando não há a incidência de raios solares.

Na análise espectral realizada observa-se a existência de três ocorrências distintas: a primeira indica um ciclo com periodicidade anual, correlacionada ao movimento de translação terrestre em torno do Sol; a segunda indica uma periodicidade semestral, que está correlacionada com o hemisfério terrestre que recebe a maior parte da radiação emitida pelo Sol e a última ocorrência, com ciclo médio de 120 dias, está relacionada com as quatro estações do ano.

Os dados diários, mostraram que o aumento do TEC acompanha a trajetória solar e o seu máximo ocorre por volta das 14 horas (hora local). Há também, a ocorrência de um segundo pico, que ocorre por volta das 22 horas (hora local) e está, em geral, associado à cintilação. Este segundo pico alcança valores máximos menores do que os valores máximos do pico diurno.

Os mapas de isolinhas do TEC ficaram prejudicados pois o país não conta com uma distribuição adequada de estações de monitoramento. De qualquer forma, tais mapas poderão auxiliar os usuários na tomada de decisão sobre qual o melhor momento de realizar um levantamento de dados com o uso de receptores de sinais do sistema GPS.

Verifica-se que há um pequeno decréscimo nos valores do TEC à medida em que a latitude geomagnética cresce (estações estão posicionadas mais distantes do equador geomagnético).

É necessário um estudo mais detalhado para verificar se a anomalia magnética do Atlântico Sul interage com a ionosfera provocando alterações nos valores do TEC.

As tempestades magnéticas provocam um aumento dos valores de TEC ou até mesmo a perda de sintonia dos receptores, apontando para a possibilidade do sistema GPS poder ser utilizado para a detecção de tais eventos.

O programa Bernese mostrou ser uma ferramenta bastante adequada para o cálculo do TEC local.

Foi verificado e testado que é perfeitamente viável a automatização de todo o processo de cálculo do TEC, passo fundamental para a implantação, na internet, de

um serviço de divulgação do comportamento da ionosfera sobre o Brasil de forma rápida e sistemática.

## **7.2 Recomendações**

Os resultados alcançados e as análises realizadas permitem apresentar as seguintes recomendações:

- Criar condições para que o TEC continue a ser calculado para todas as estações da RBMC, atuais e futuras;
- Reduzir para uma ou mesmo meia hora o intervalo de cálculo do TEC;
- Gerar e divulgar de forma sistemática mapas da ionosfera, no formato IONEX (Schaer et al, 1998), permitindo que estes mapas possam ser utilizados para a melhoria da solução das ambigüidades;
- Criar uma página na internet que divulgue os valores do TEC;
- Incentivar a implantação de novas estações de monitoramento contínuo e que as mesmas integrem a RBMC;
- Sugerir que o centro de controle da RBMC passe a divulgar os arquivos contendo as observáveis GPS a cada uma hora e não a cada 24 horas.
- Aproveitar a sub-rotina do programa RBMC2000 para assegurar a qualidade dos arquivos de observáveis GPS automatizando o processo e, desta forma, eliminando os possíveis erros introduzidos pelo operador;
- Sugerir que seja utilizada a detecção de cintilações, para o cálculo do TEC visando um intervalo de tempo de 30 minutos;
- Realizar a análise espectral com todos os dados e, não apenas com as médias diárias, para verificar se há a ocorrência de ciclos inferiores a 120 dias;
- Buscar meios para que as estações da RBMC nunca parem de funcionar e, se isto ocorrer, que seja realizado de forma rápida e ágil a manutenção da mesma;

- Utilizar os arquivos do CODE – Center for Orbit Determination in Europe ou calcular as correções dos erros sistemáticos dos satélites na tentativa de melhor determinar os valores do TEC;
- Testar, para um mesmo conjunto de dados, o uso das efemérides ultra-rápidas do IGS e verificar quais as discrepâncias encontradas nos valores do TEC;
- Recomendar que se monitore por, pelo menos mais um ciclo solar, a atividade da ionosfera e seus efeitos nas observáveis do sistema GPS;
- Recomendar a comparação dos resultados com os obtidos por outros grupos e instituições;
- Recomendar a divulgação de forma extensiva os dados calculados para que outros grupos possam utilizar os mesmos para a detecção de cintilações, estudo das bolhas ionosféricas, detecção de chuvas de meteoros e outros eventos que provoquem alterações no TEC.

### **7.3 Perspectivas futuras**

A modernização do sistema GPS, principalmente com a introdução de uma nova frequência para uso civil centrada em 1176,45 MHz, possibilitará uma melhoria da capacidade de correção do valor do atraso ionosférico (Spilker Jr., et al, 1999). Há ainda a possibilidade de se prover, em um futuro não muito distante, um serviço de WADGPS - Wide Area Differential GPS e desta forma será fundamental a geração de mapas da ionosfera em tempo quase real ou mesmo em tempo real dependendo evidentemente do tipo de aplicação.

Há de se considerar ainda que, com a entrada em operação do sistema europeu de posicionamento, denominado Galileo (Hein et al, 2001) prevista para 2006 e da retomada e ampliação do sistema russo, o GLONASS, haverá com certeza, pelo menos um concorrente direto do sistema GPS (Mônico, 2000) e, desta forma, deve-se esperar uma melhoria da acurácia e a redução dos preços dos receptores.

Também se deve considerar que a implantação, na internet, de uma página que divulgue de forma sistemática o comportamento da ionosfera trará benefícios, não só para os usuários de receptores de uma frequência como também para usuários

que desejarem solucionar as ambigüidades em bases longas, pesquisadores que necessitem de informações sobre o TEC, entre outros. Este serviço deverá ser realizado em colaboração com o IBGE, órgão responsável pelo gerenciamento da RBMC, bem como contar com o apoio de outras instituições à medida que a rede for sendo ampliada, para que em alguns anos possam-se divulgar as informações no menor intervalo de tempo possível.

Espera-se ter dado um passo no estudo de um assunto extremamente importante e que vai requerer muitas pesquisas.

## ANEXO A

As figuras a seguir apresentam os gráficos anuais do TEC, de todas as estações da RBMC a saber: Bom Jesus da Lapa - BA, Brasília - DF, Crato - CE, Cuiabá - MT, Curitiba - PR, Fortaleza - CE, Imperatriz - MA, Manaus - AM, Porto Alegre - RS, Recife - PE, Salvador - BA e Viçosa - MG.

Em todas as figuras são observados dois gráficos; o superior apresenta o valor do TEC calculado a cada duas horas e, no gráfico inferior estão representados os valores médios: diurno (cor vermelha), diário (cor azul) e noturno (com preta).

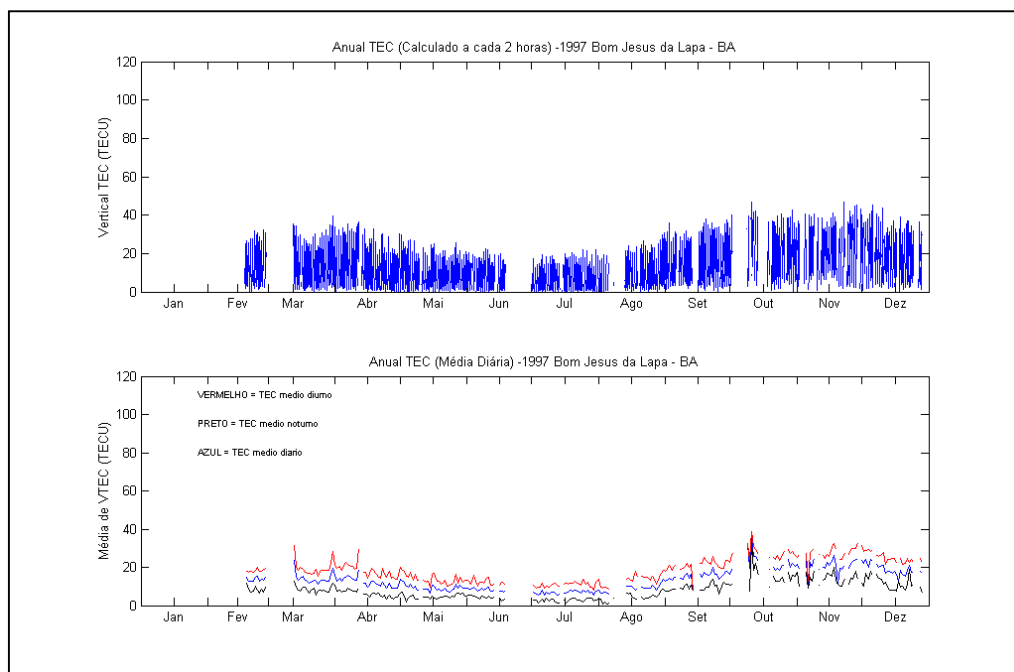


FIG. A1: VALORES CALCULADOS E MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 1997

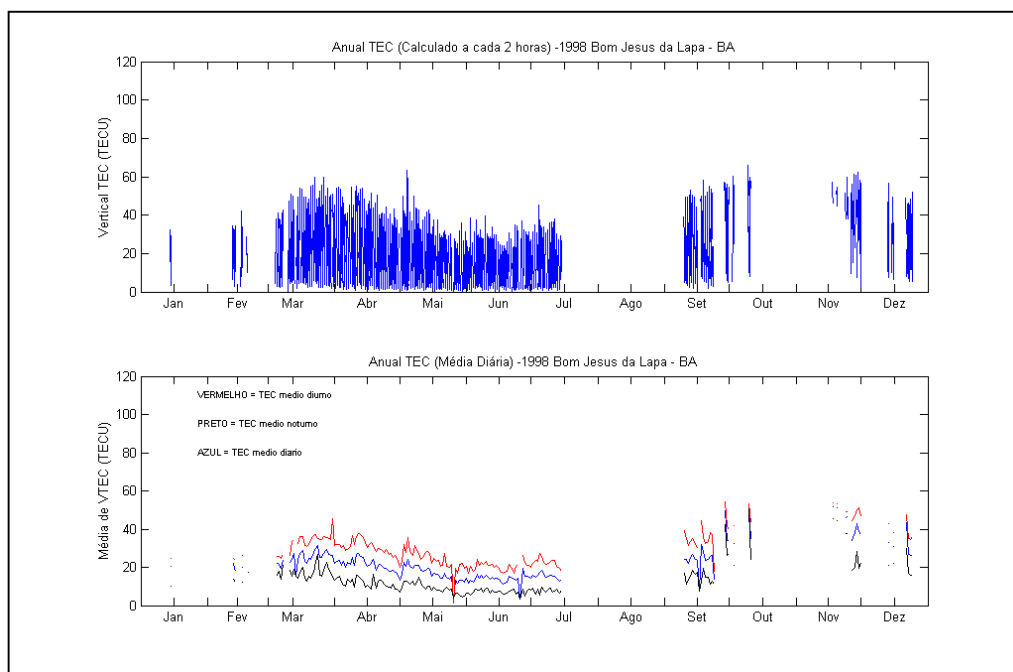


FIG. A2: VALORES CALCULADOS E MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA – 1998

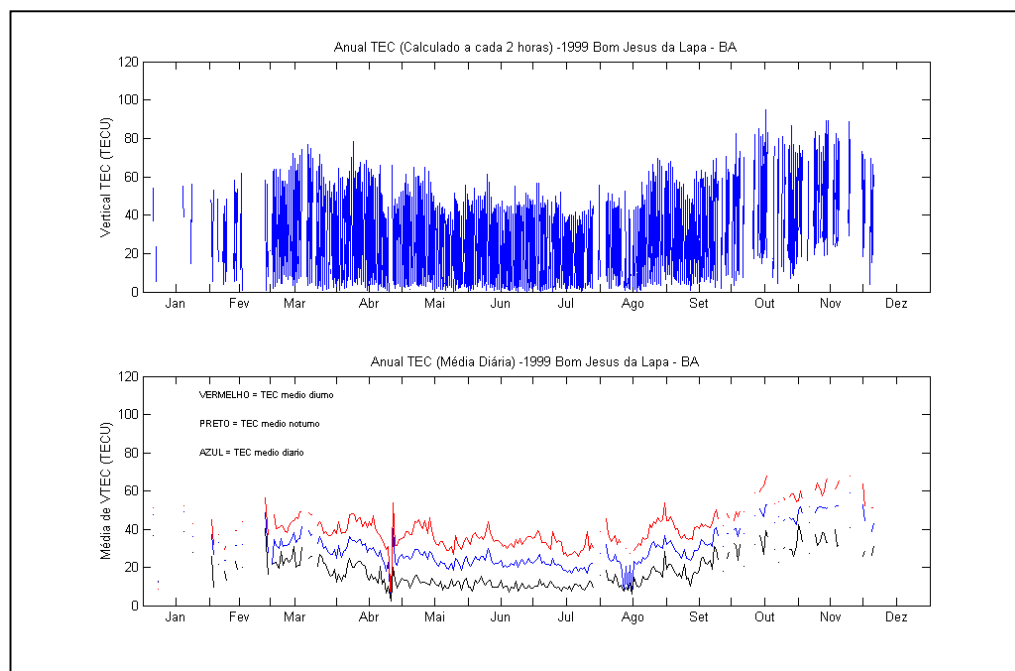


FIG. A3: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA – 1999

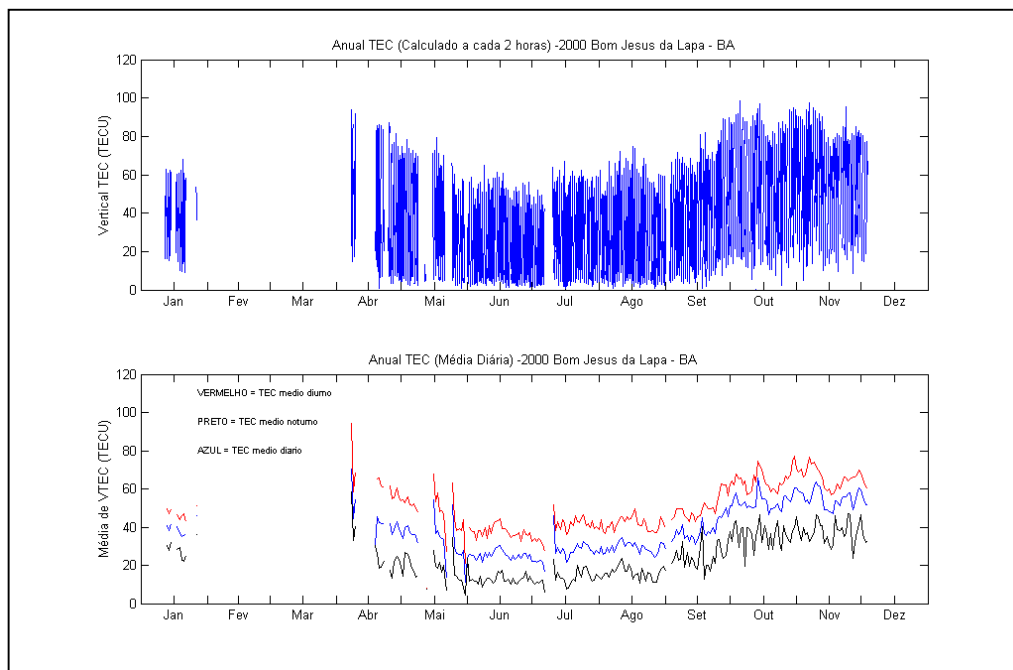


FIG. A4: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA – 2000

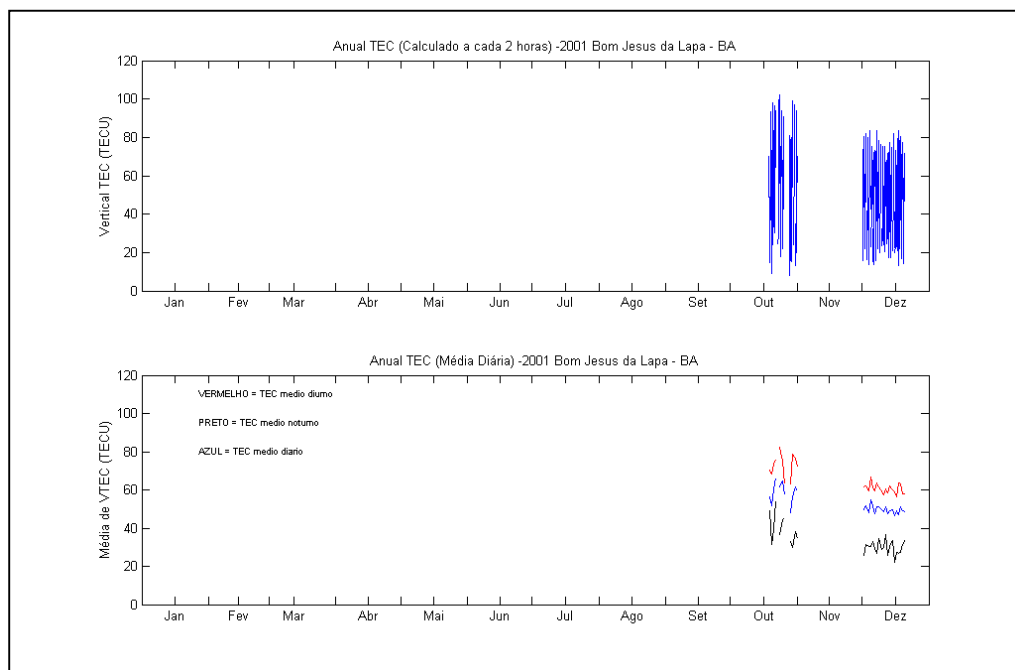


FIG. A5: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 2001



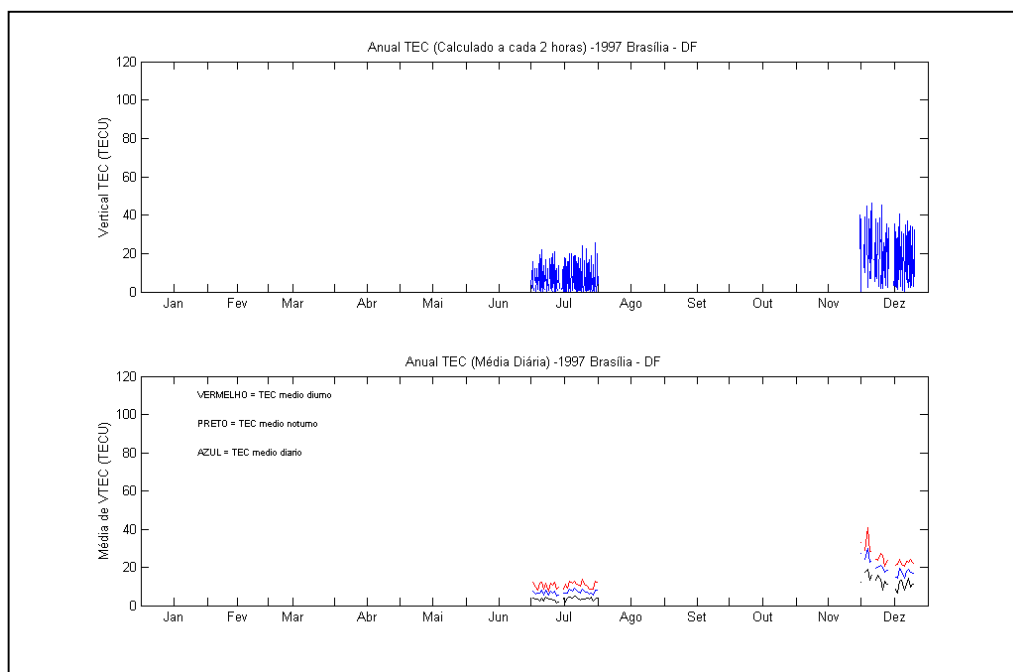


FIG. A6: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA – 1997

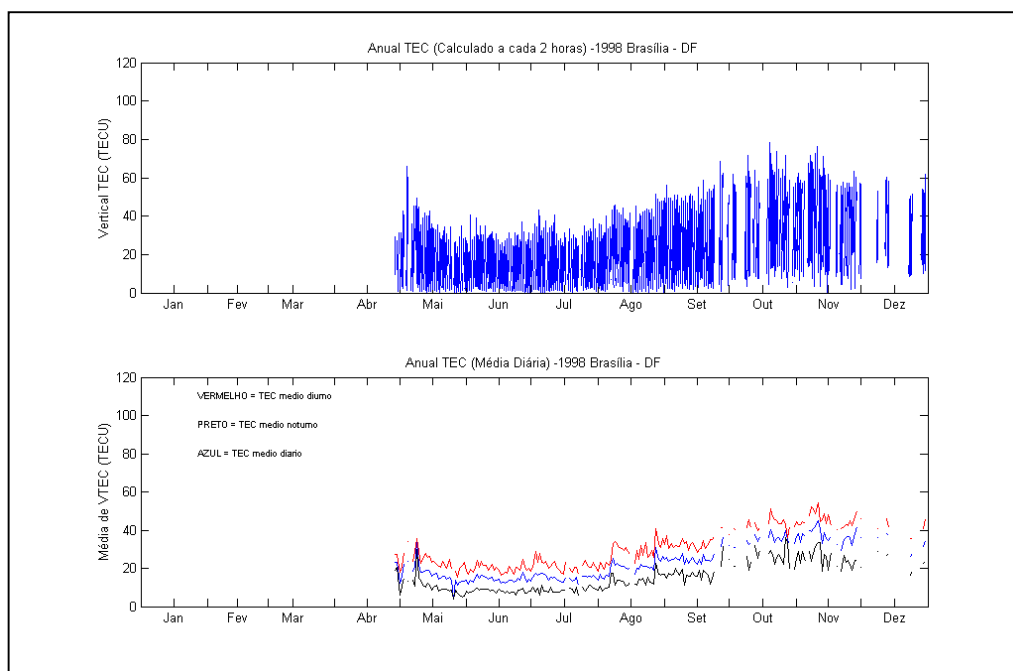


FIG. A7: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 1998

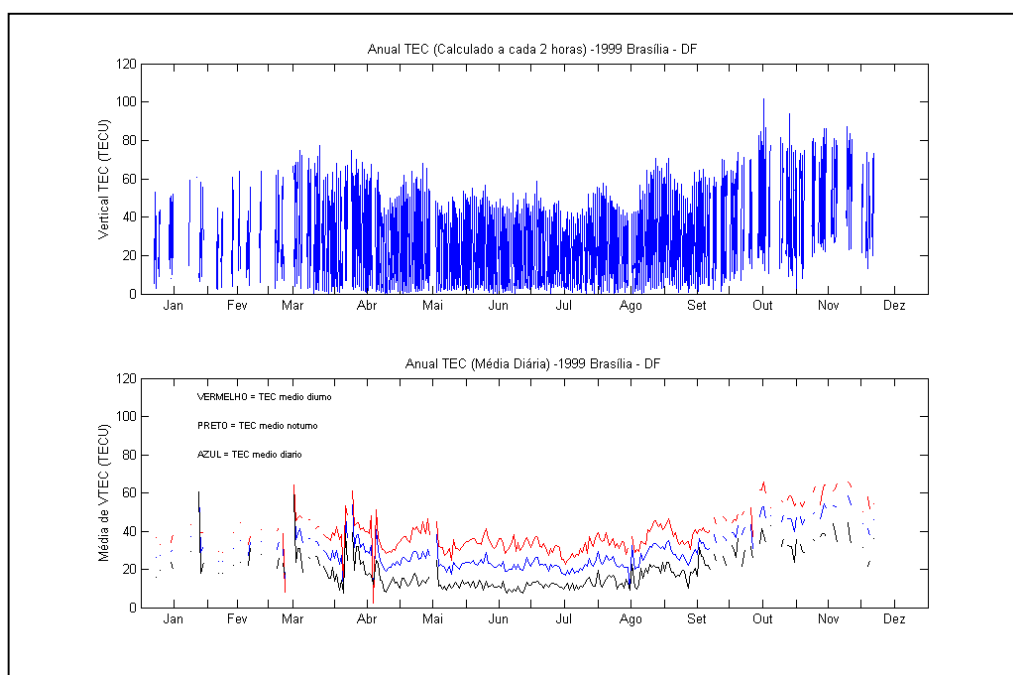


FIG. A8: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 1999

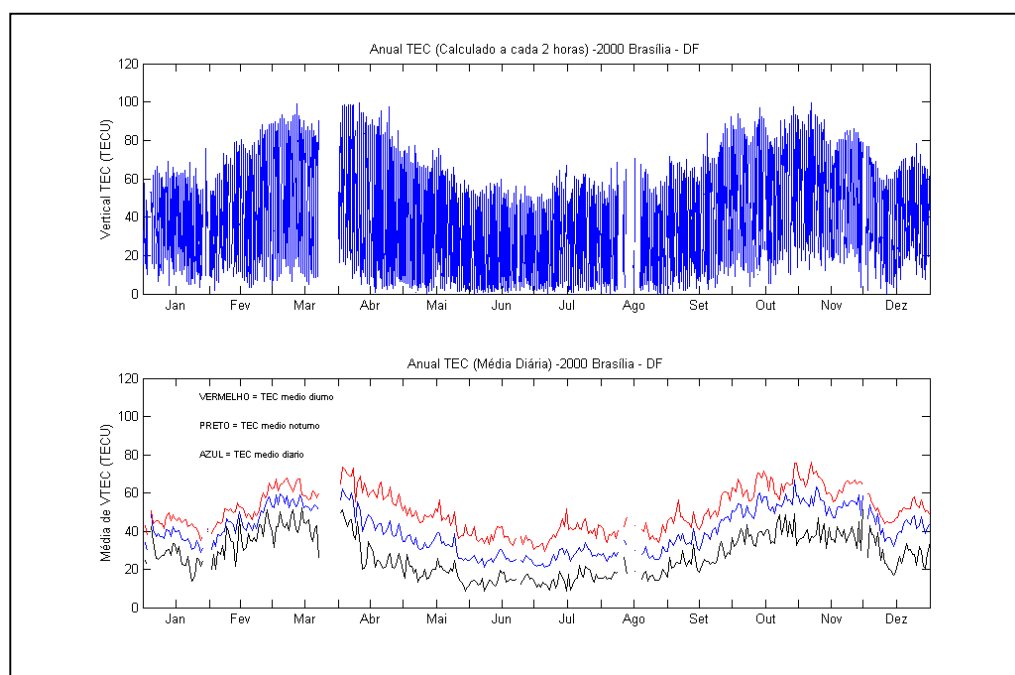


FIG. A9: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 2000

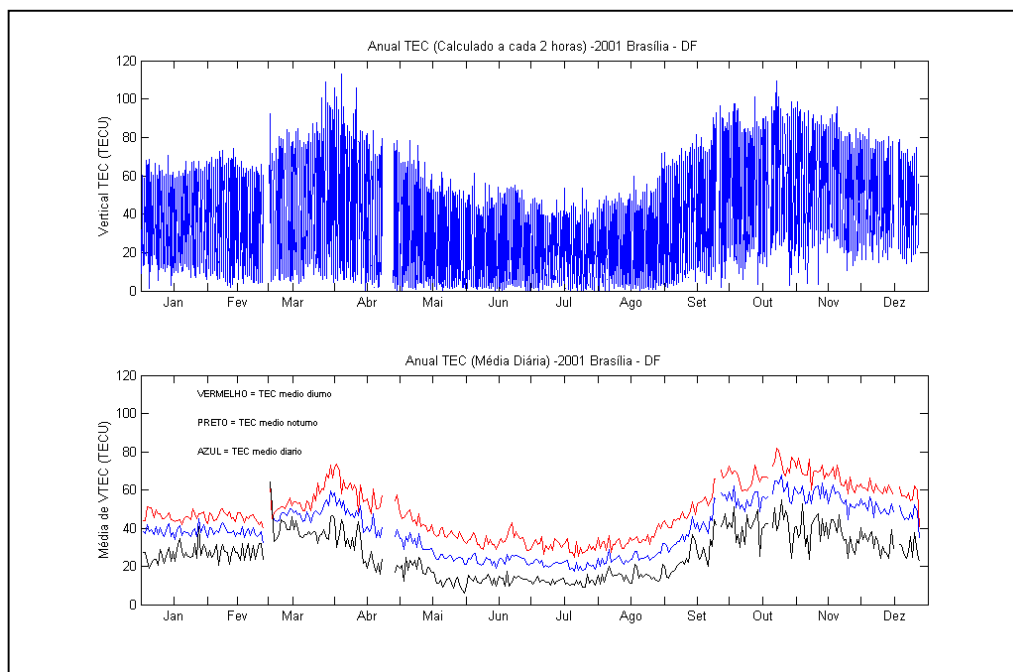


FIG. A10: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA – 2001

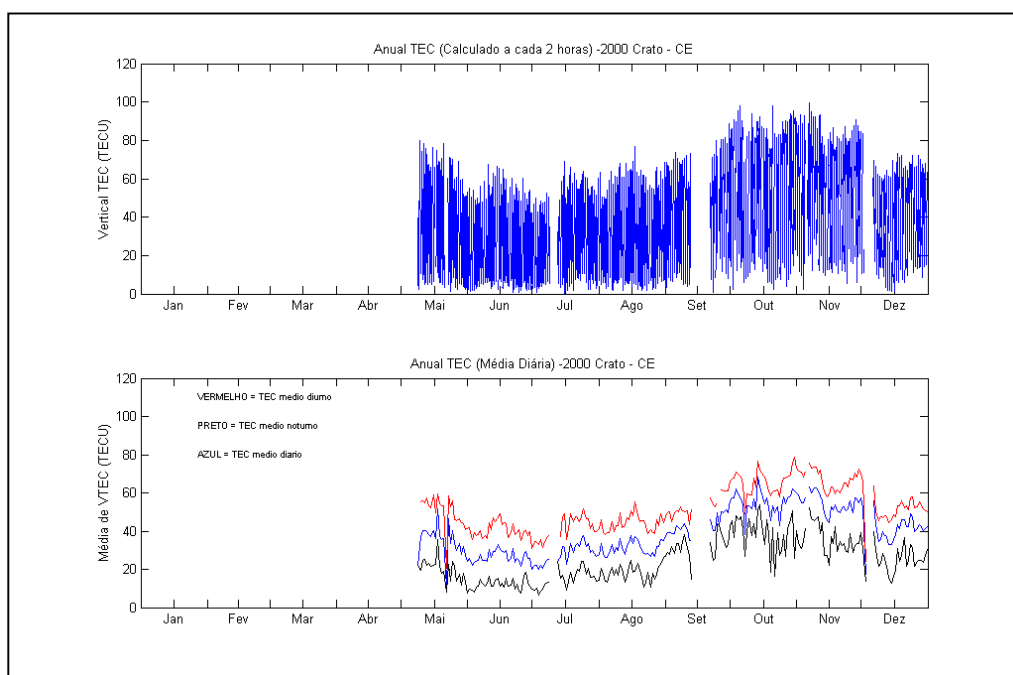


FIG. A11: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CRATO – 2000

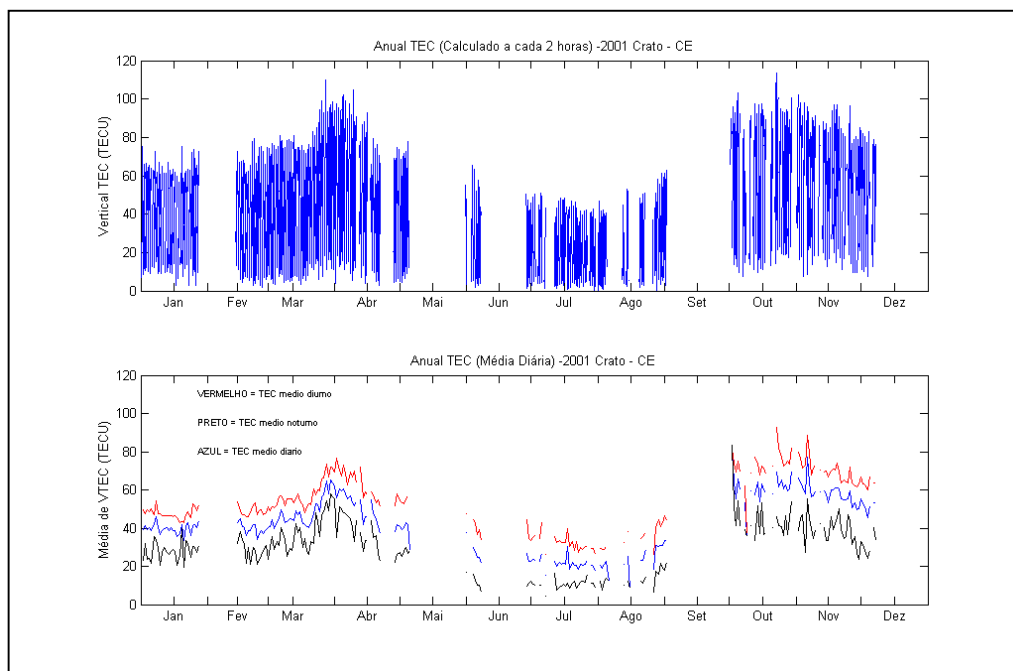


FIG. A12: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CRATO – 2001

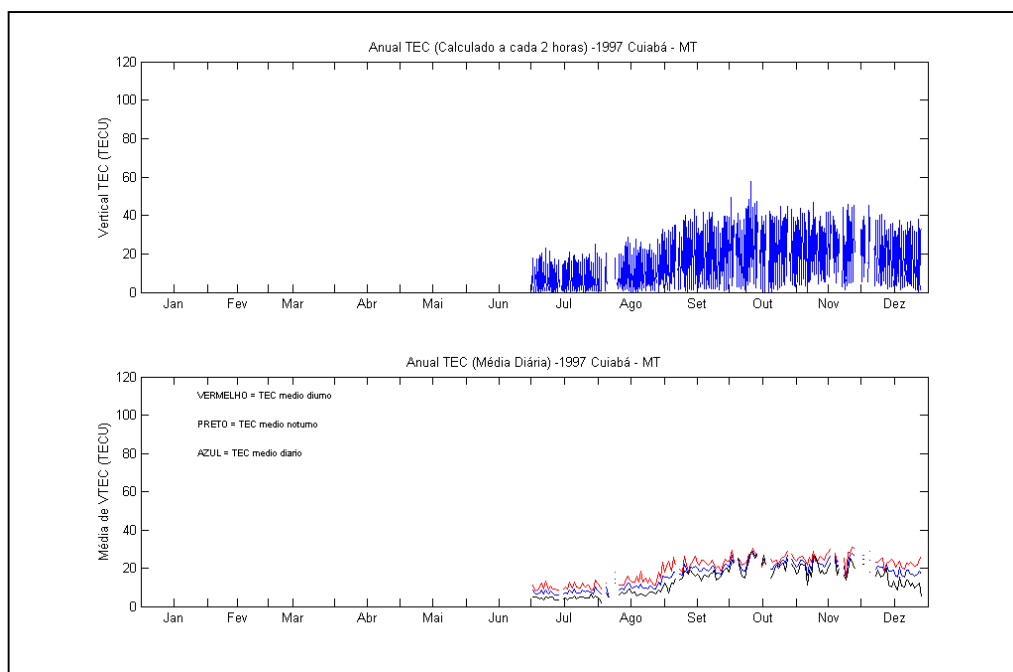


FIG. A13: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CUIABÁ – 1997

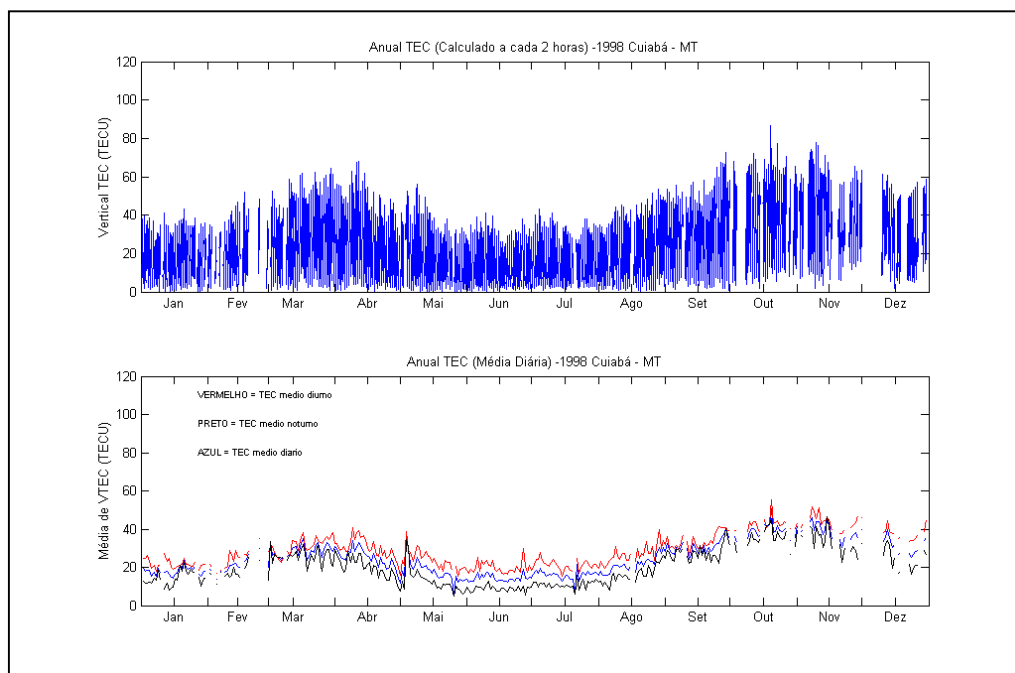


FIG. A14: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CUIABÁ – 1998

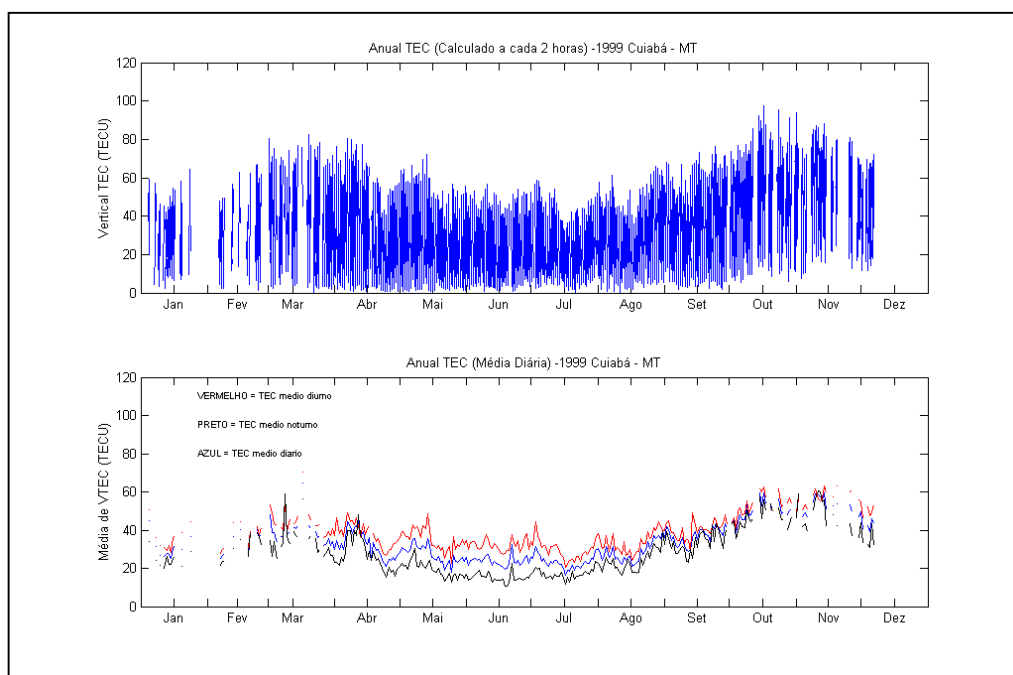


FIG. A15: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CUIABÁ – 1999

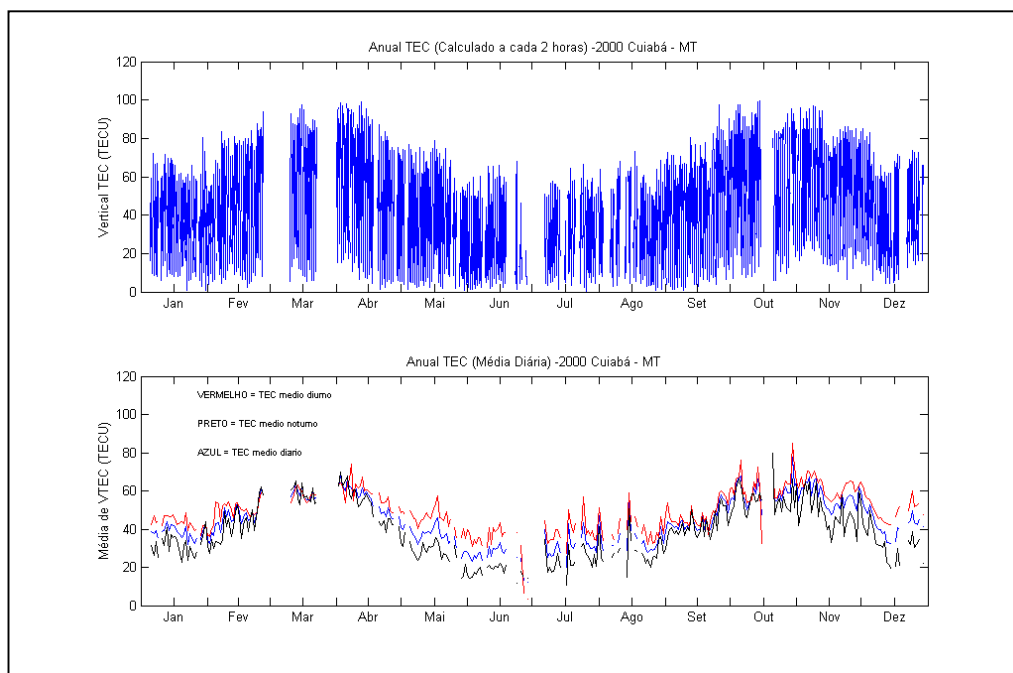


FIG. A16: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CUIABÁ – 2000

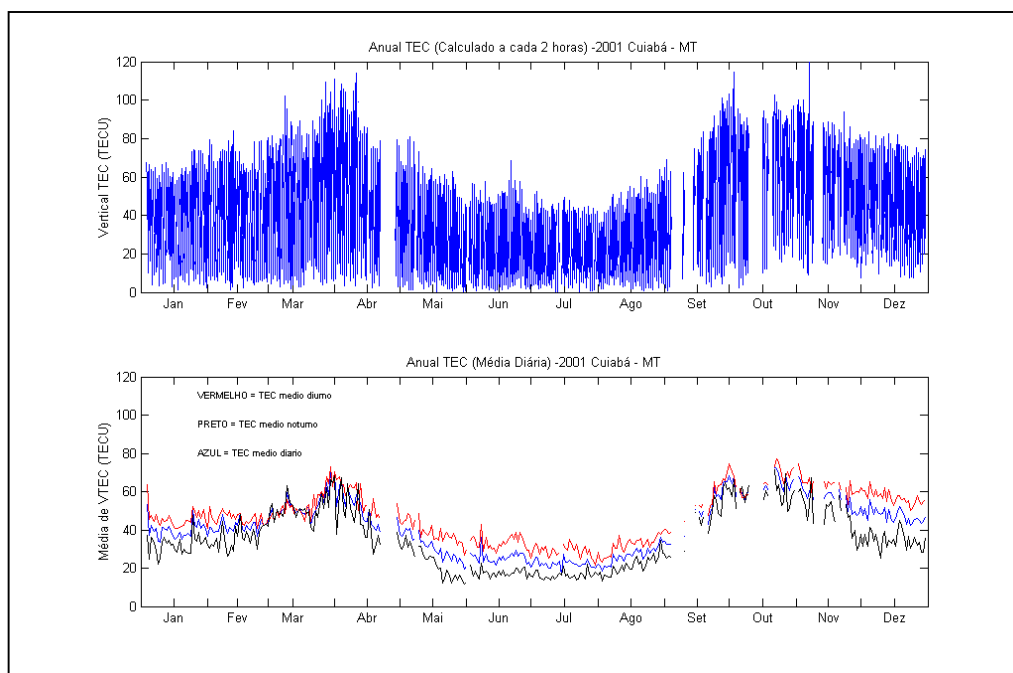


FIG. A17: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CUIABÁ – 2001

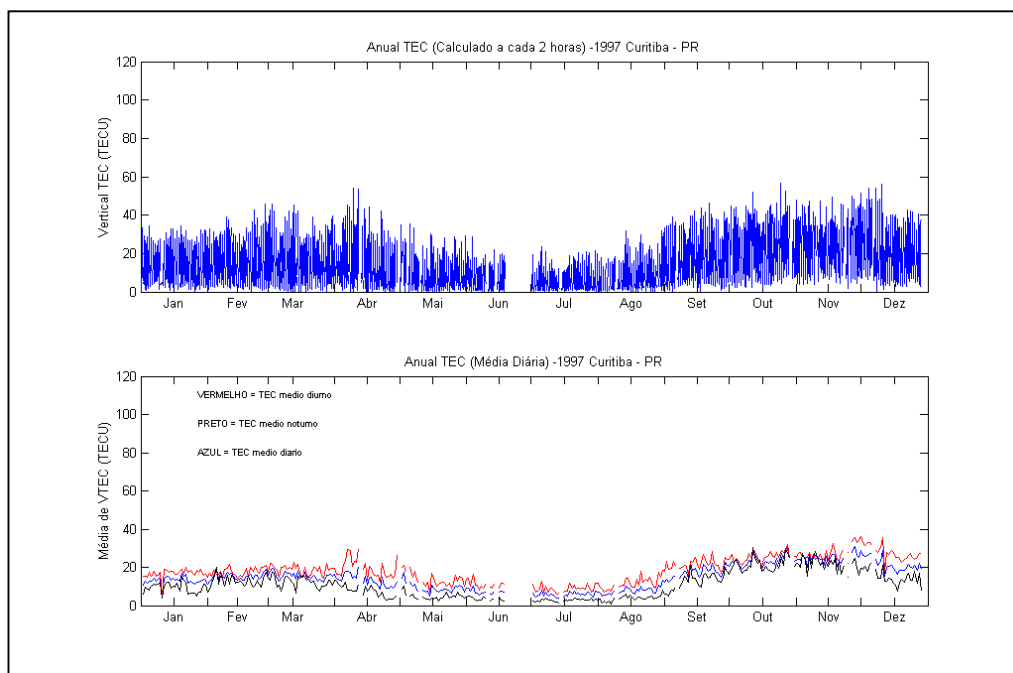


FIG. A18: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CURITIBA – 1997

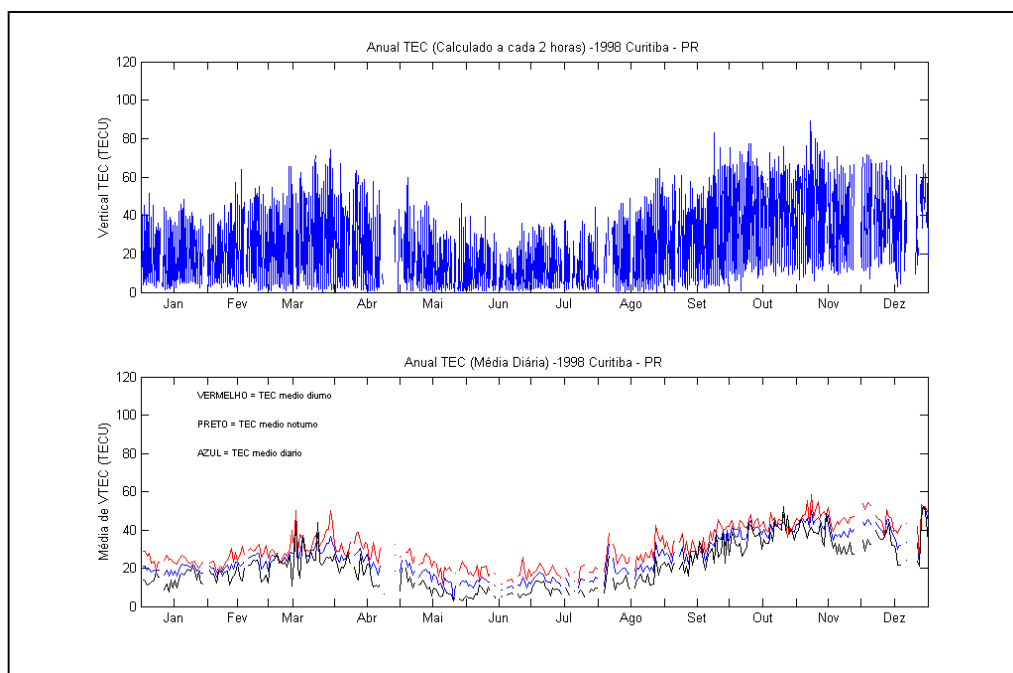


FIG. A19: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CURITIBA – 1998

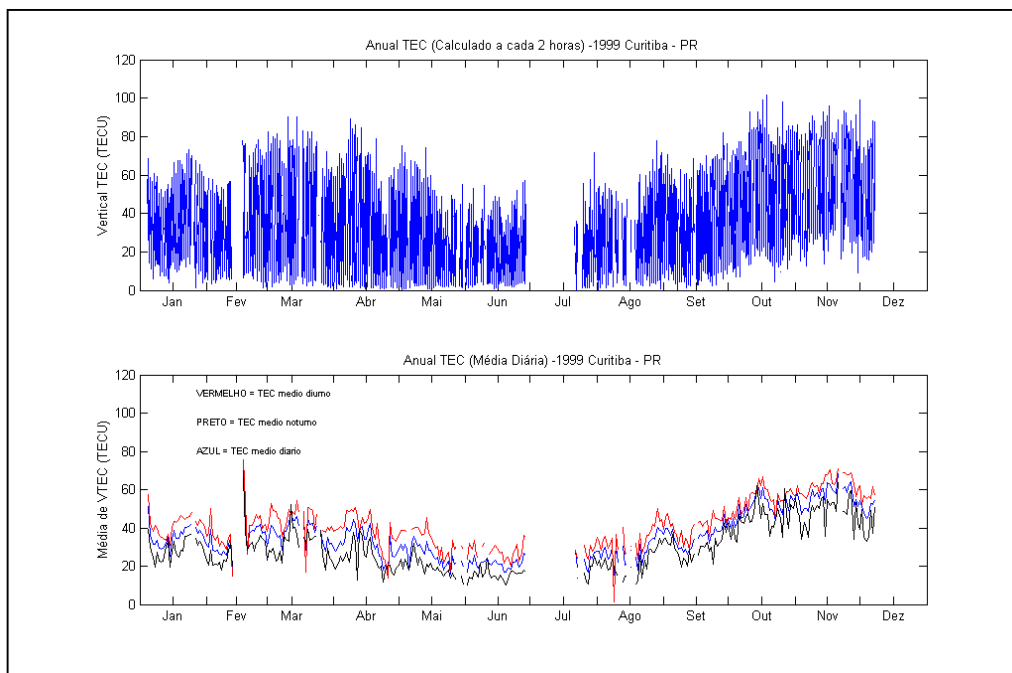


FIG. A20: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CURITIBA – 1999

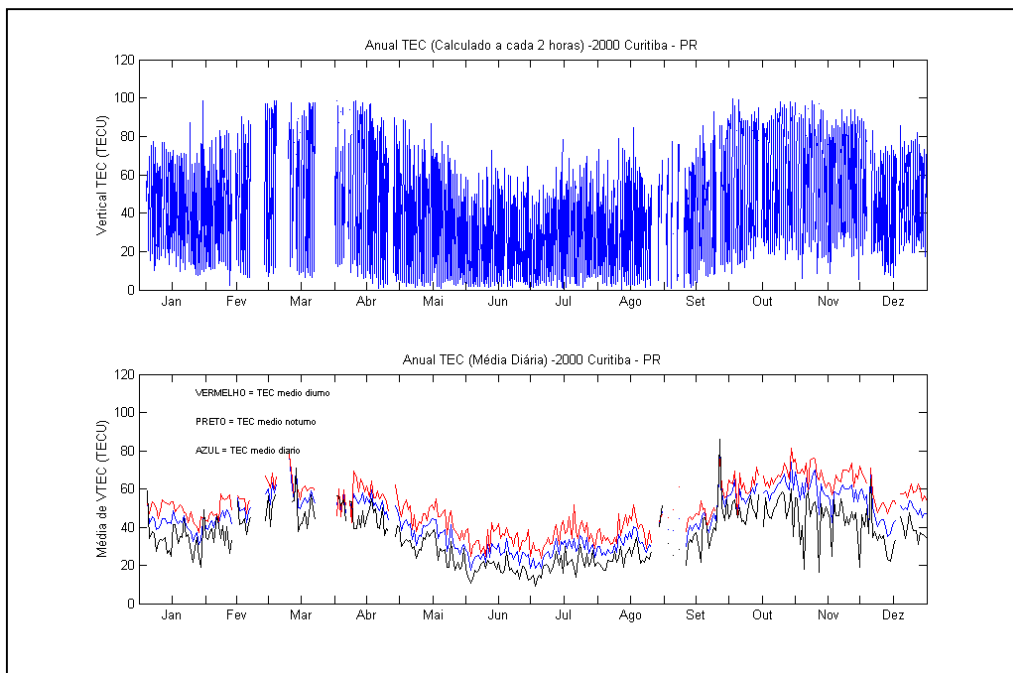


FIG. A21: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CURITIBA – 2000



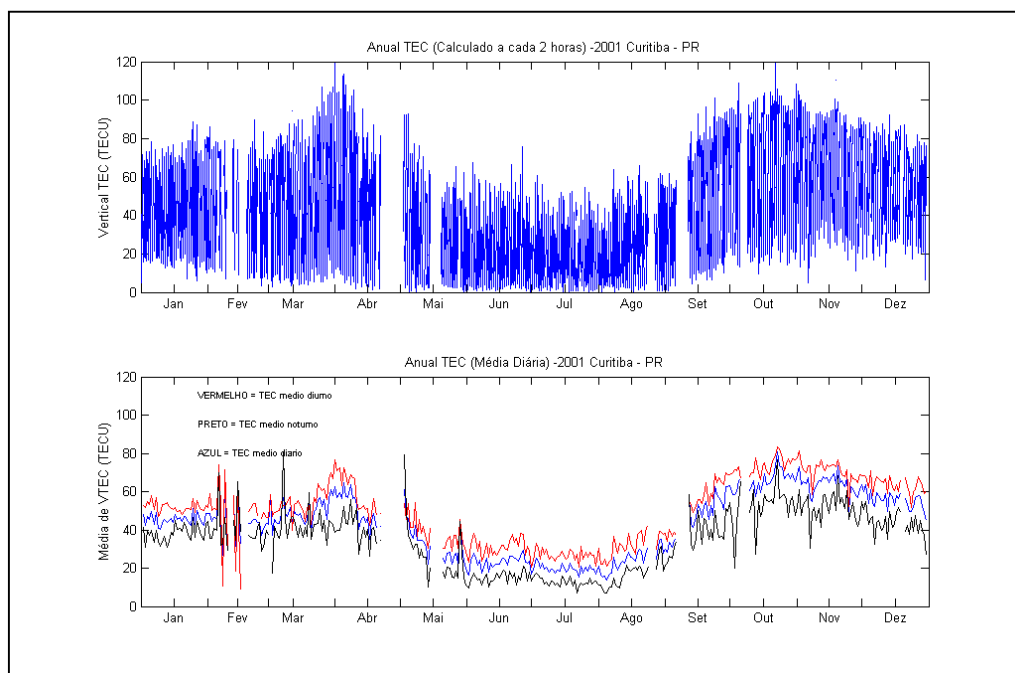


FIG. A22: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE CURITIBA – 2001

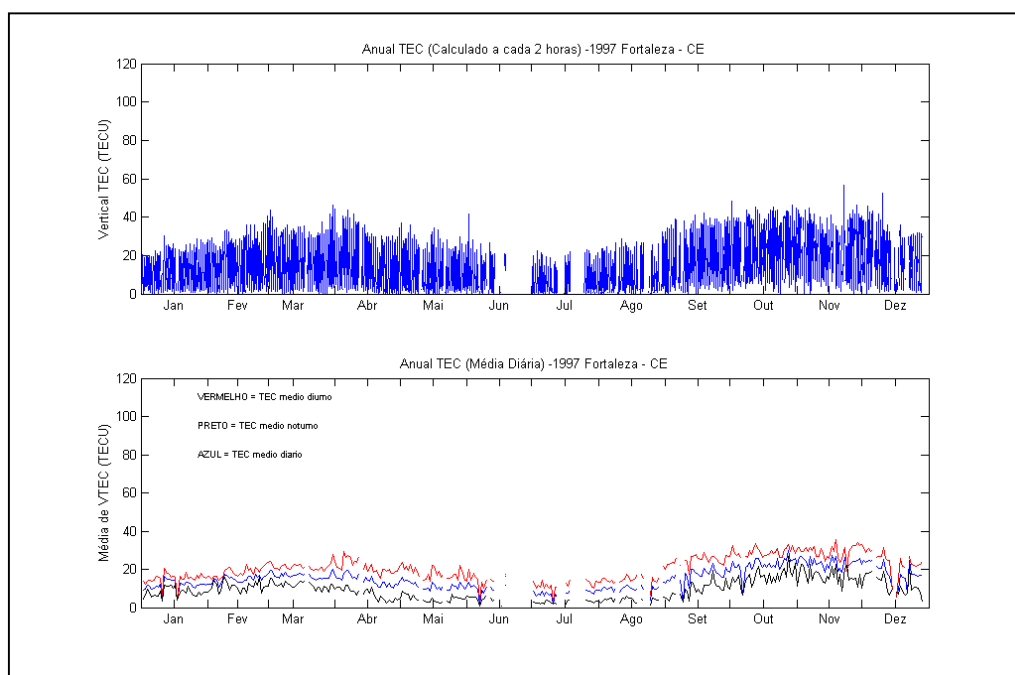


FIG. A23: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 1997

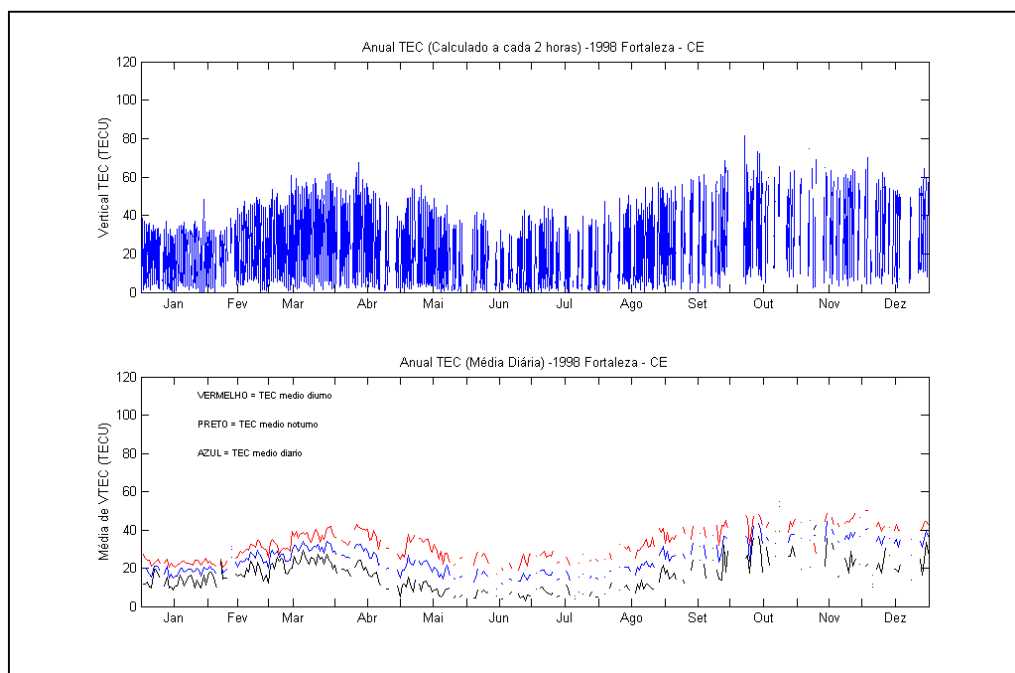


FIG. A24: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 1998

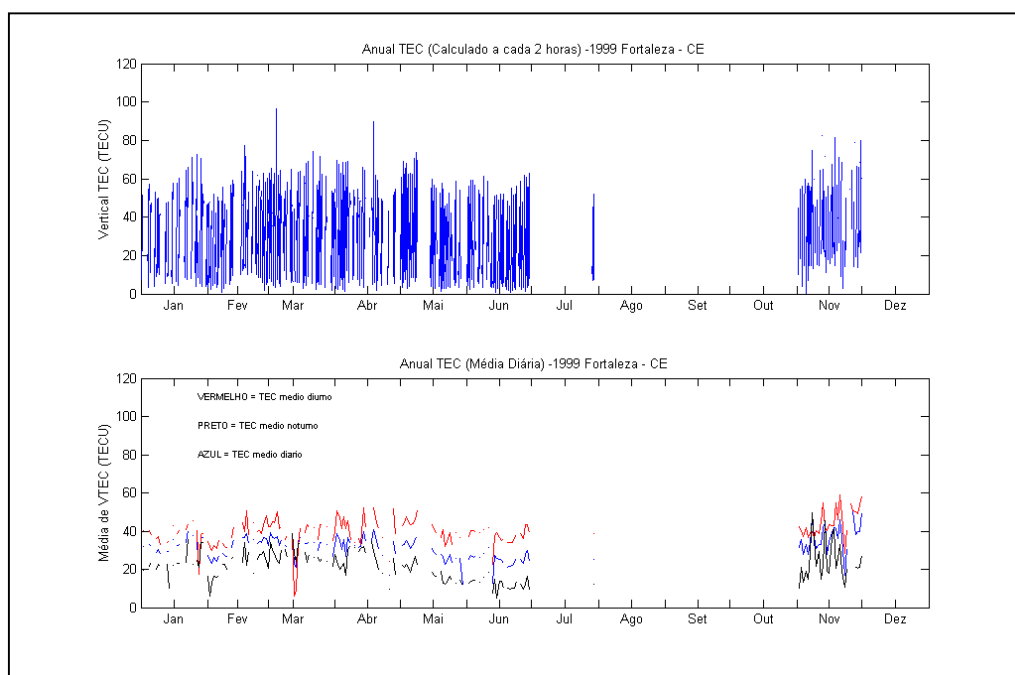


FIG. A25: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 1999

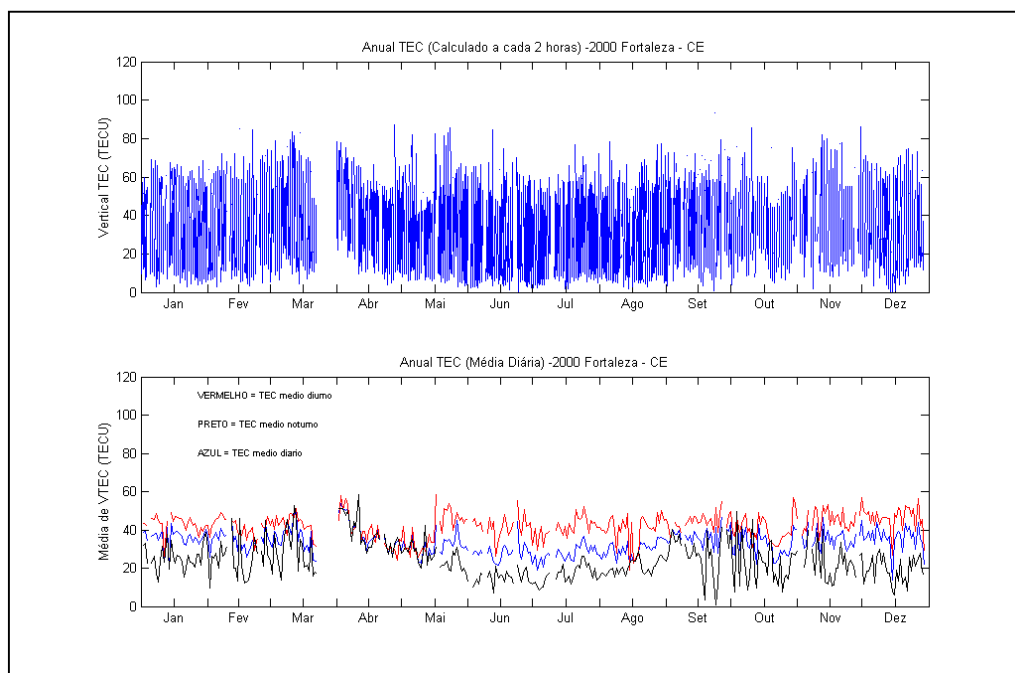


FIG. A26: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 2000

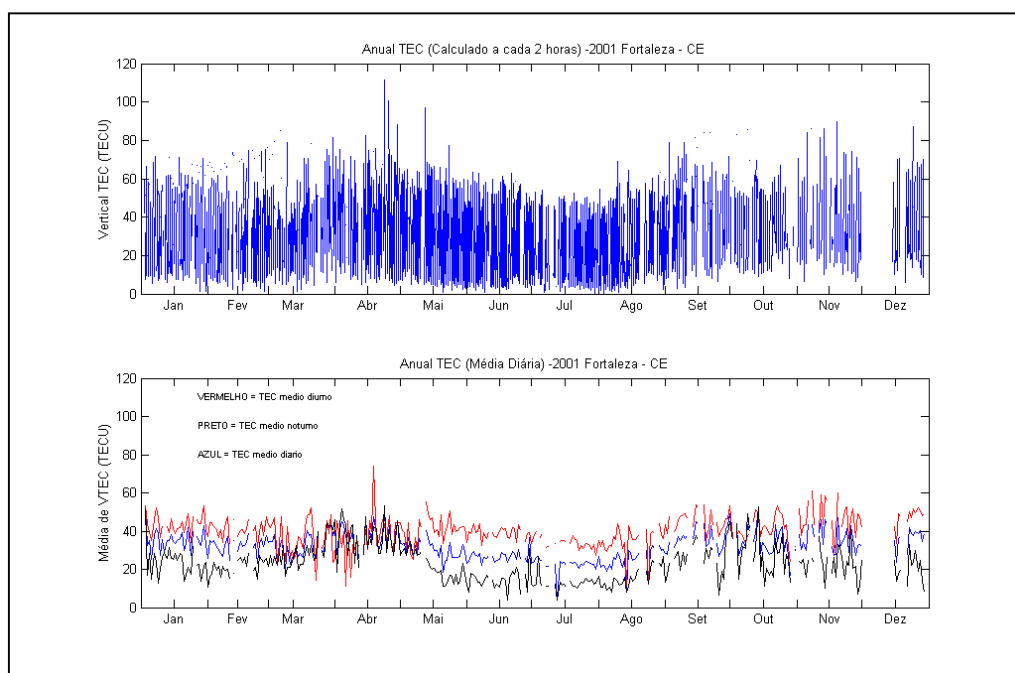


FIG. A27: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 2001

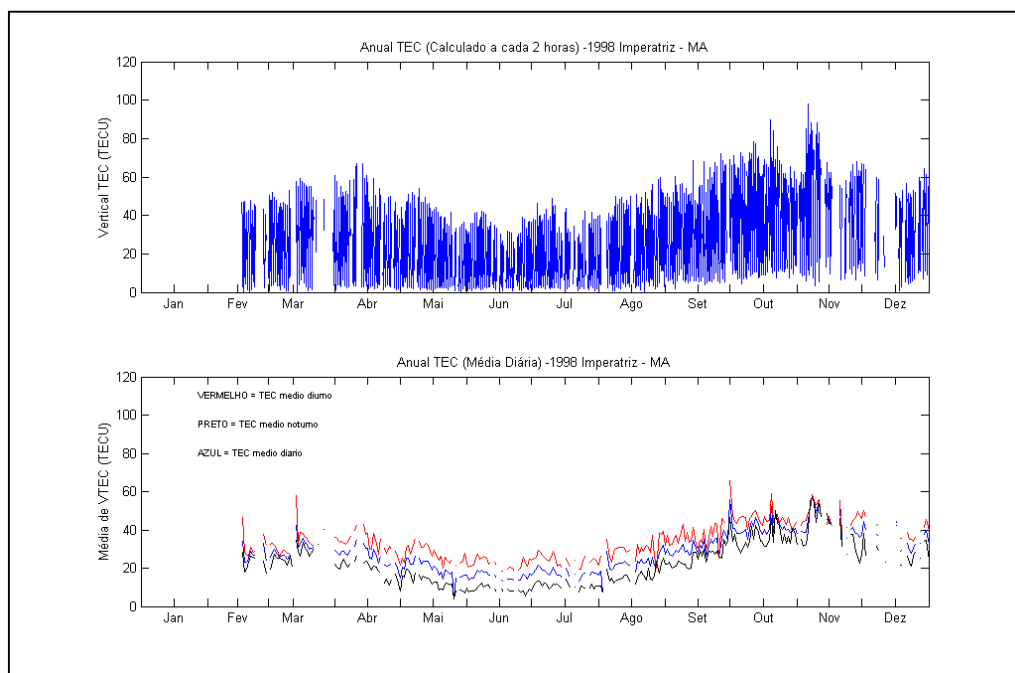


FIG. A28: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 1998

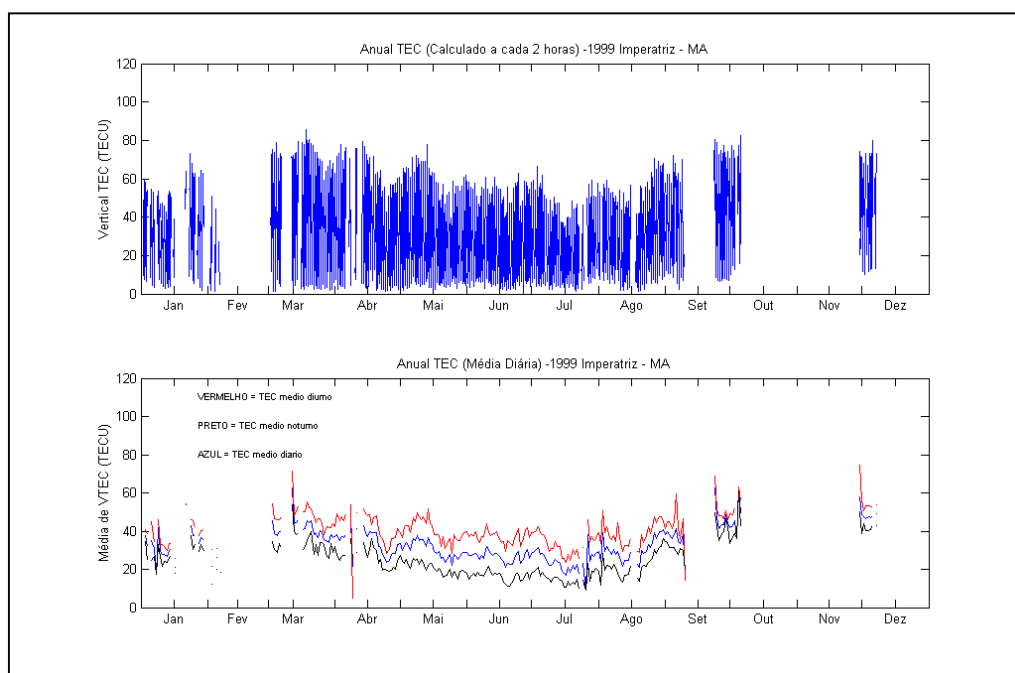


FIG. A29: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 1999

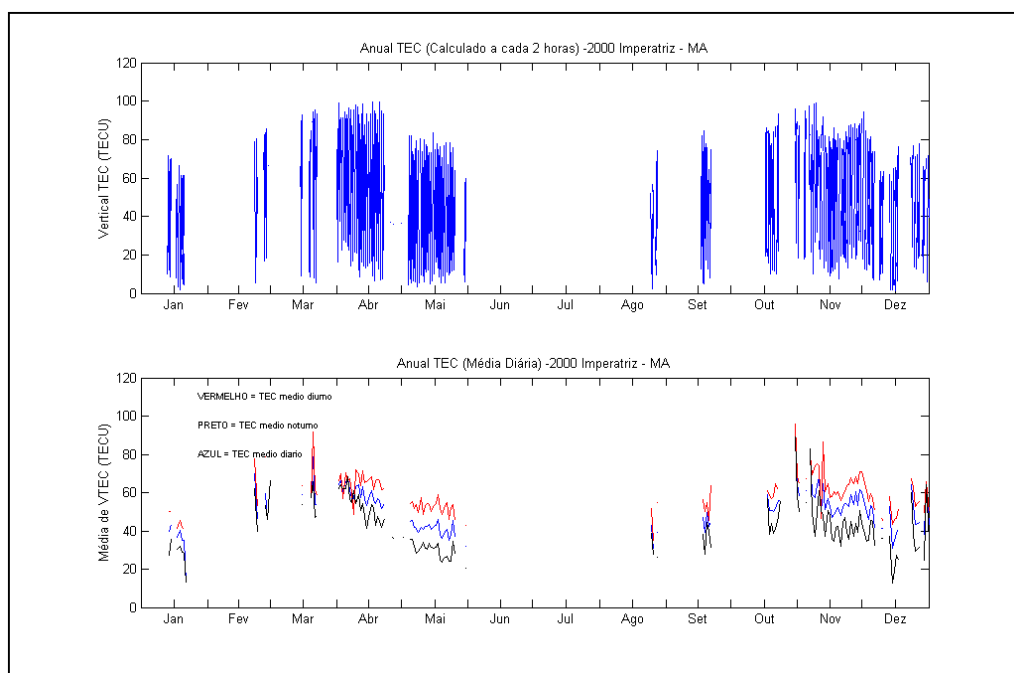


FIG. A30: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 2000

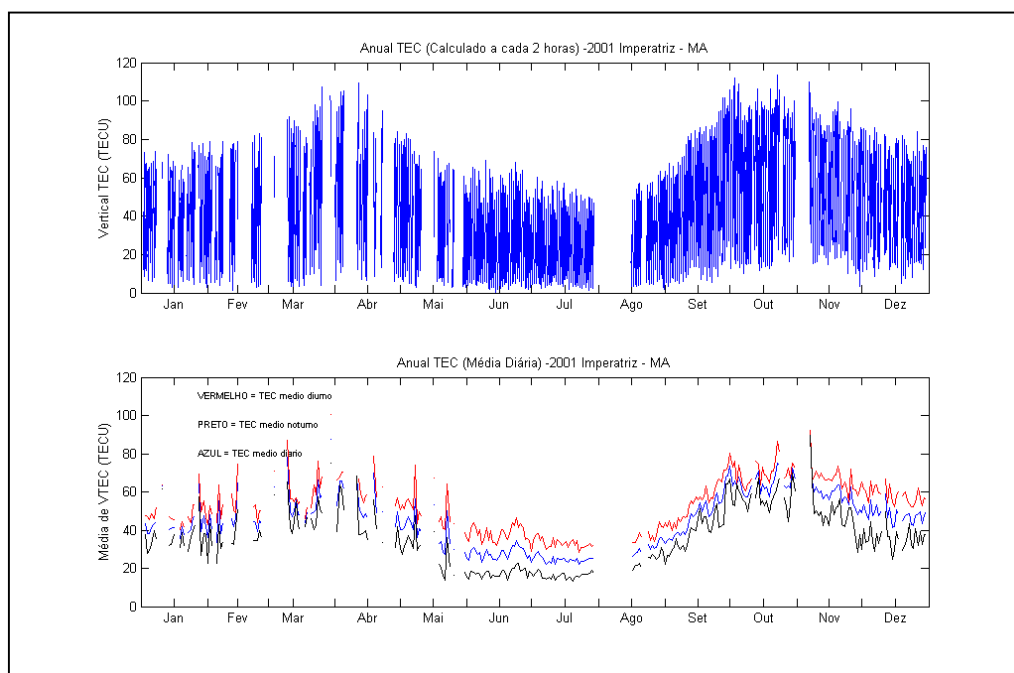


FIG. A31: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 2001

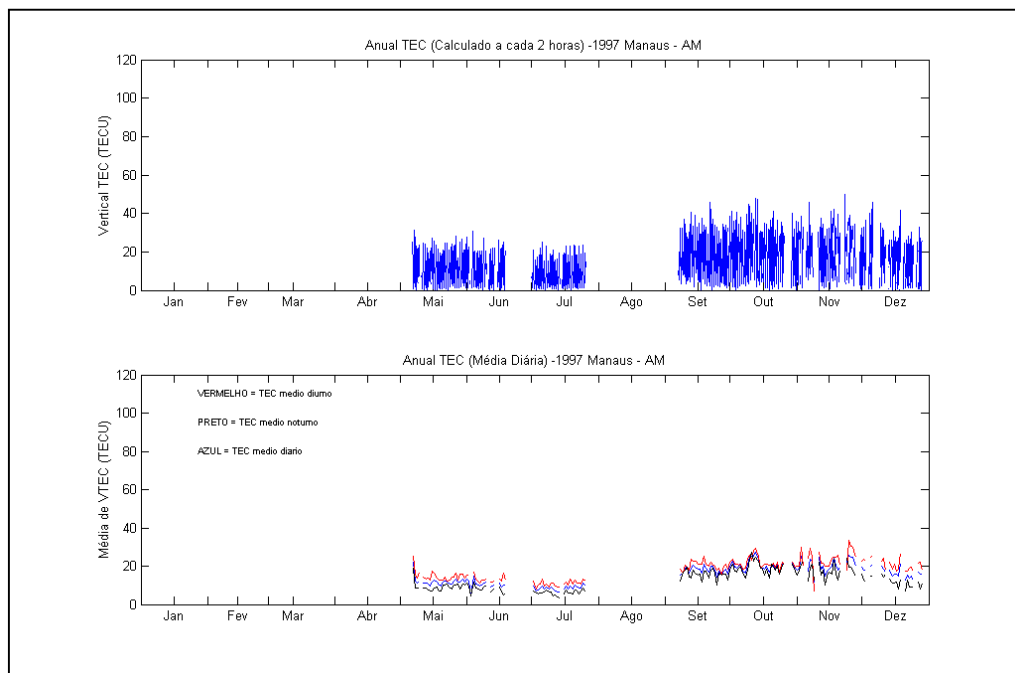


FIG. A32: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE MANAUS – 1997

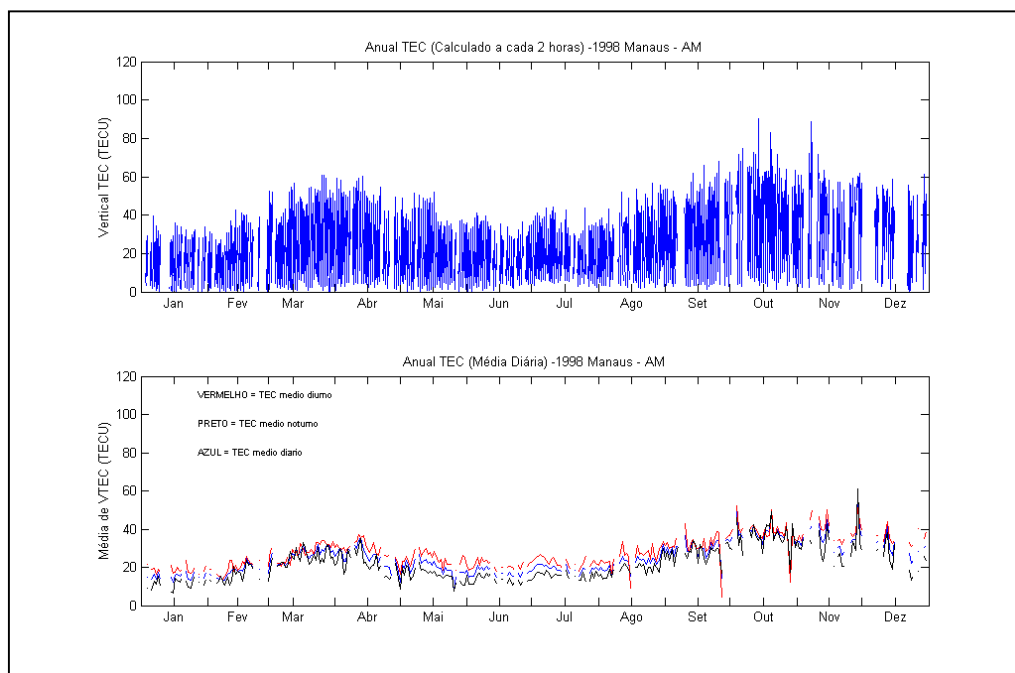


FIG. A33: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE MANAUS – 1998

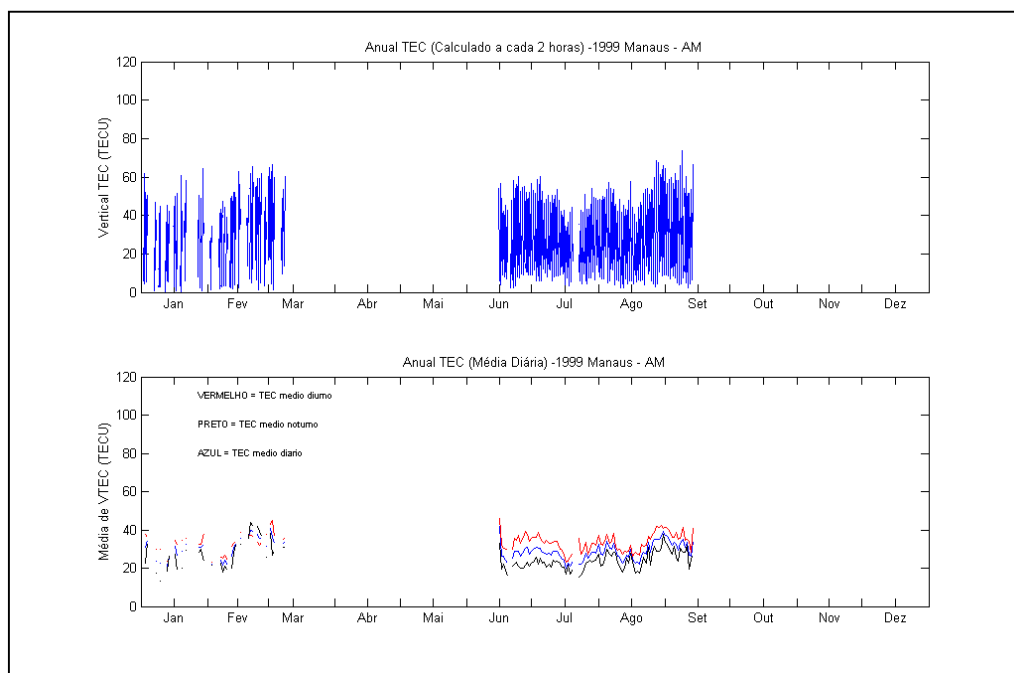


FIG. A34: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE MANAUS – 1999

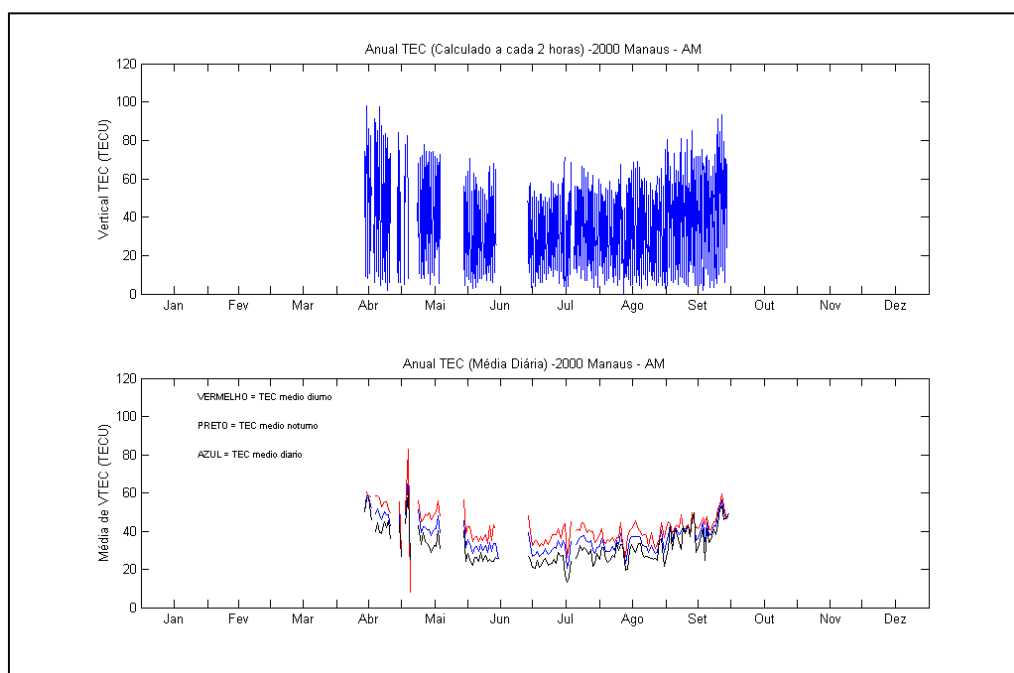


FIG. A35: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE MANAUS – 2000

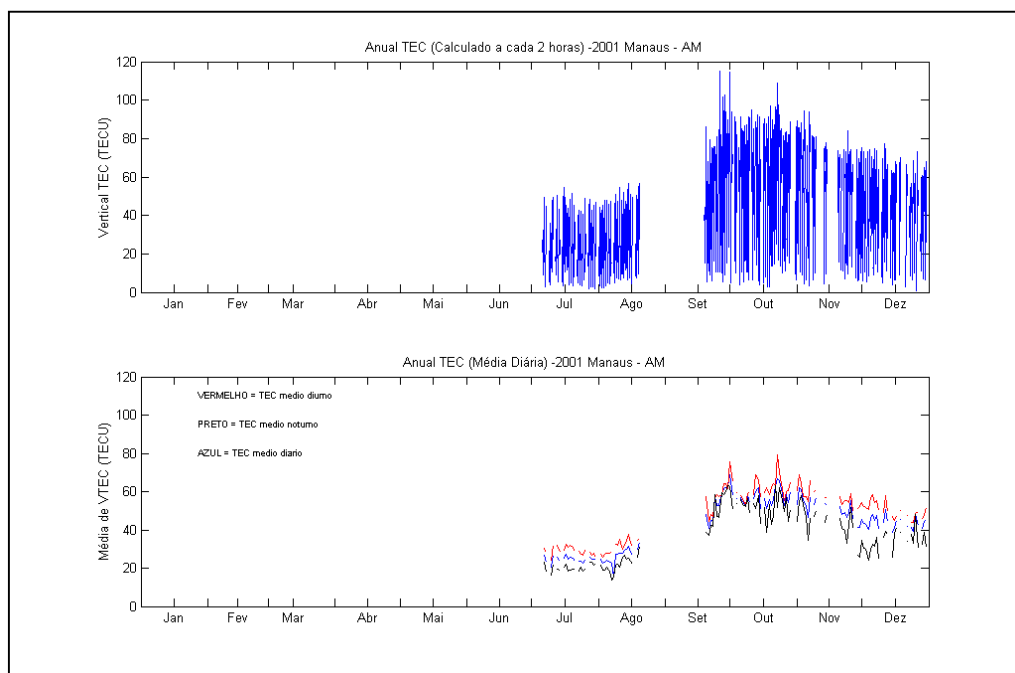


FIG. A36: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE MANAUS – 2001

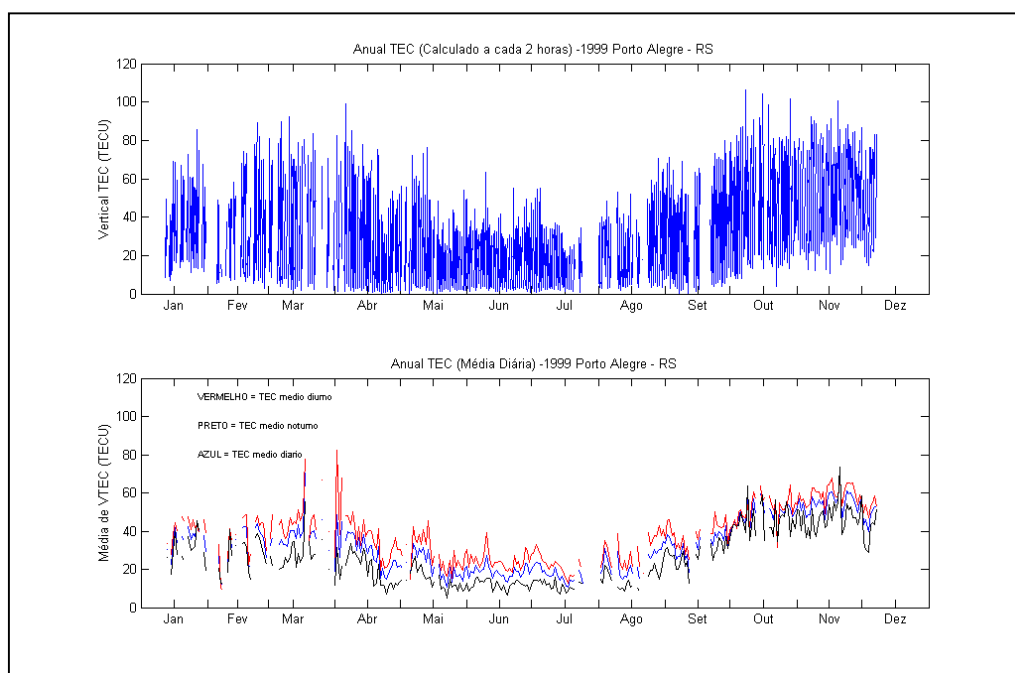


FIG. A37: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE - 1999



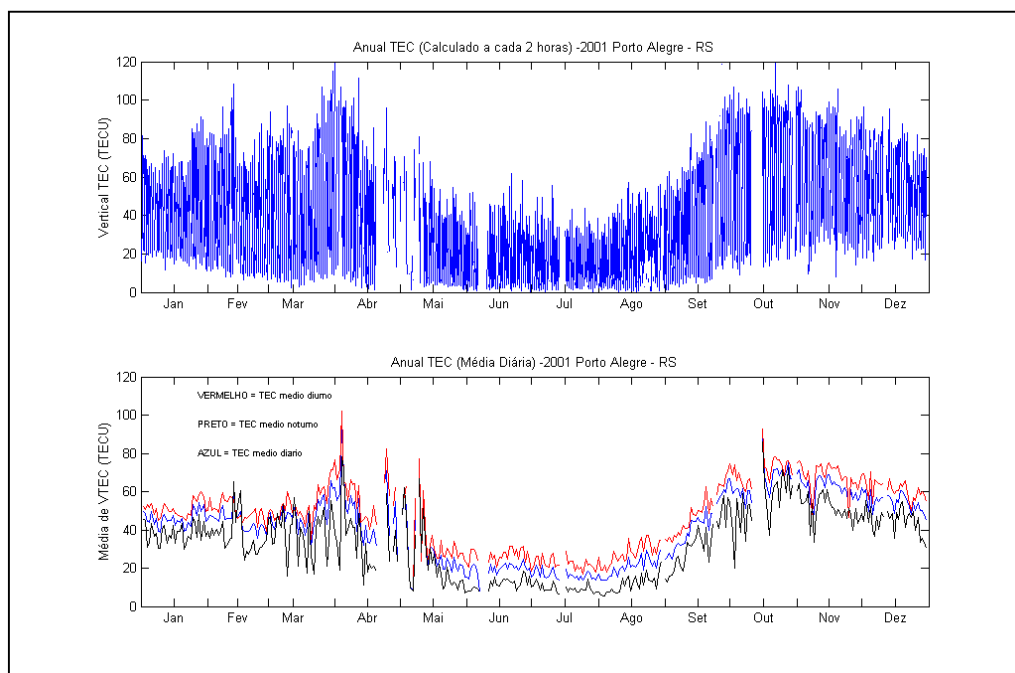


FIG. A38: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE - 2000

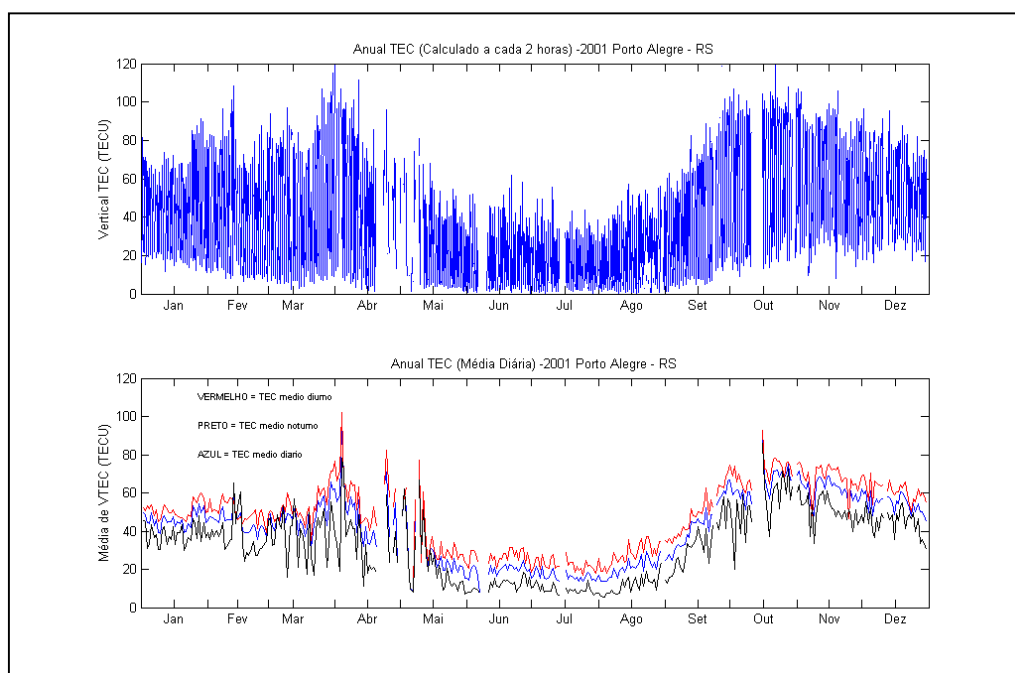


FIG. A39: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE - 2001

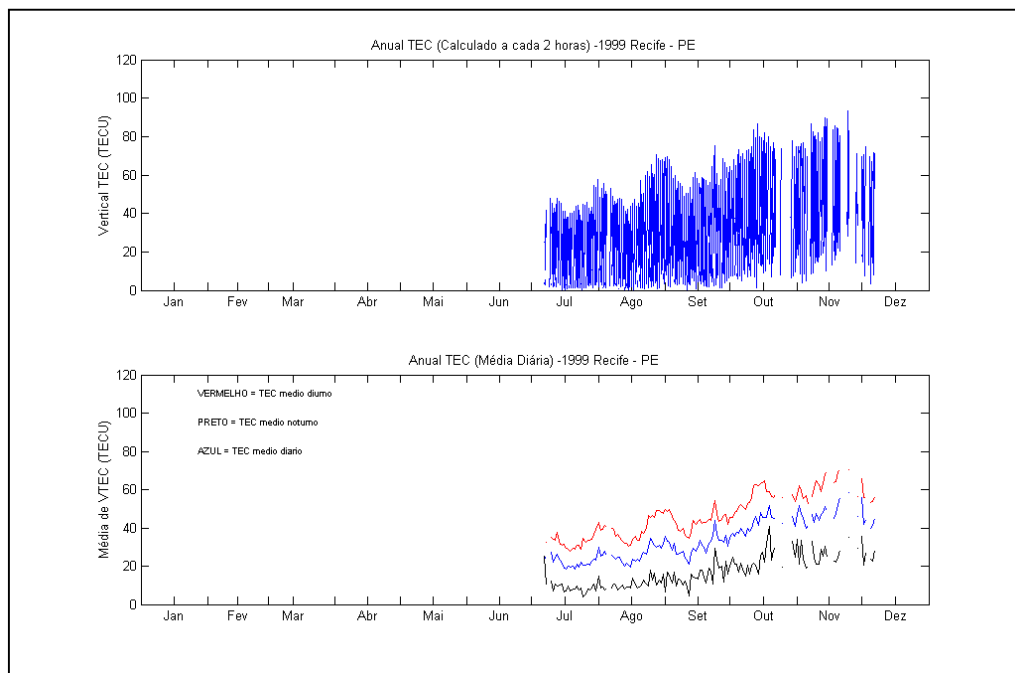


FIG. A40: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE RECIFE – 1999

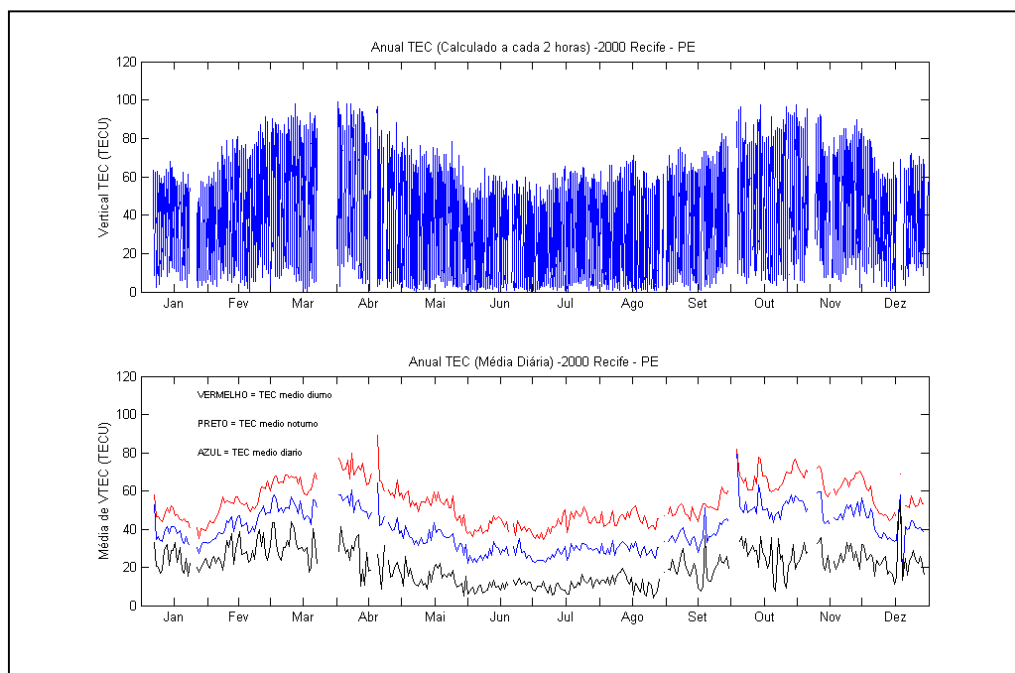


FIG. A41: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE RECIFE - 2000

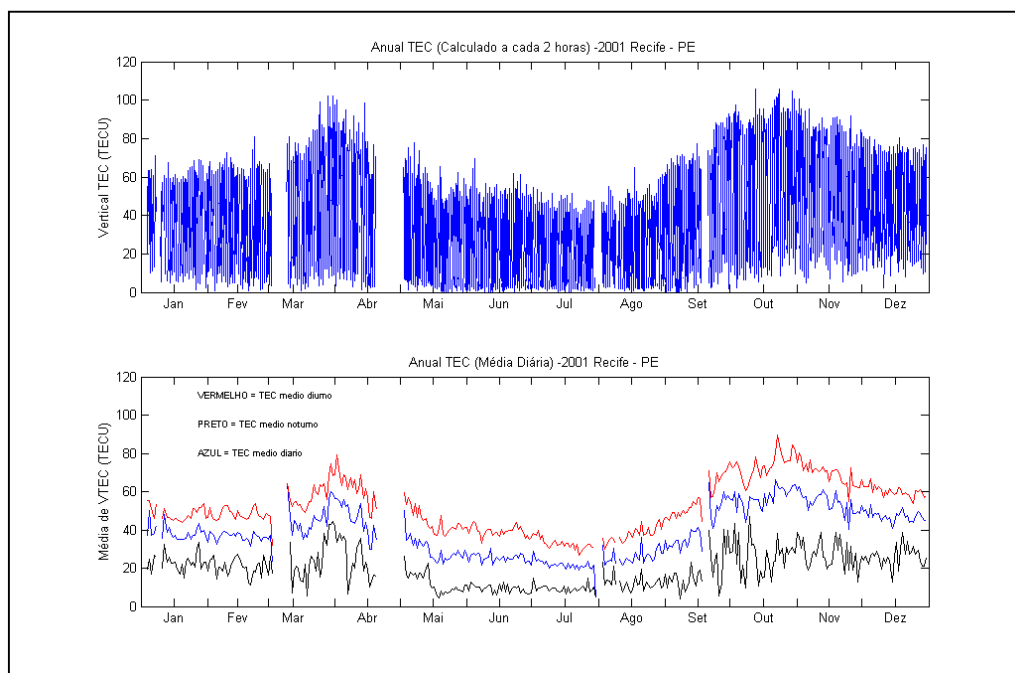


FIG. A42: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE RECIFE - 2001

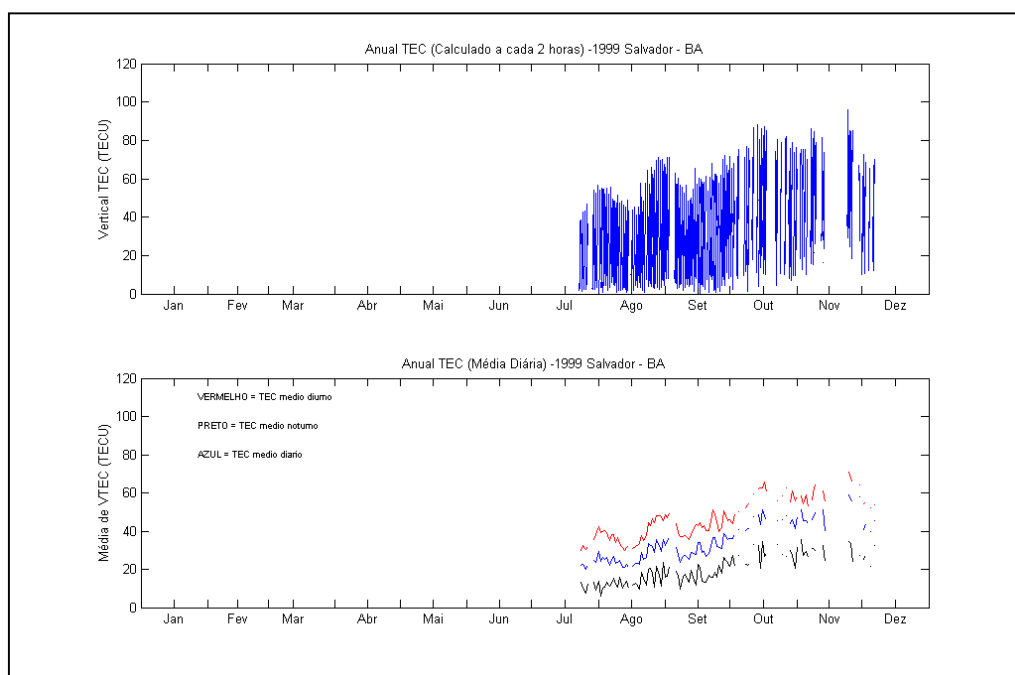


FIG. A43: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE SALVADOR - 1999

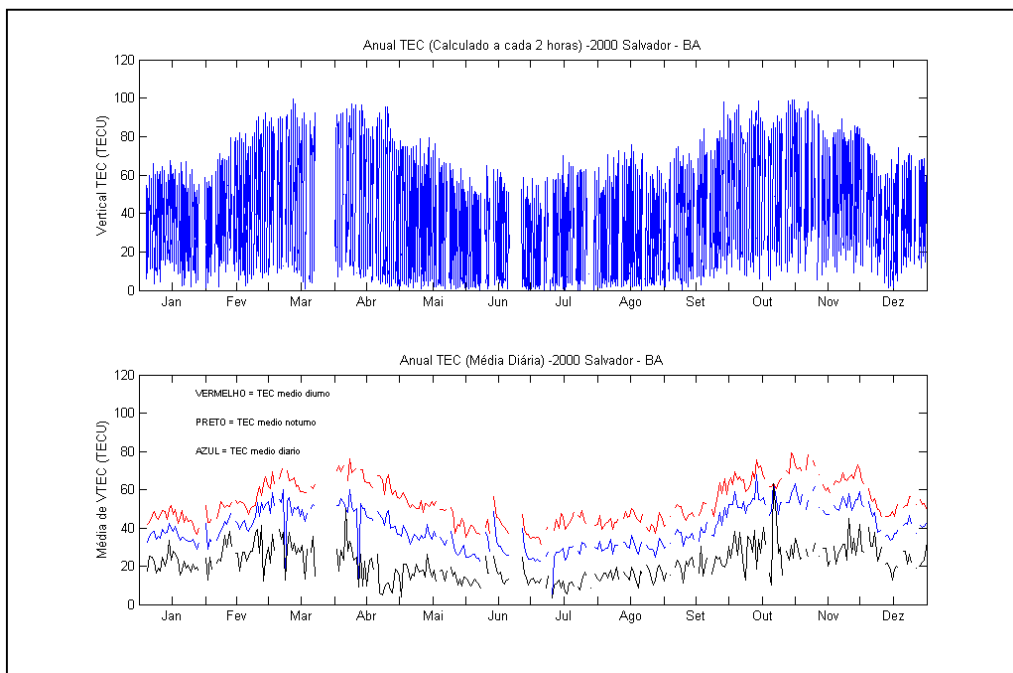


FIG. A44: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE SALVADOR – 2000

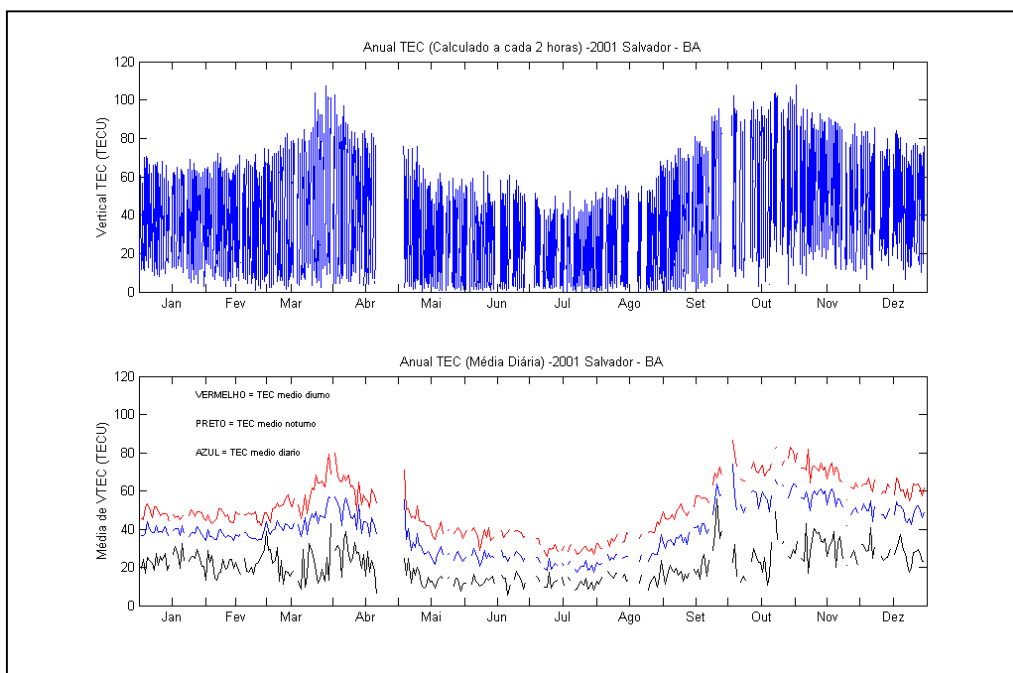


FIG. A45: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE SALVADOR – 2001

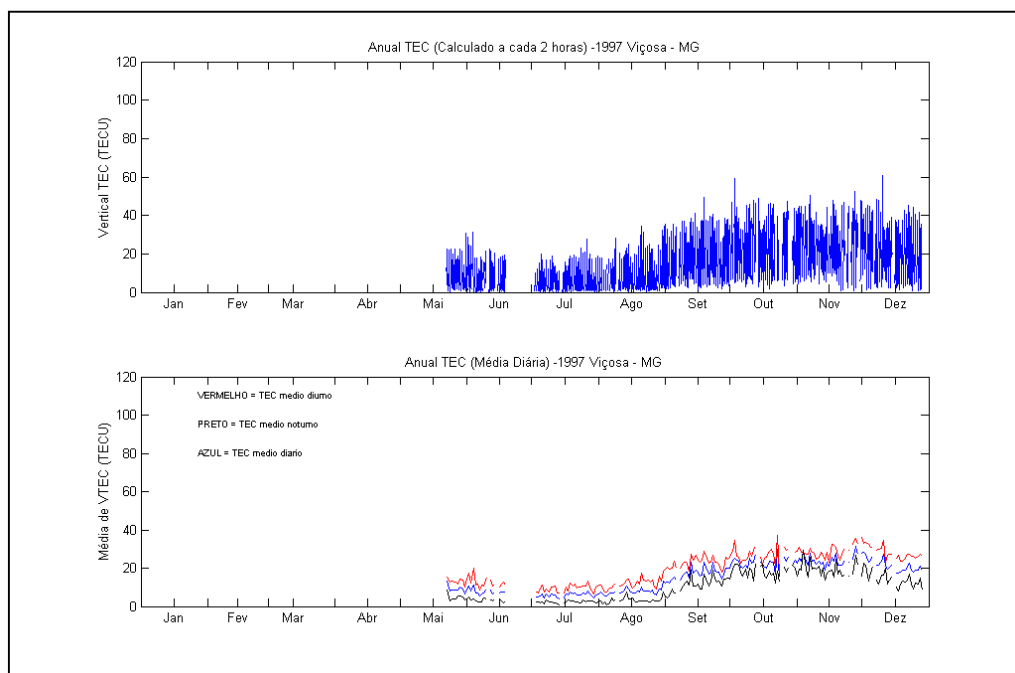


FIG. A46: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1997

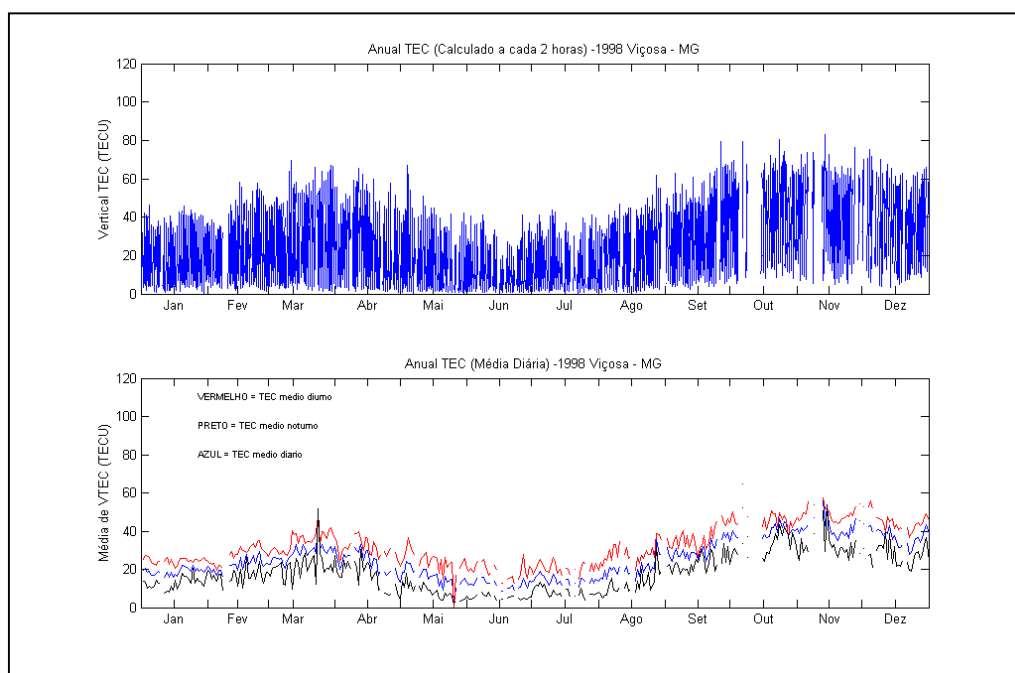


FIG. A47: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1998

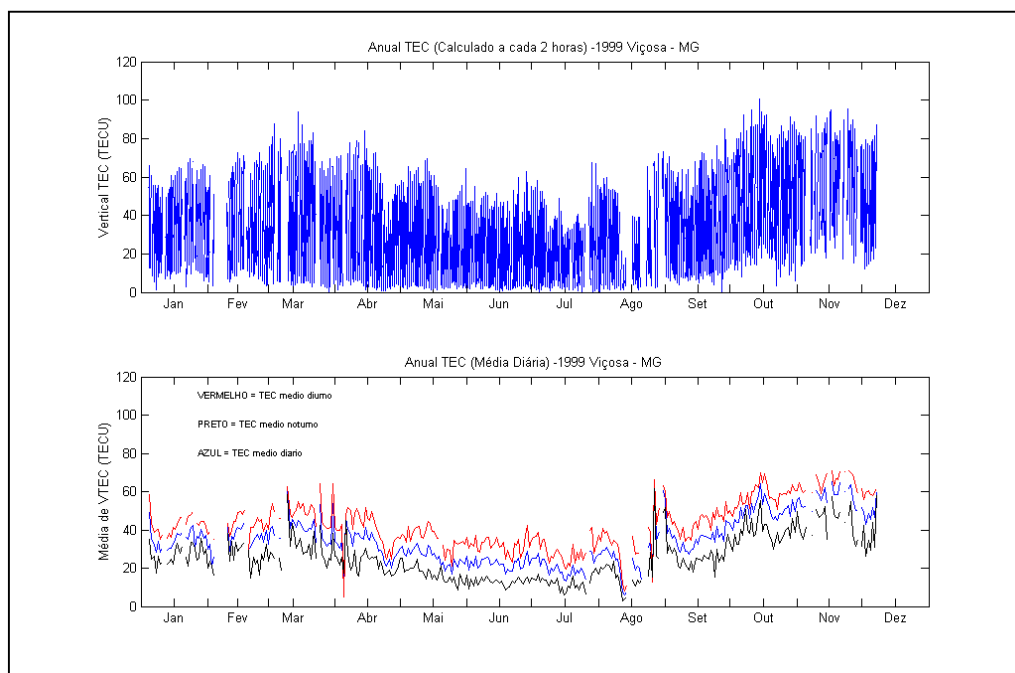


FIG. A48: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1999

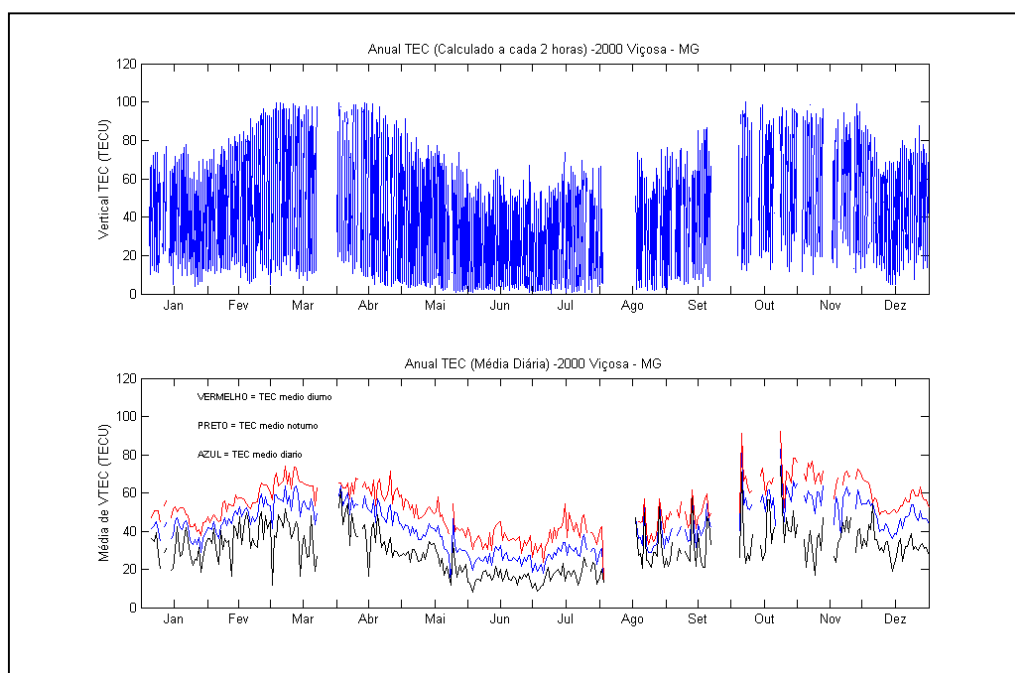


FIG. A49: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 2000

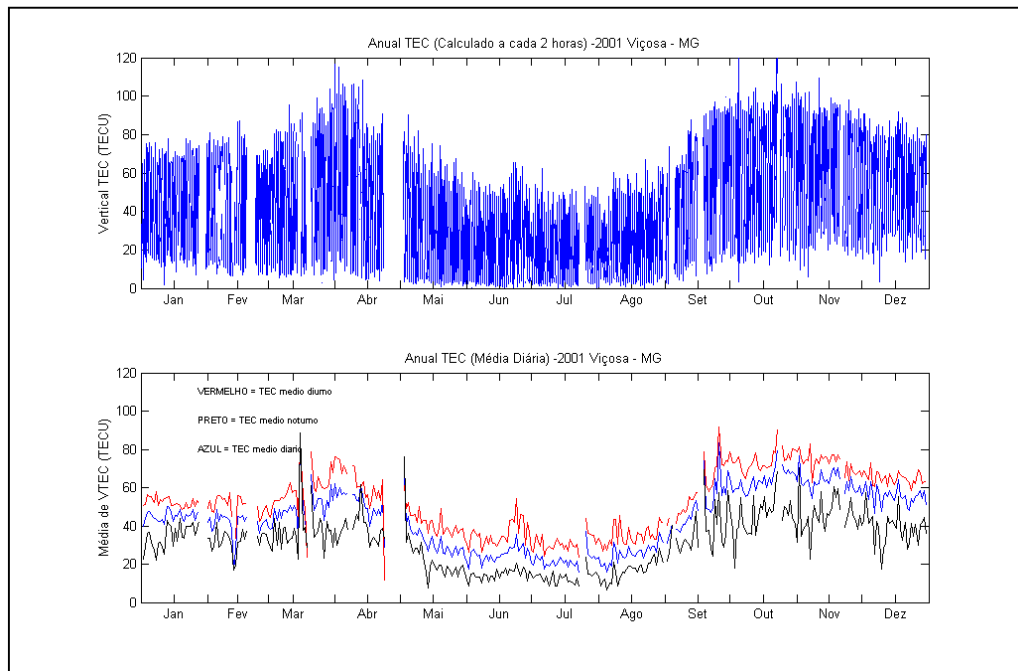


FIG. A50: VALORES CALCULADOS E VALORES MÉDIOS DO TEC NA ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 2001

## ANEXO B

A seguir são apresentadas as figuras dos gráficos dos perfis diários do TEC, de todas as estações da RBMC: Bom Jesus da Lapa - BA, Brasília - DF, Crato - CE, Cuiabá - MT, Curitiba - PR, Fortaleza - CE, Imperatriz - MA, Manaus - AM, Porto Alegre - RS, Recife - PE, Salvador - BA e Viçosa - MG.

Em todas as figuras são observados doze gráficos; os mesmos representam o perfil diário do TEC gerados mês a mês.

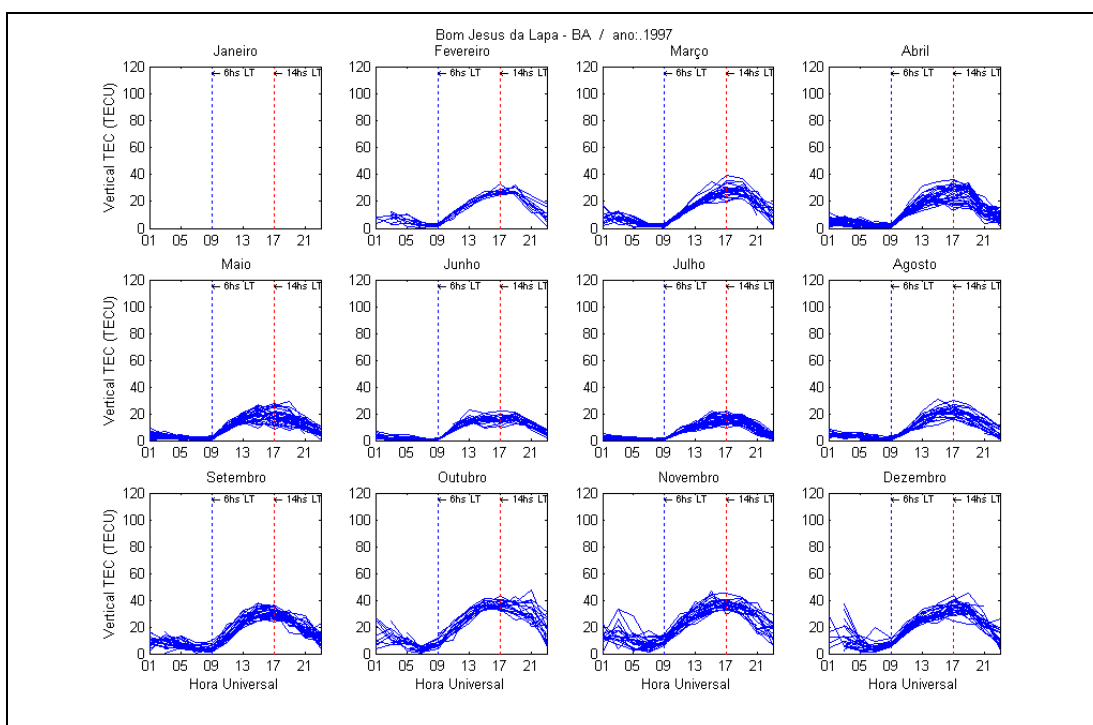


FIG. B1: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 1997



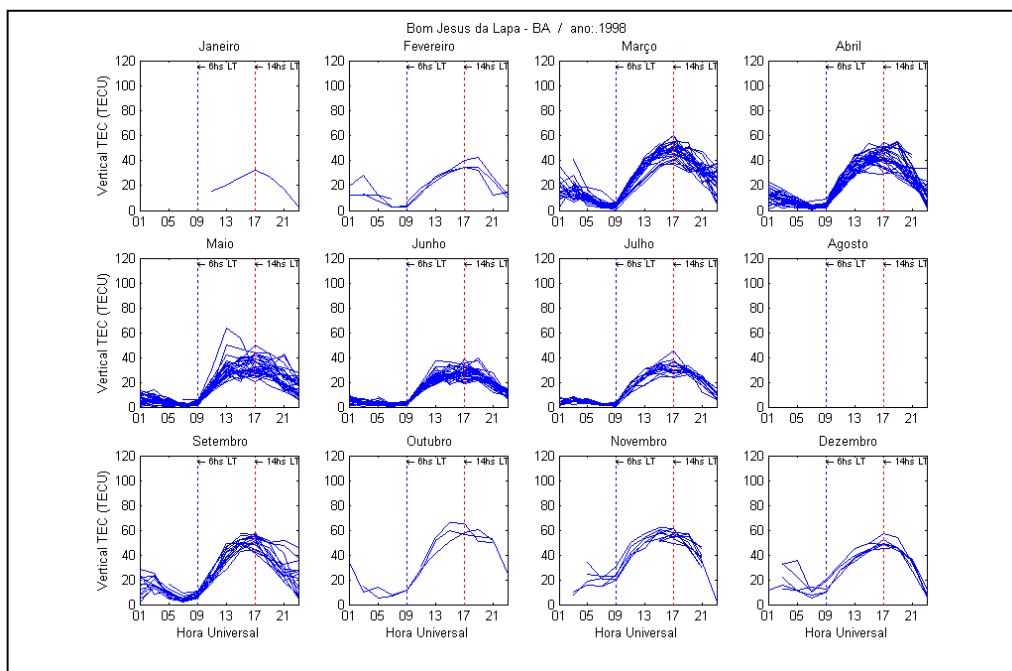


FIG. B2: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 1998

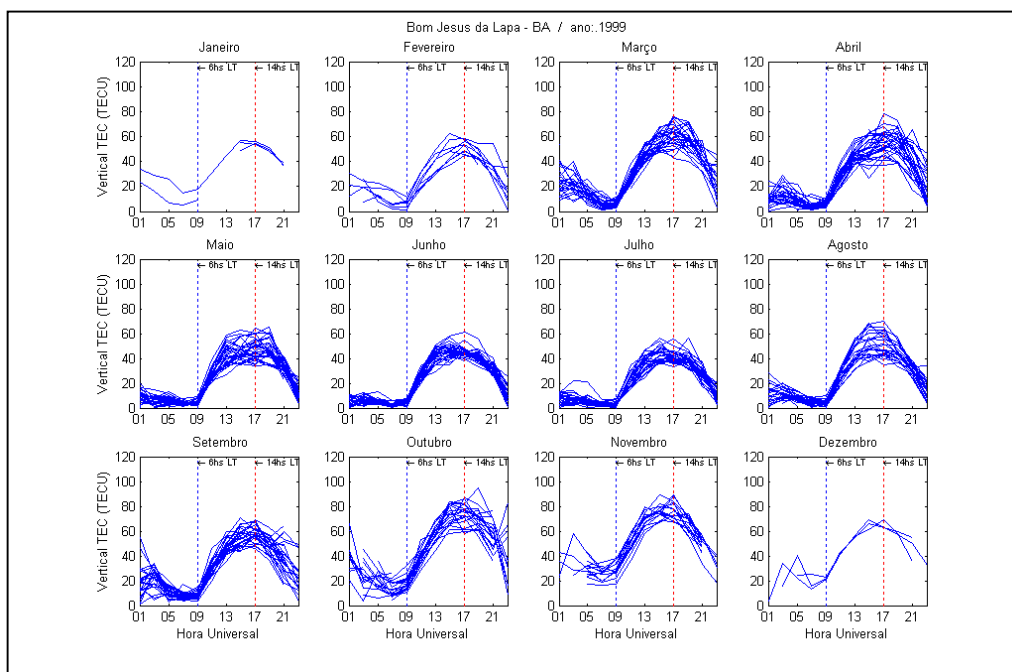


FIG. B3: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 1999

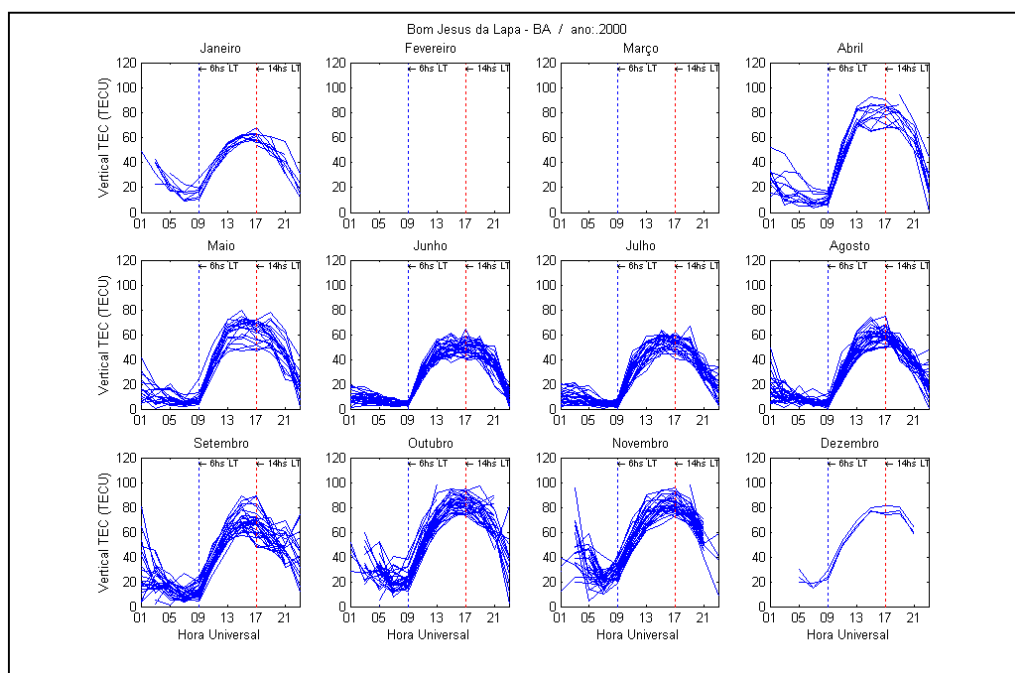


FIG. B4: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 2000

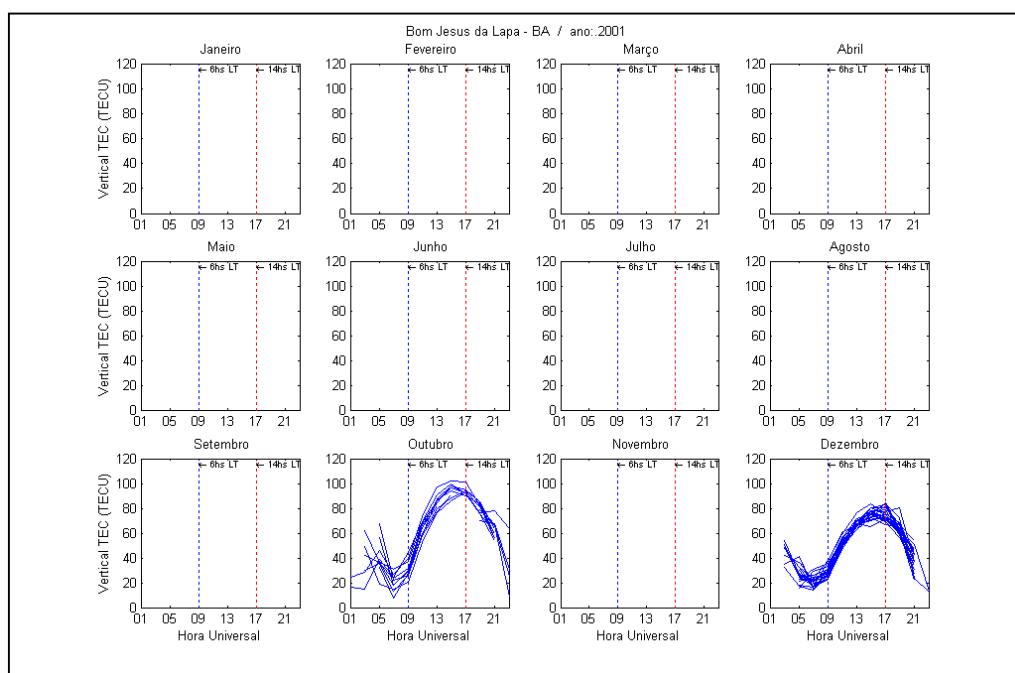


FIG. B5: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BOM JESUS DA LAPA - 2001

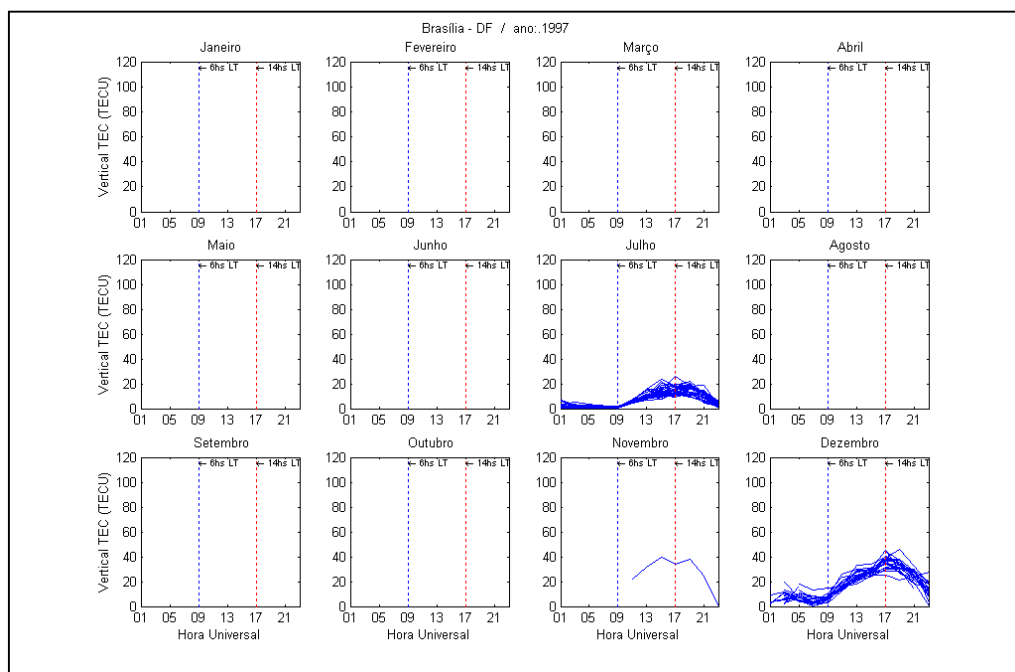


FIG. B6: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 1997

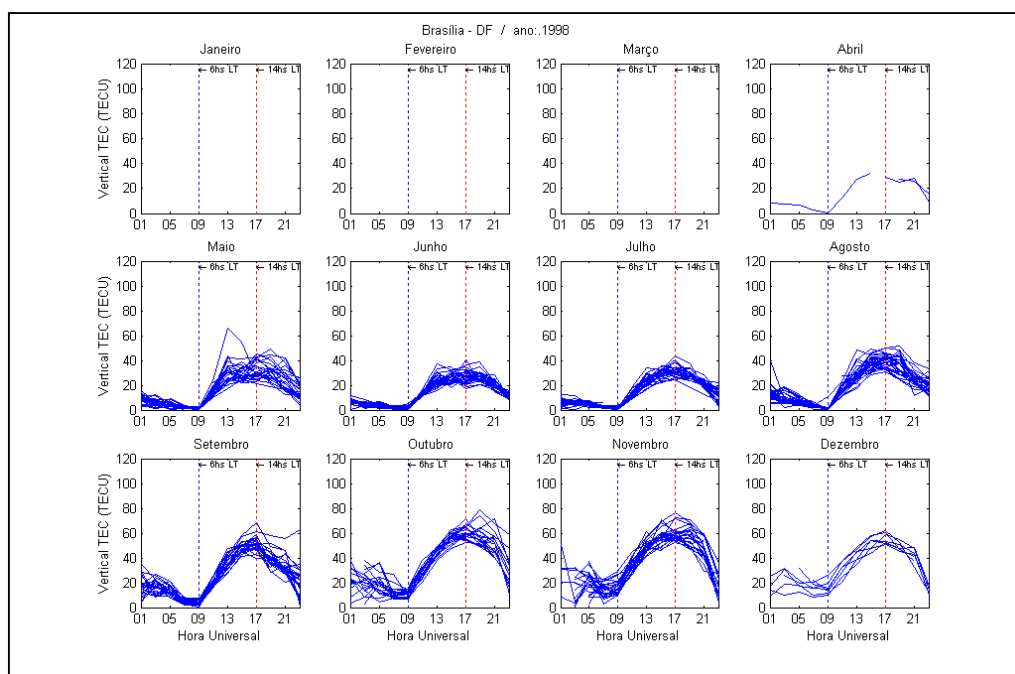


FIG. B7: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 1998

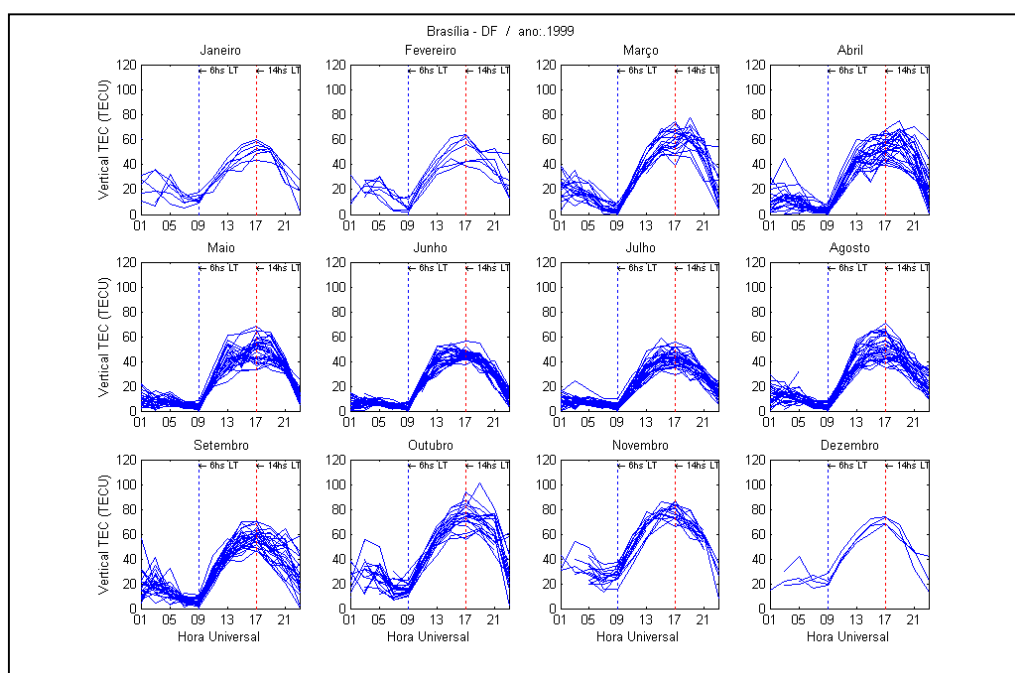


FIG. B8: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 1999

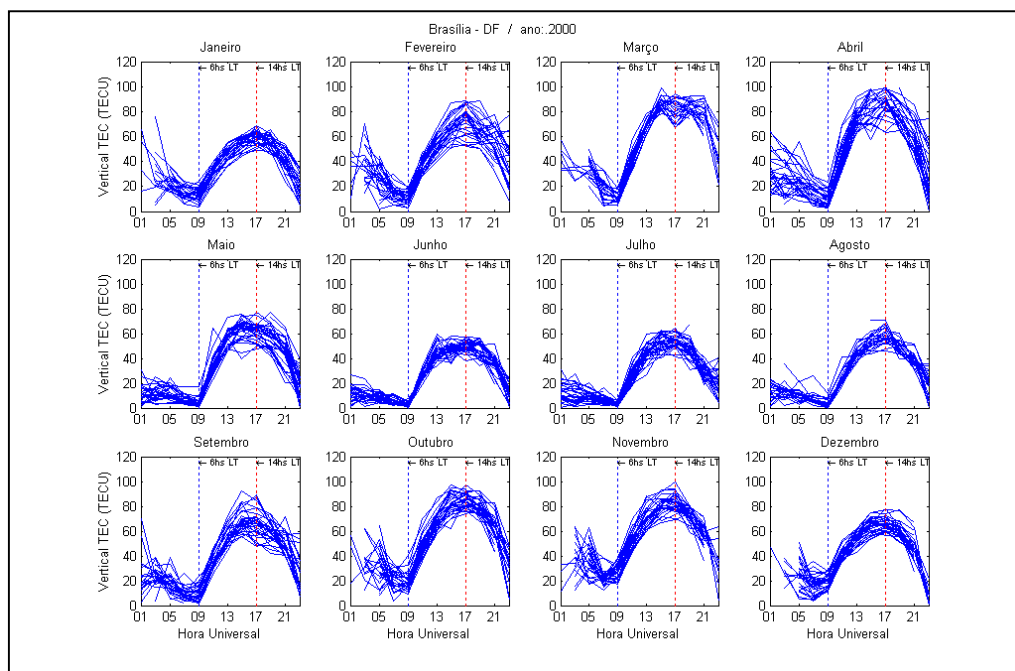


FIG. B9: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 2000

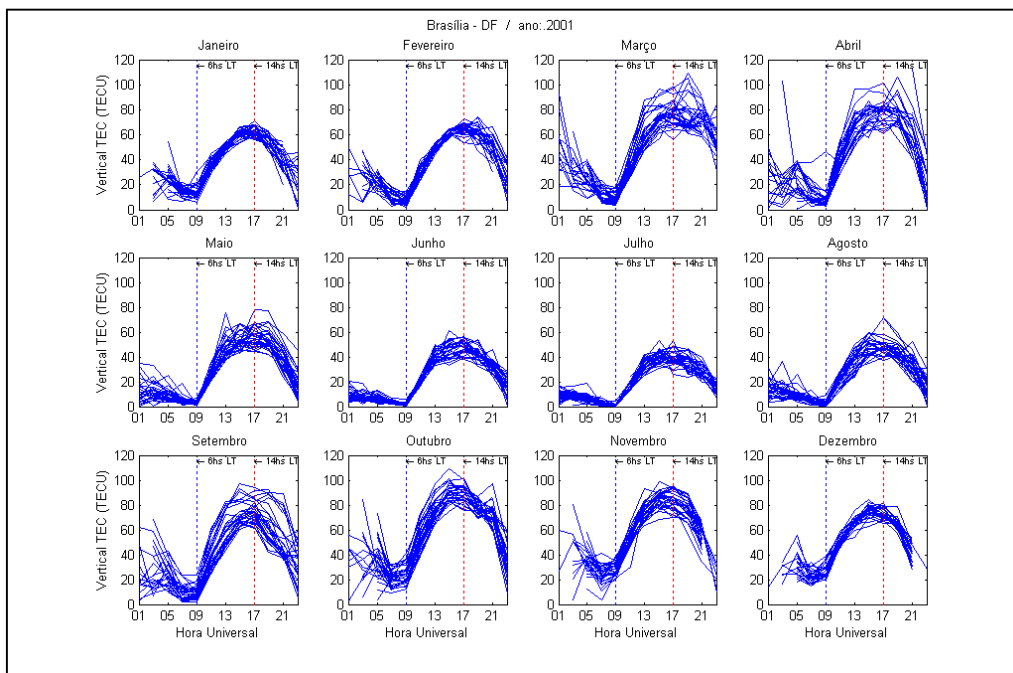


FIG. B10: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE BRASÍLIA - 2001

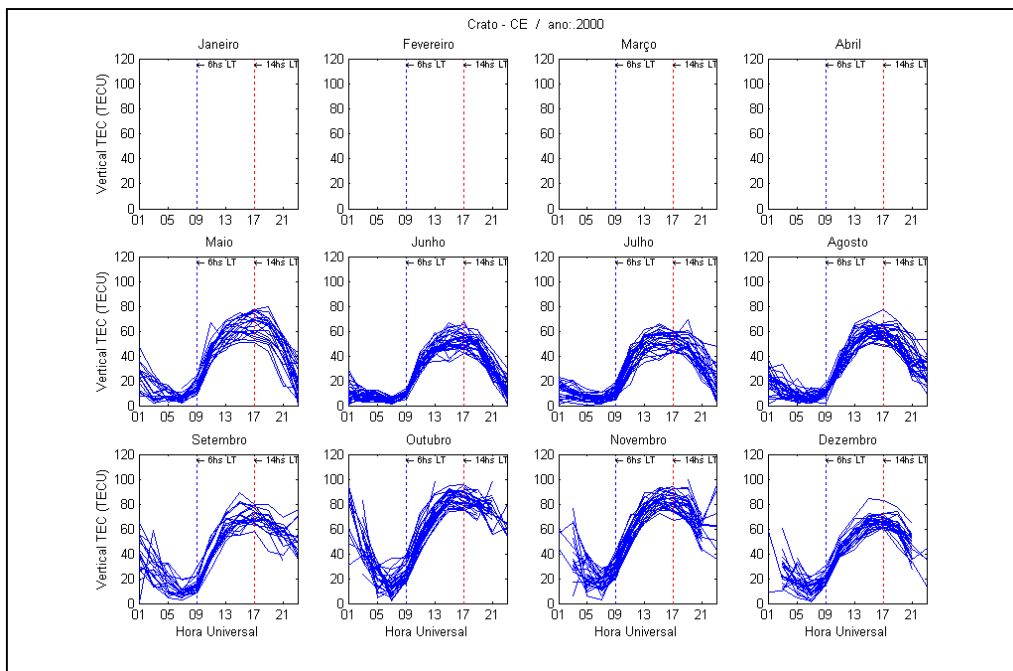


FIG. B11: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CRATO - 2000

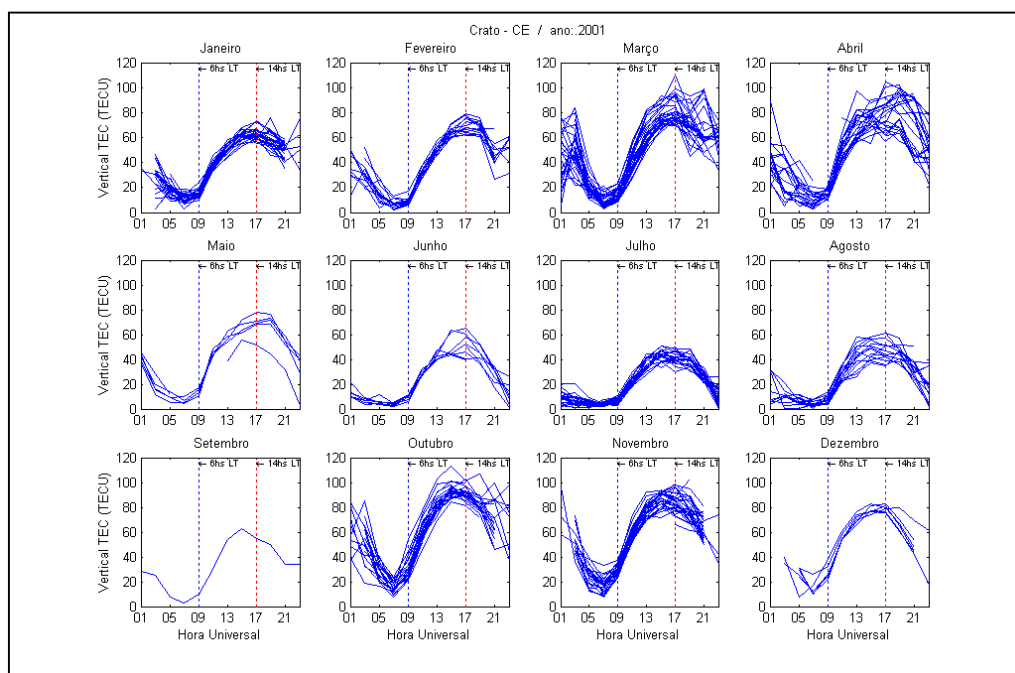


FIG. B12: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CRATO - 2001

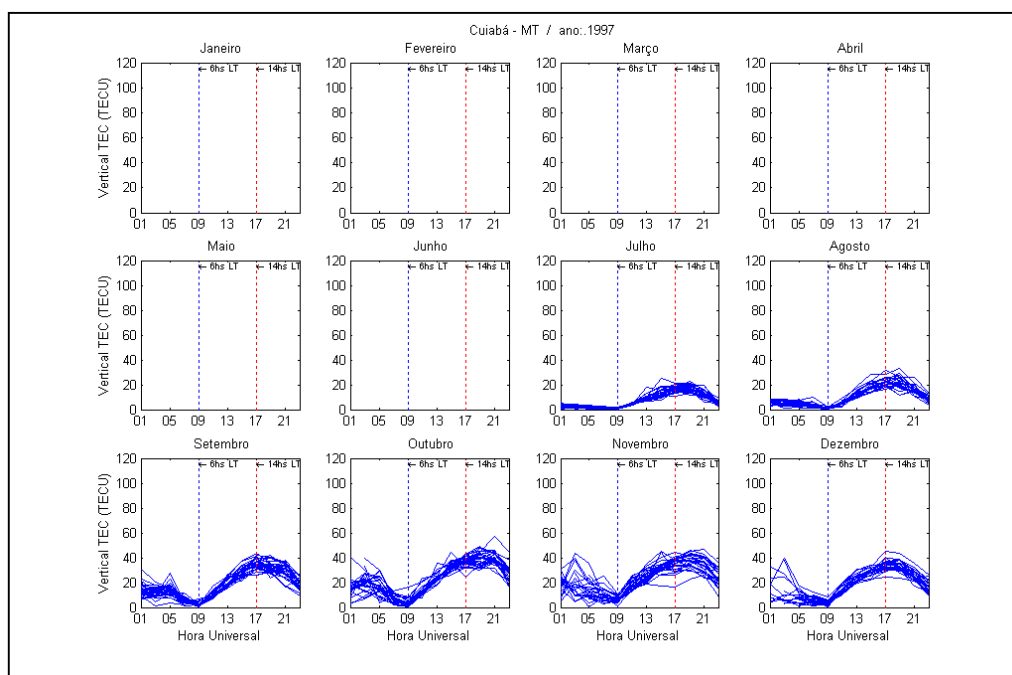


FIG. B13: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - 1997

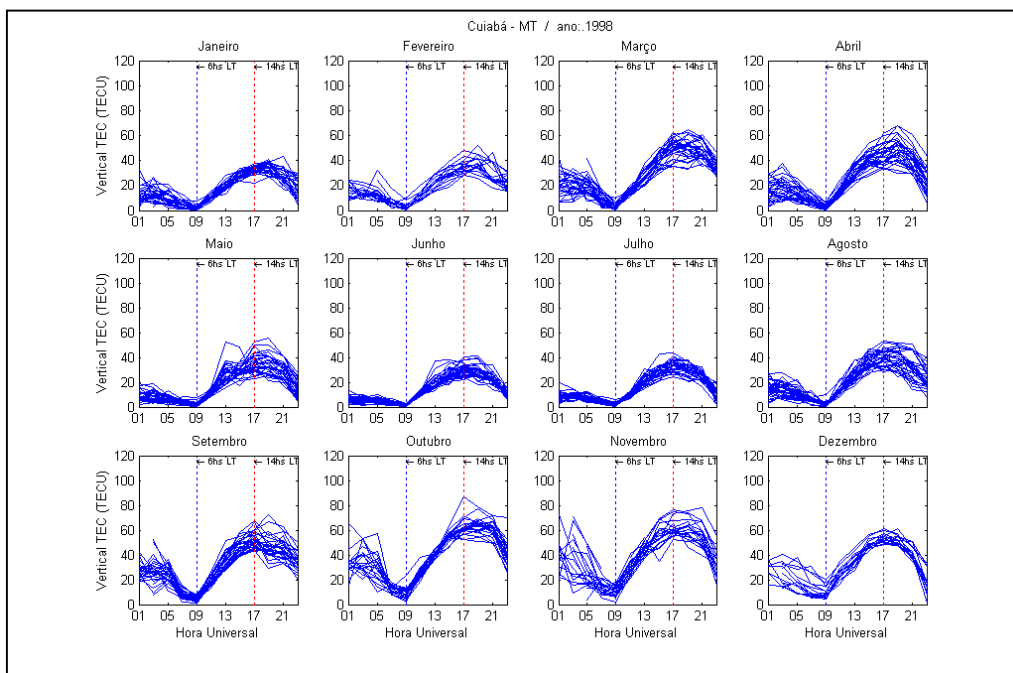


FIG. B14: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - 1998

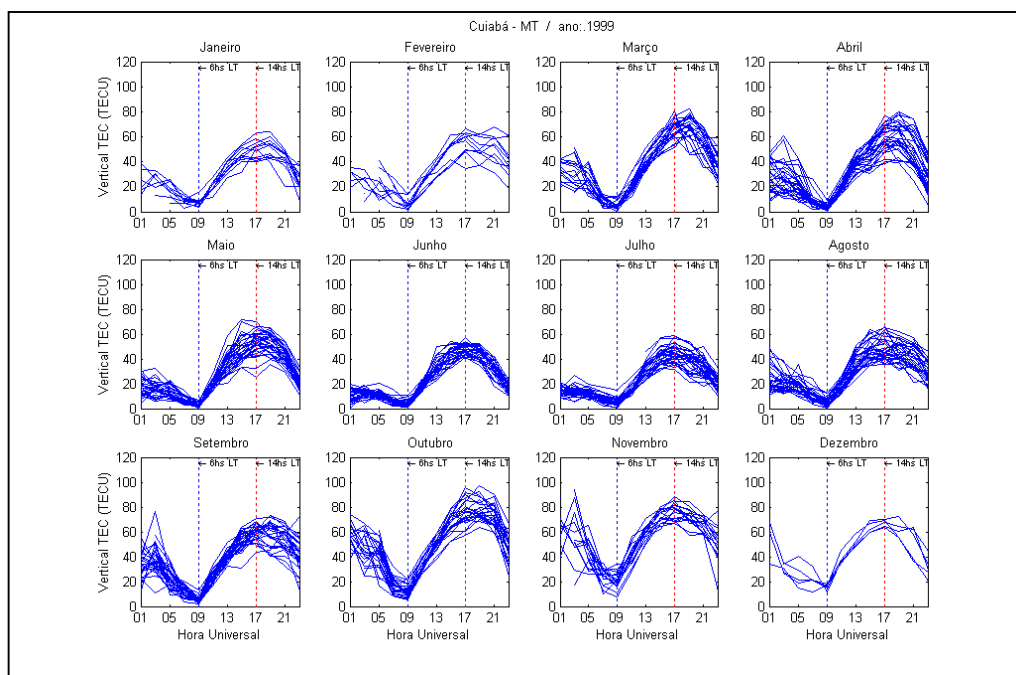


FIG. B15: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - 1999

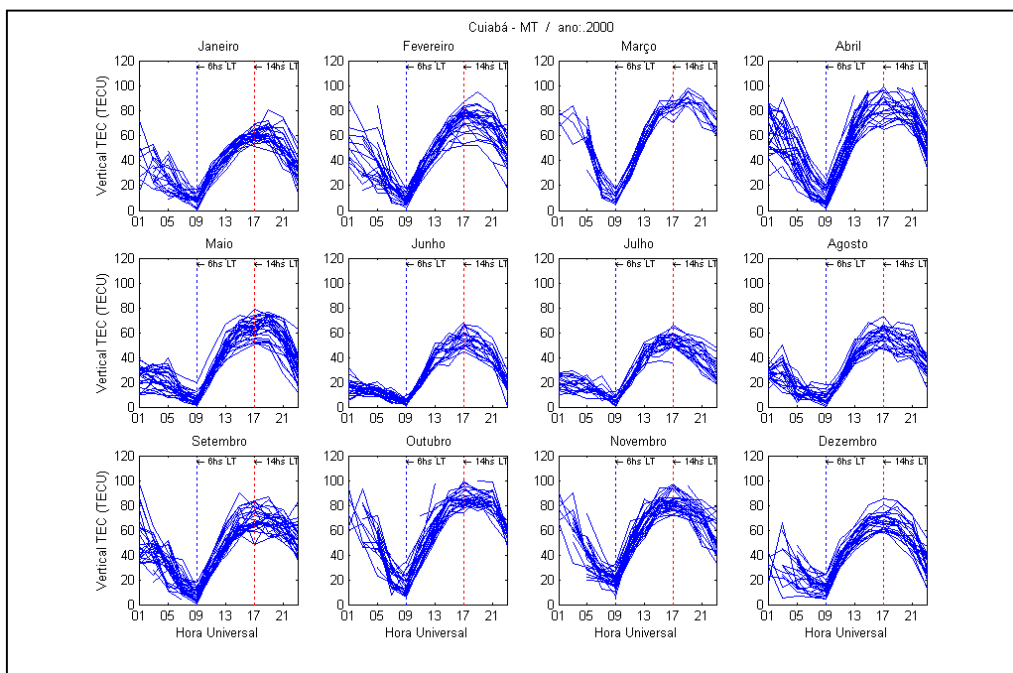


FIG. B16: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - 2000

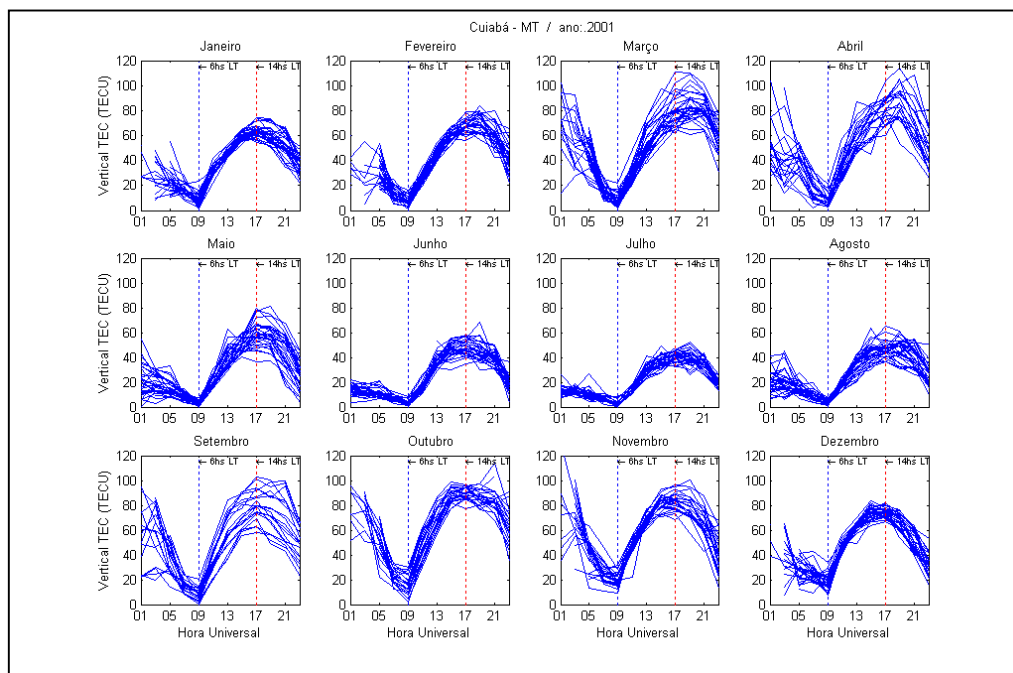


FIG. B17: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CUIABÁ - 2001



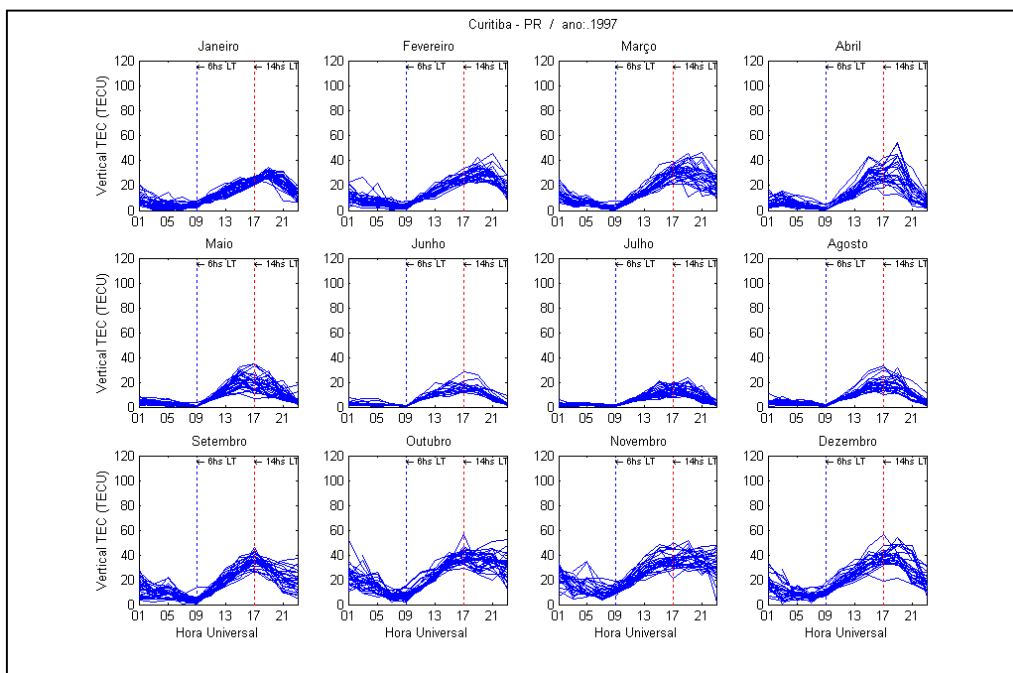


FIG. B18: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA - 1997

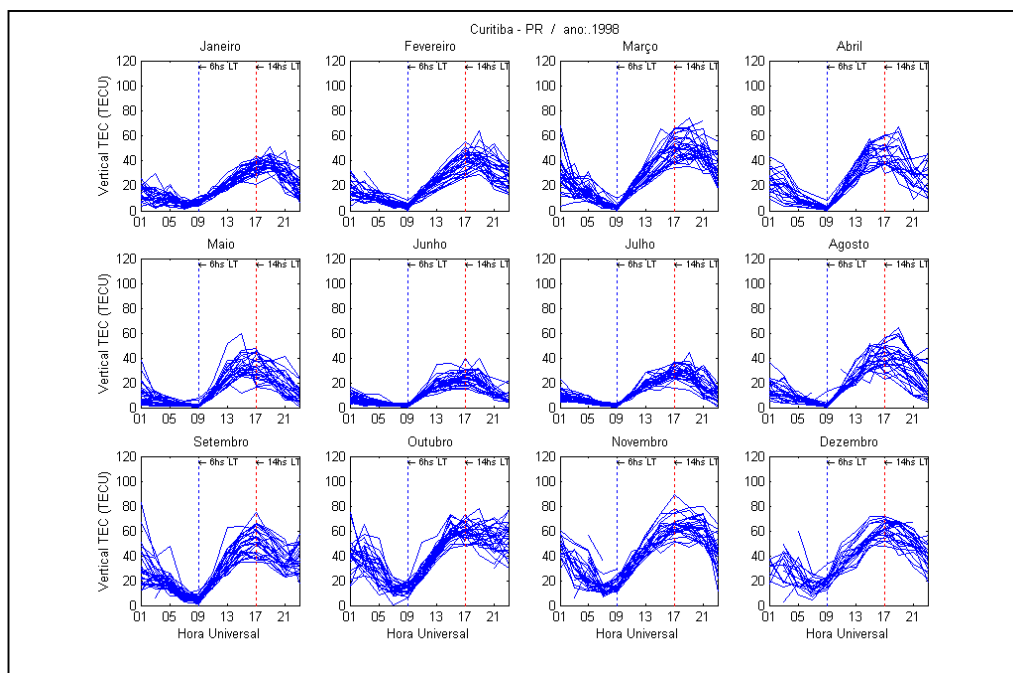


FIG. B19: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA - 1998

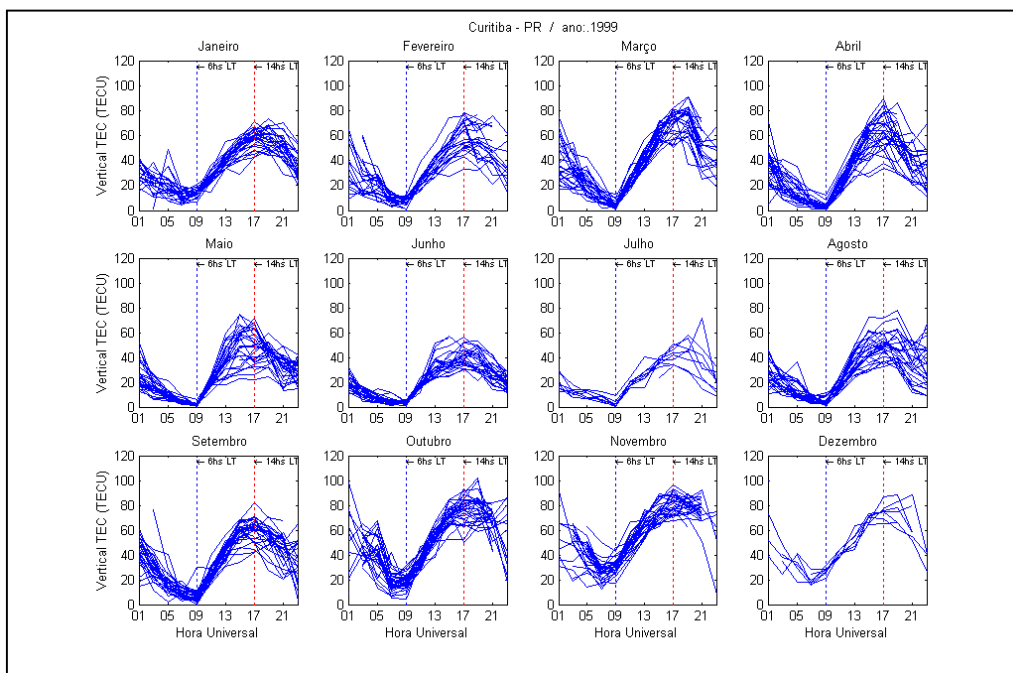


FIG. B20: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA - 1999

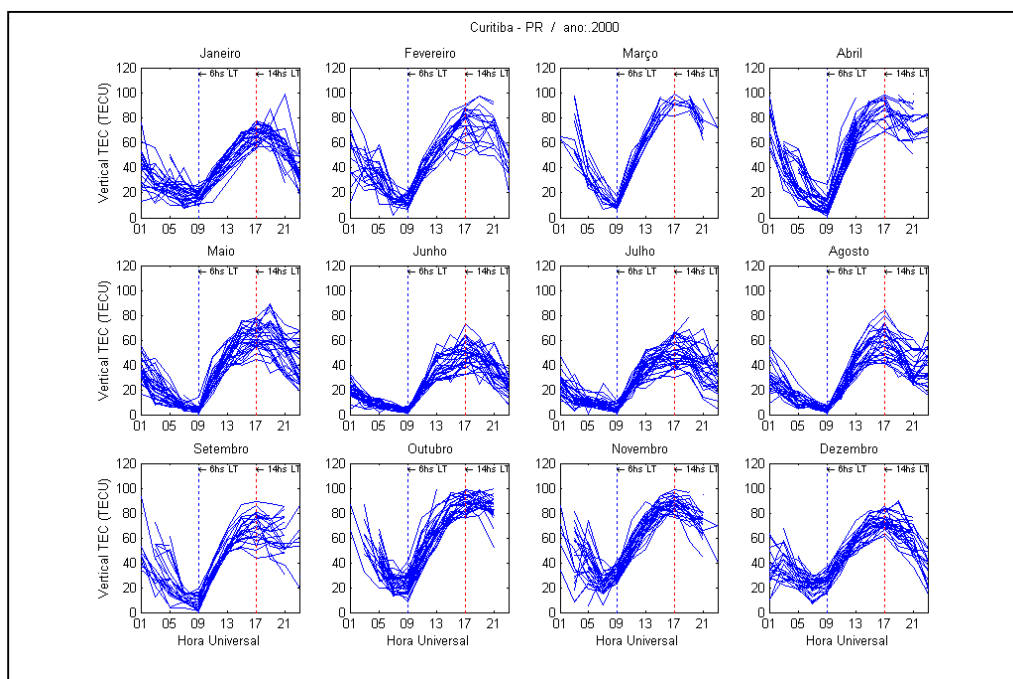


FIG. B21: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA - 2000

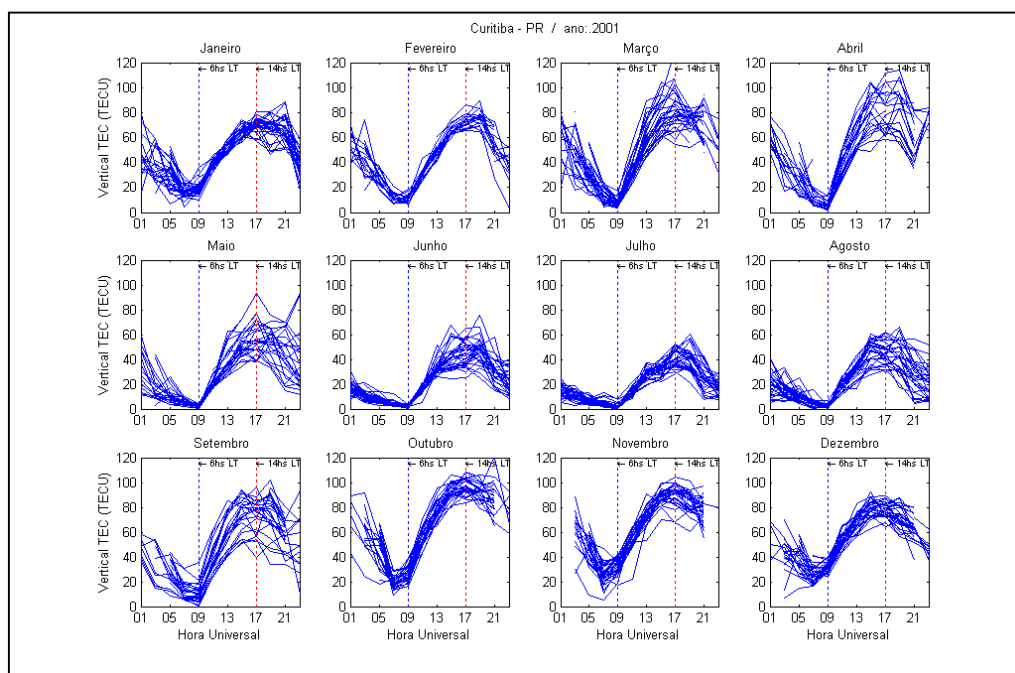


FIG. B22: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE CURITIBA – 2001

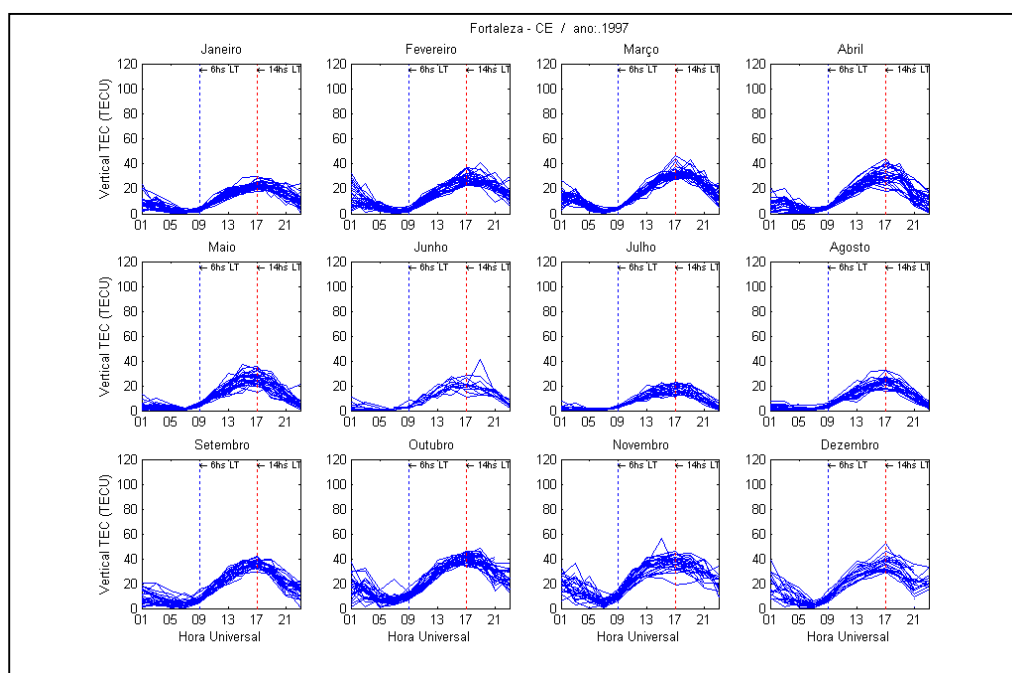


FIG. B23: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA –

1997

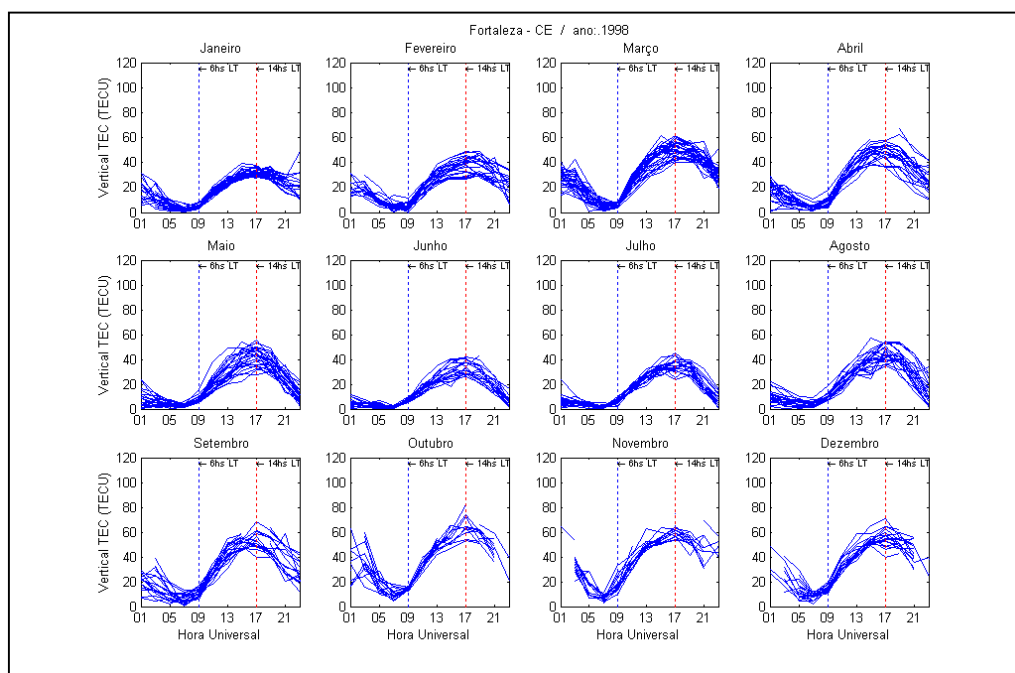


FIG. B24: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 1998

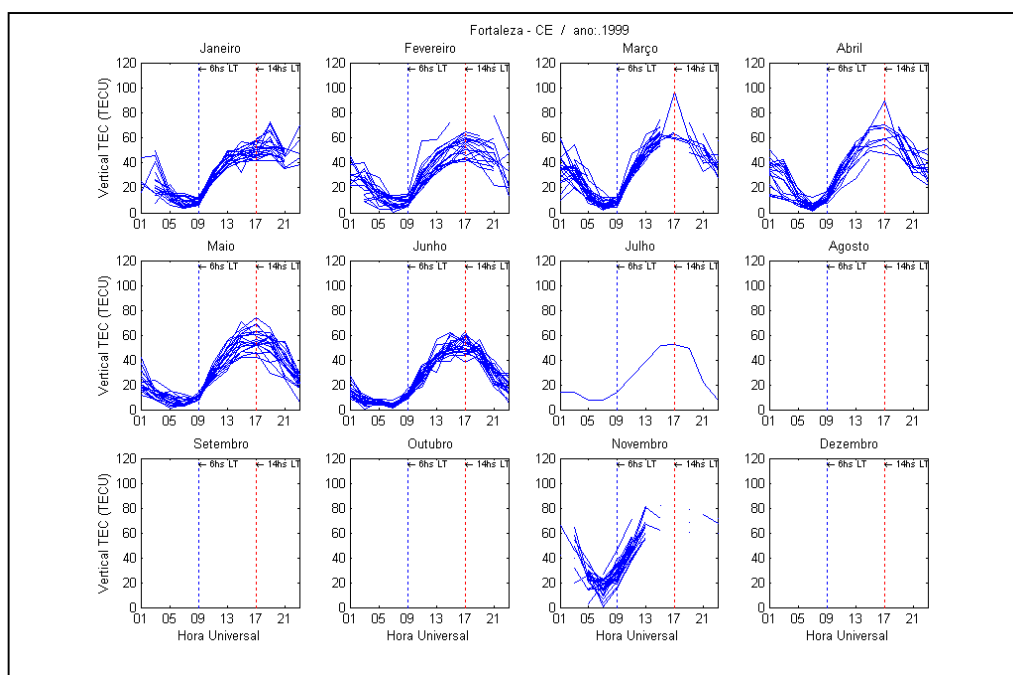


FIG. B25: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 1999

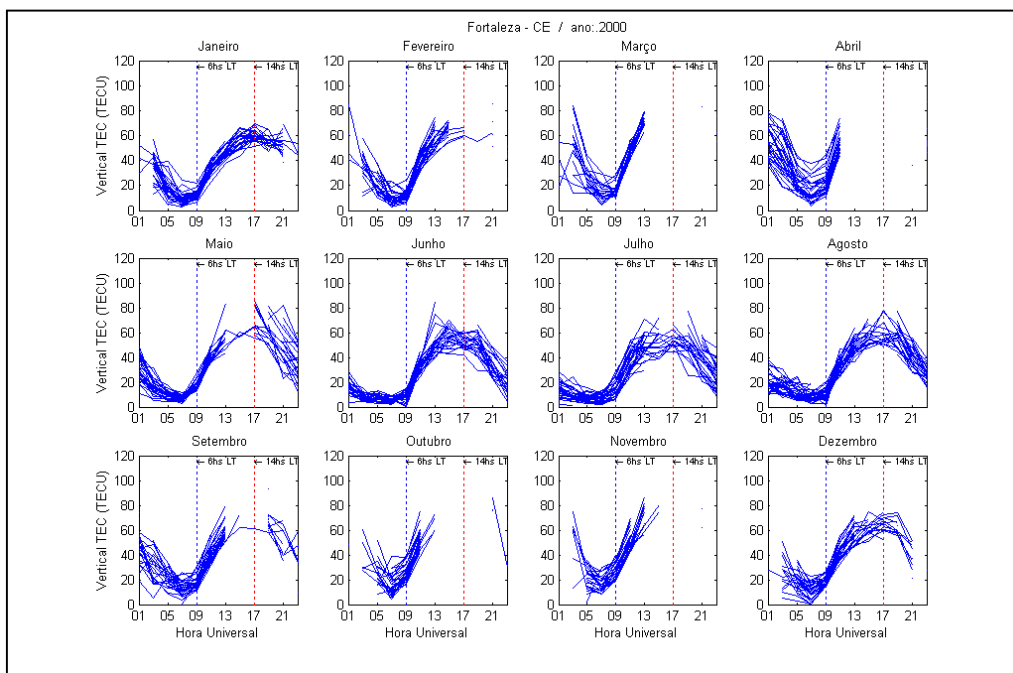


FIG. B26: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 2000

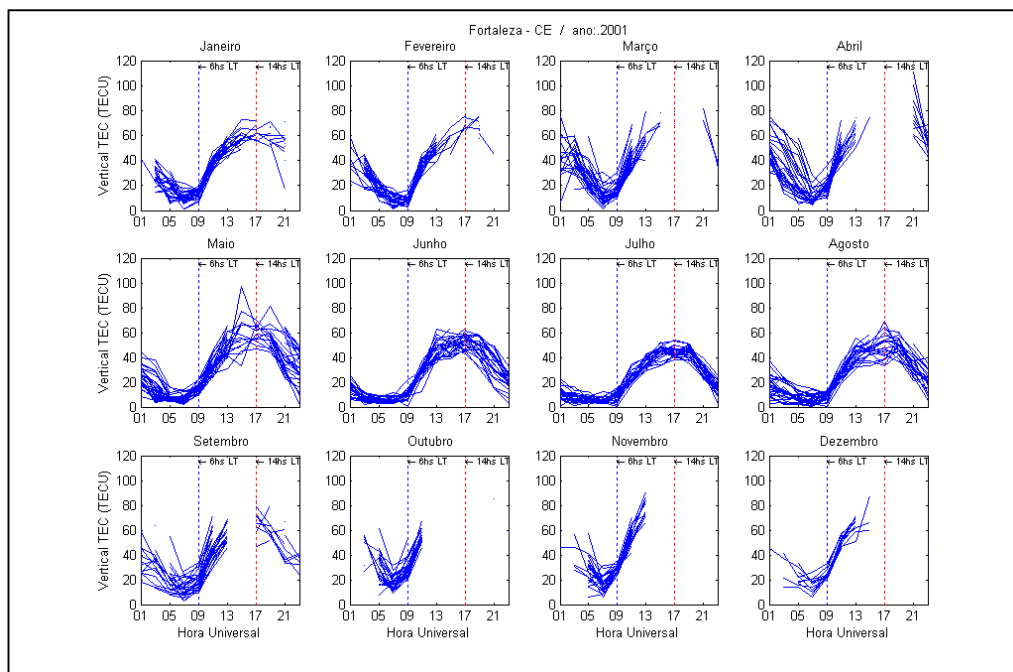


FIG. B27: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE FORTALEZA – 2001

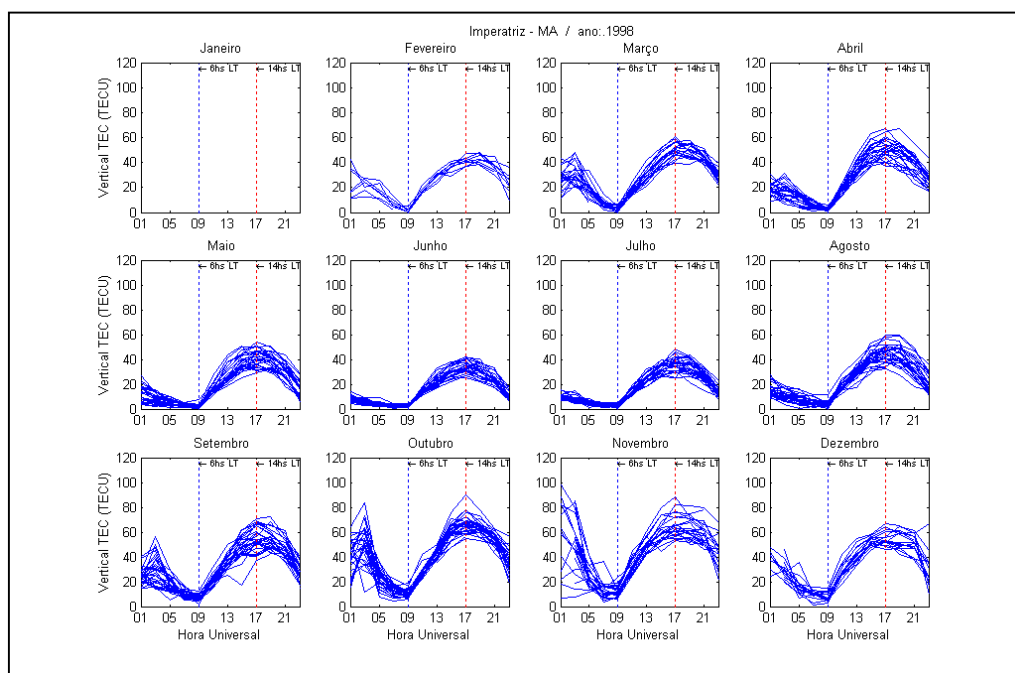


FIG. B28: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 1998

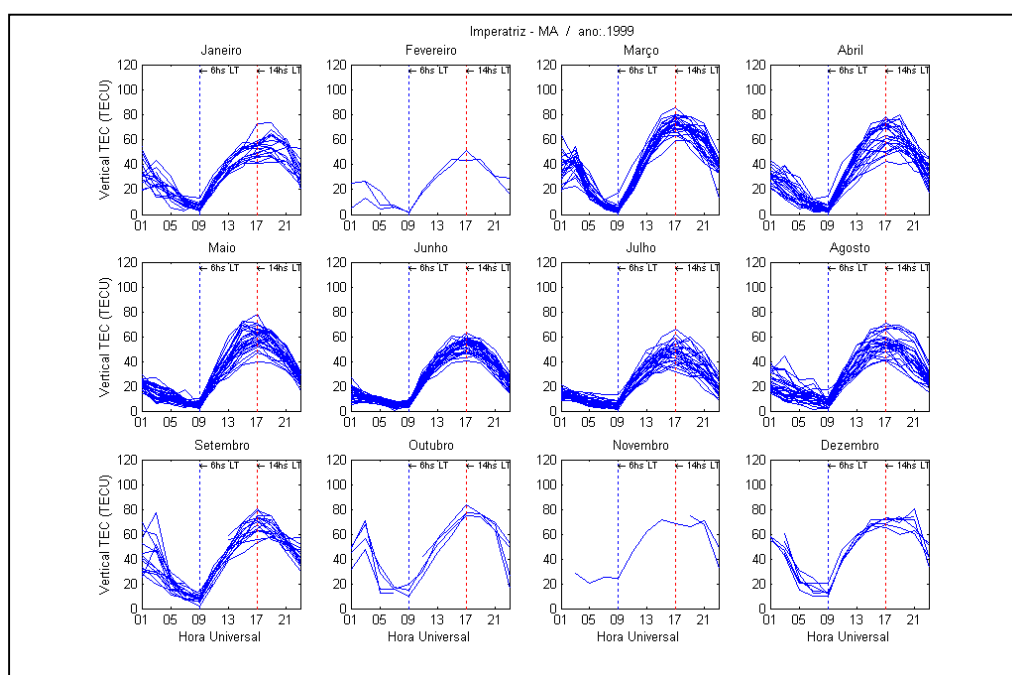


FIG. B29: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 1999

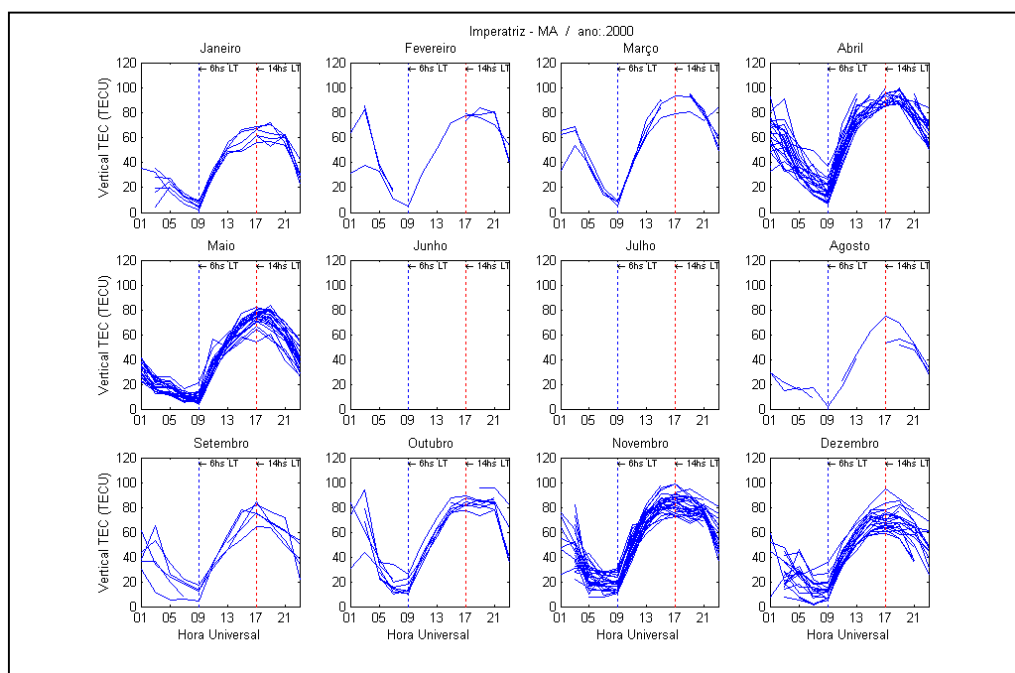


FIG. B30: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 2000

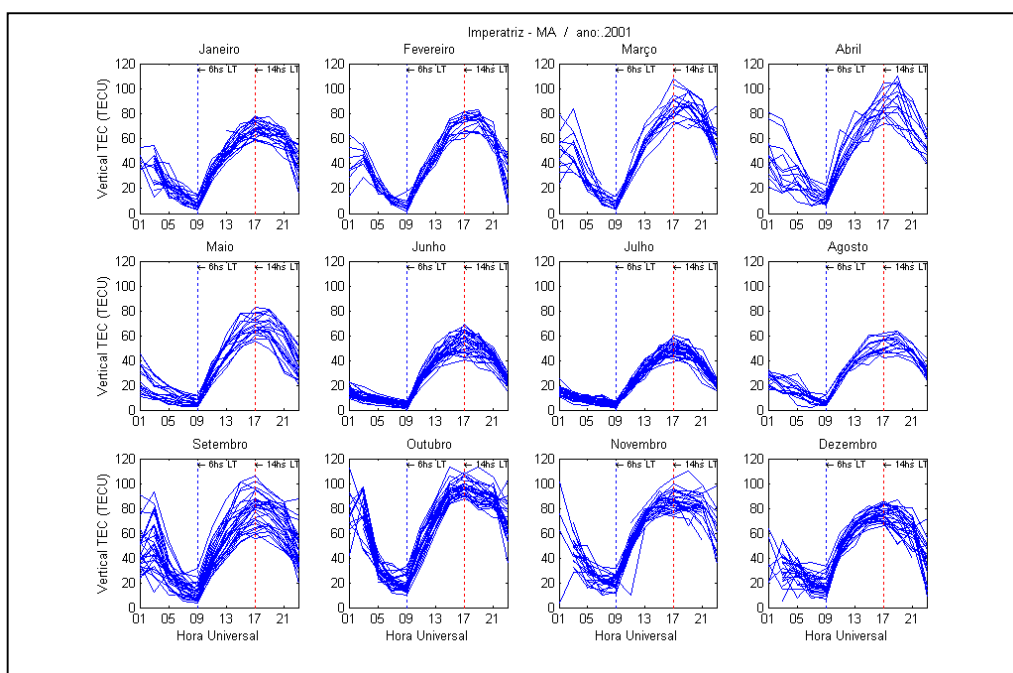


FIG. B31: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE IMPERATRIZ – 2001

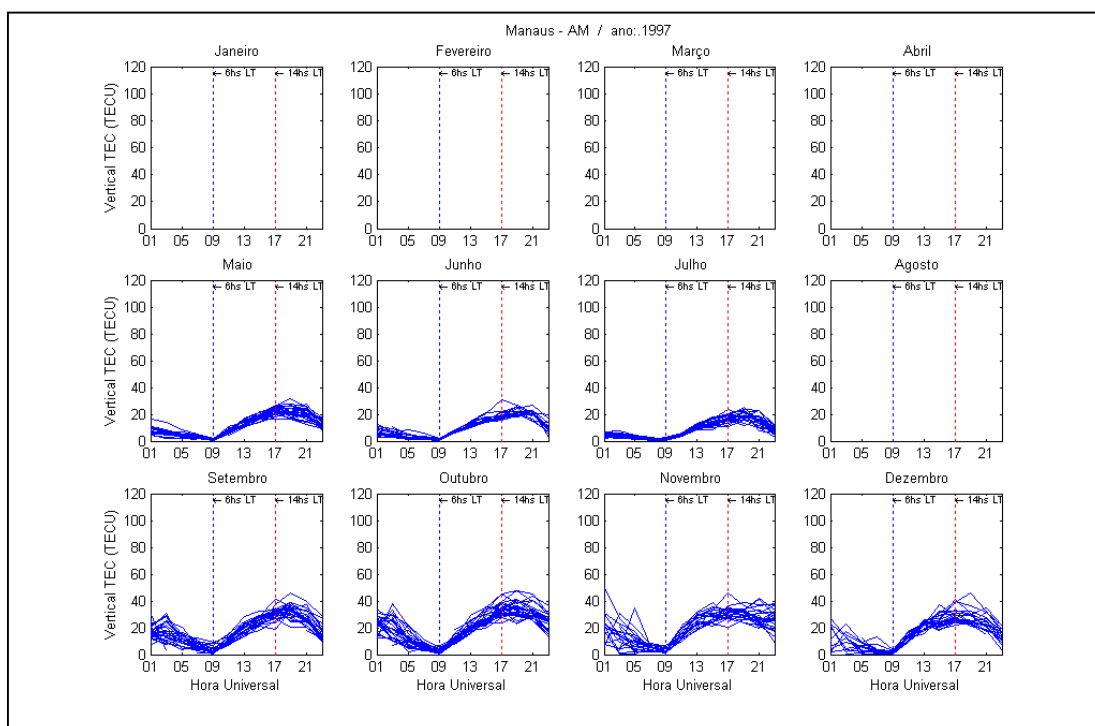


FIG. B32: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – 1997

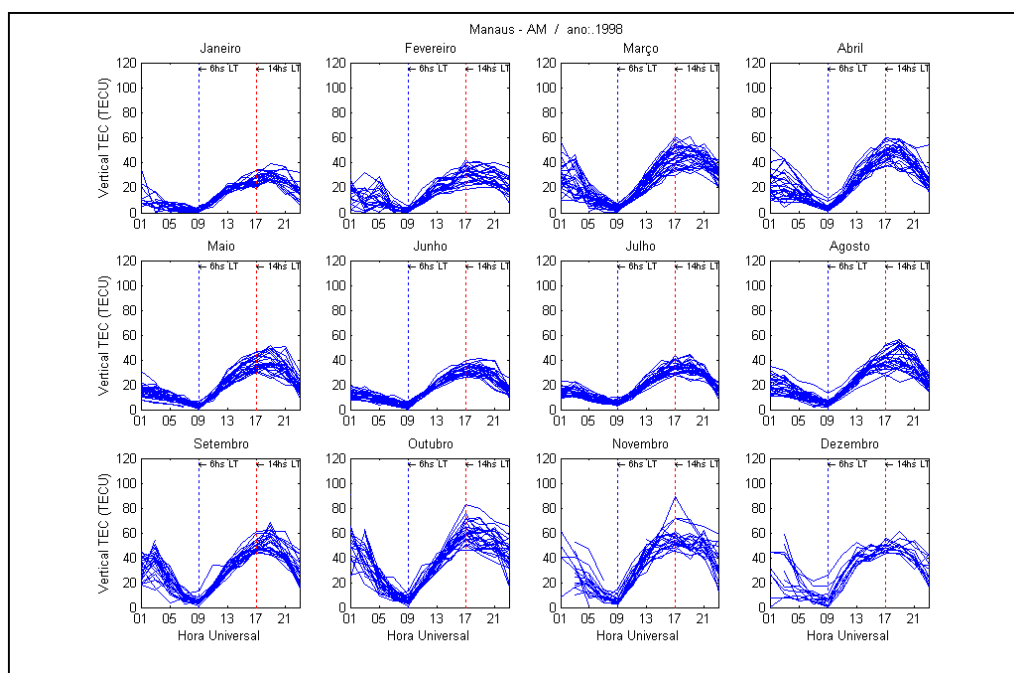


FIG. B33: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – 1998



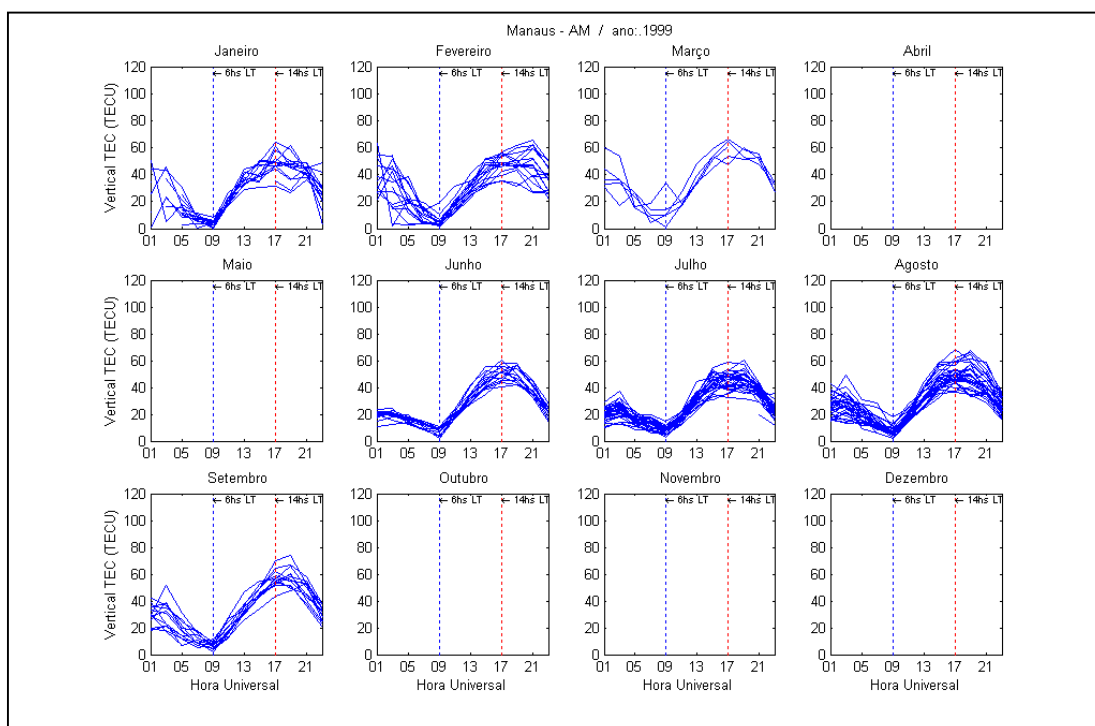


FIG. B34: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – 1999

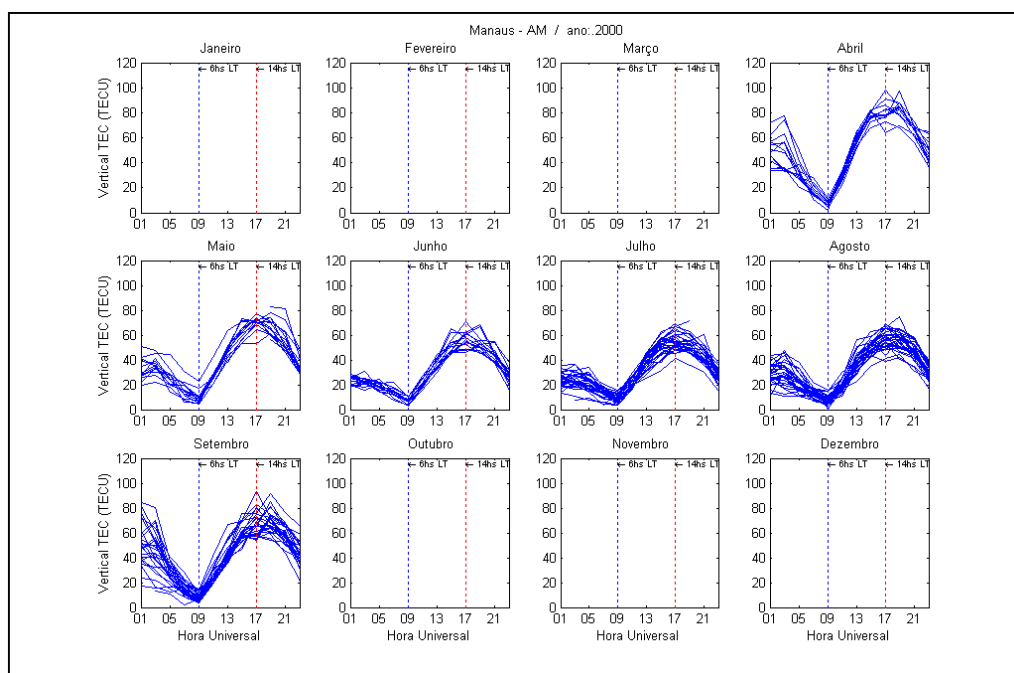


FIG. B35: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – 2000

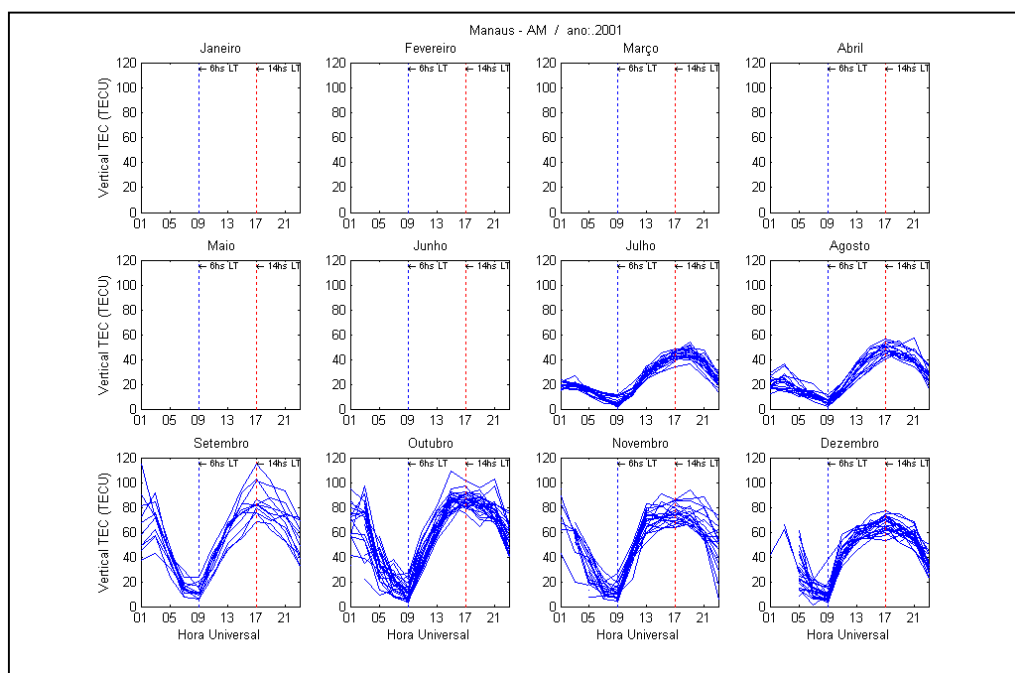


FIG. B36: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE MANAUS – 2001

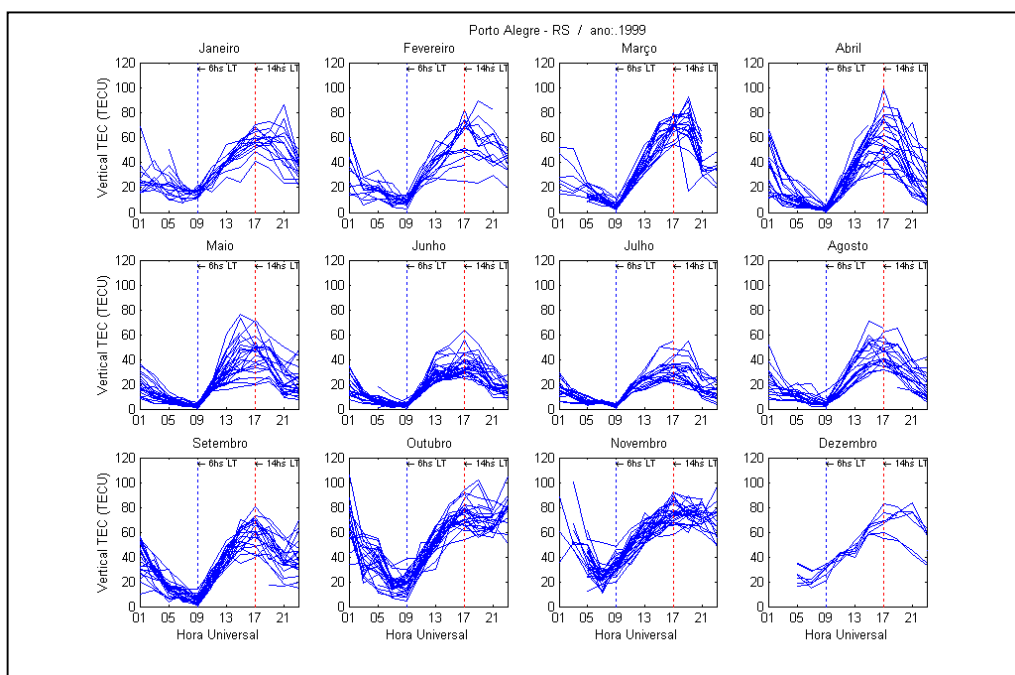


FIG. B37: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE

- 1999

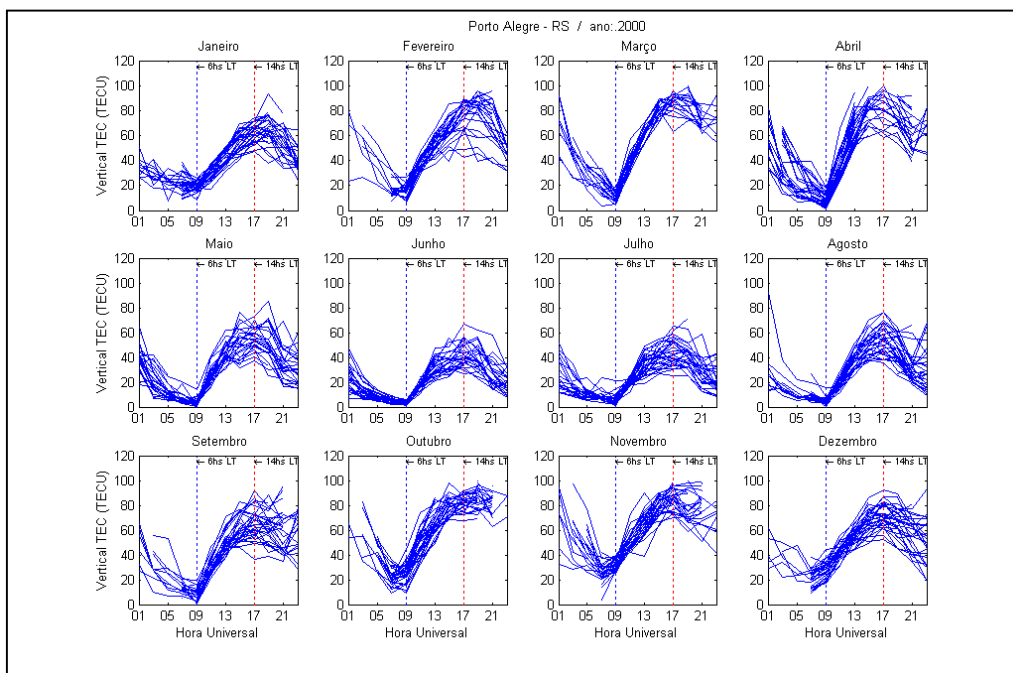


FIG. B38: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE - 2000

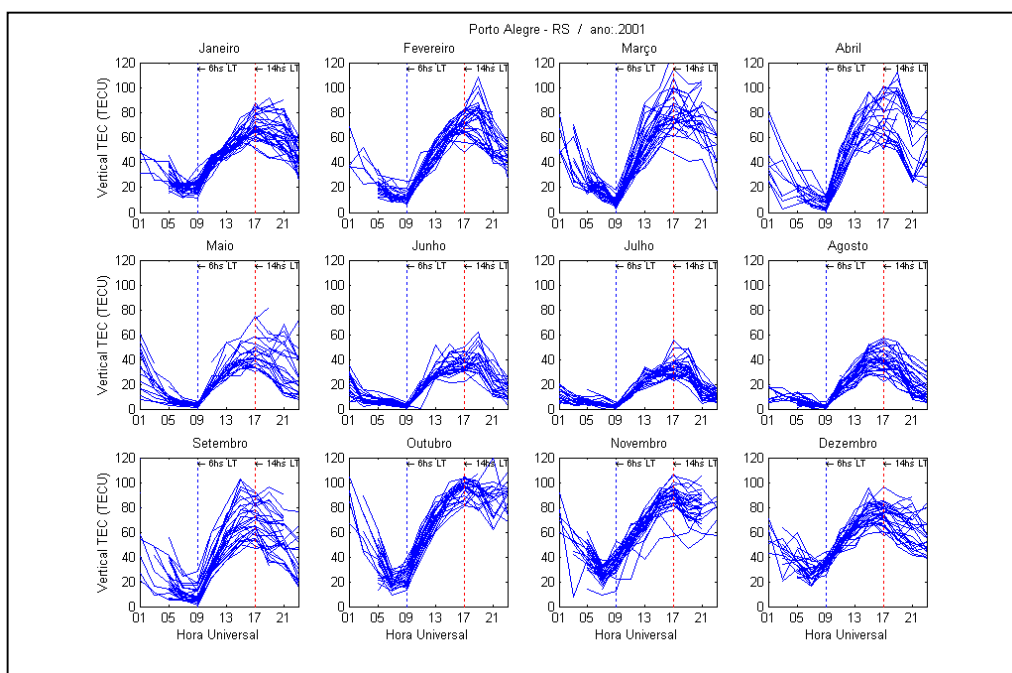


FIG. B39: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE PORTO ALEGRE - 2001

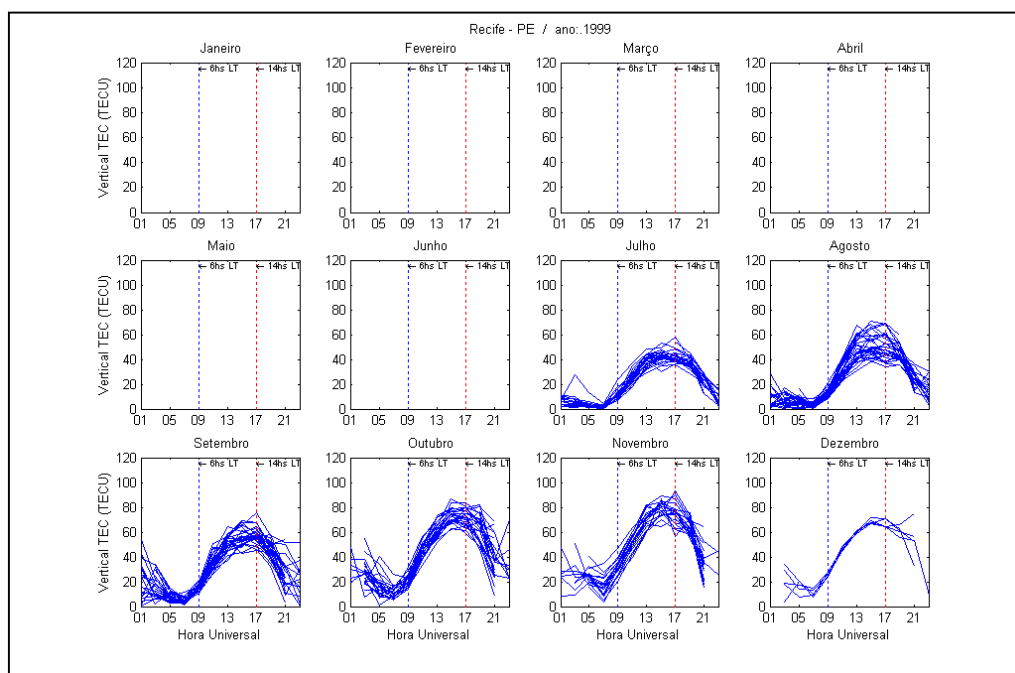


FIG. B40: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE RECIFE – 1999

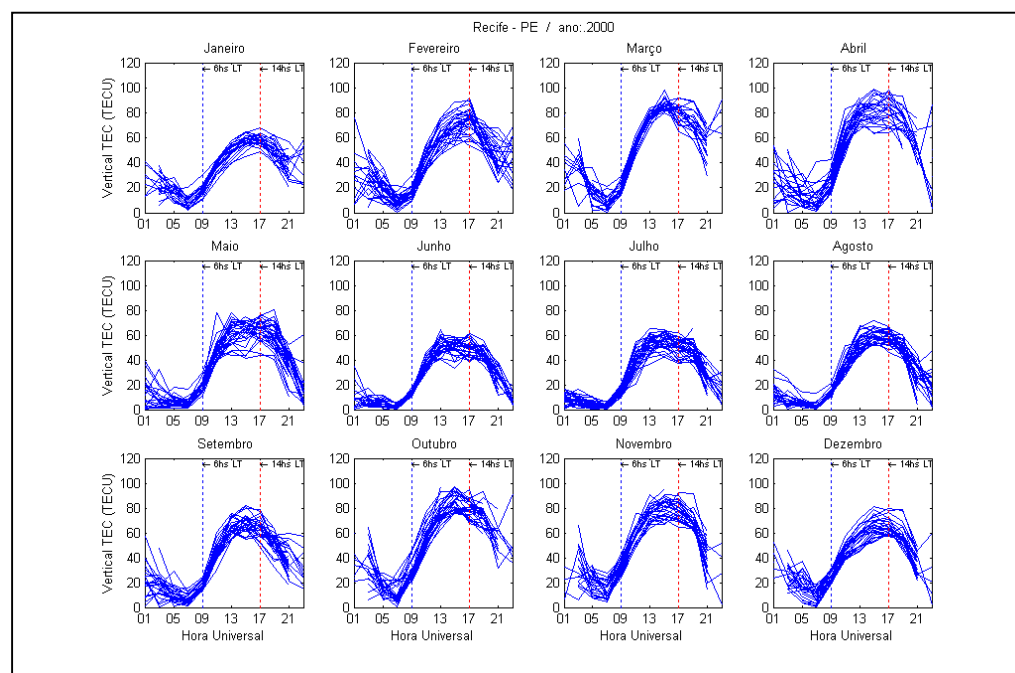


FIG. B41: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE RECIFE - 2000

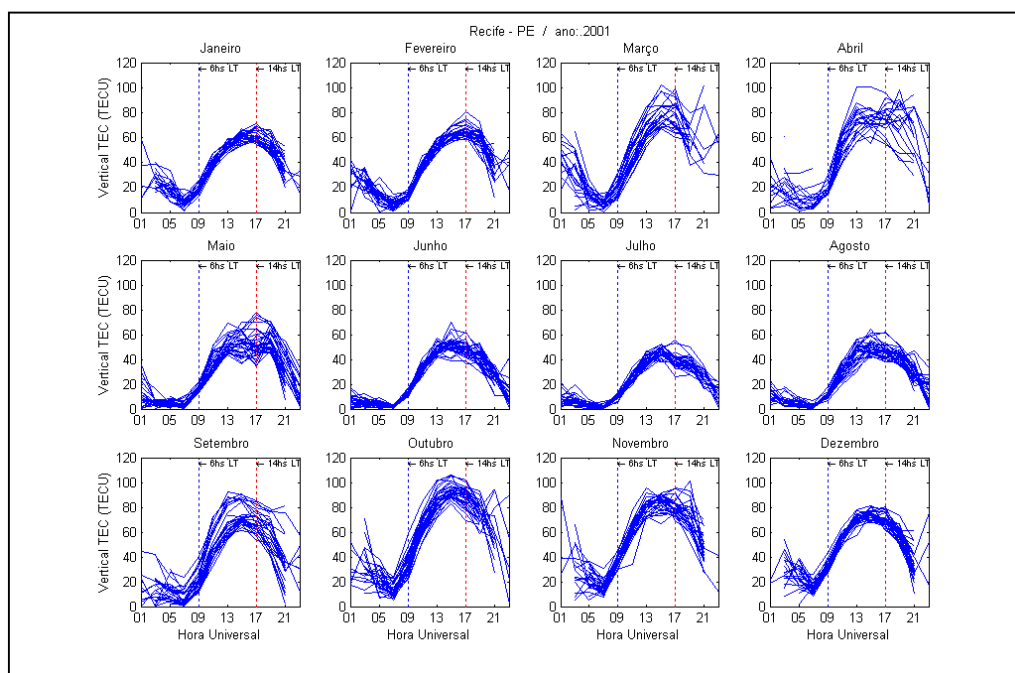


FIG. B42: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE RECIFE - 2001

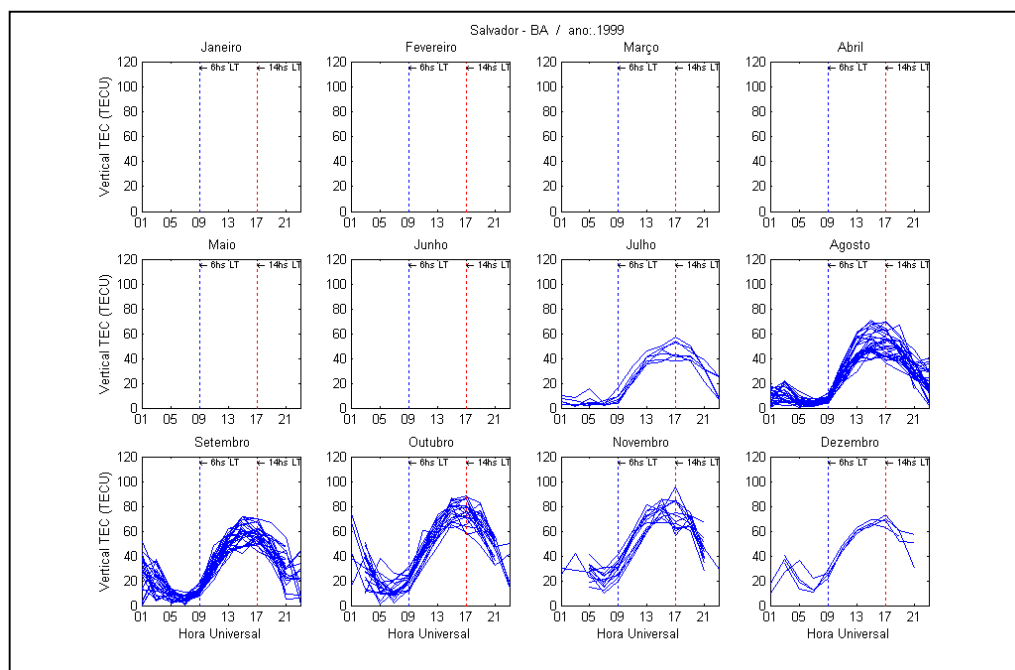


FIG. B43: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE SALVADOR - 1999

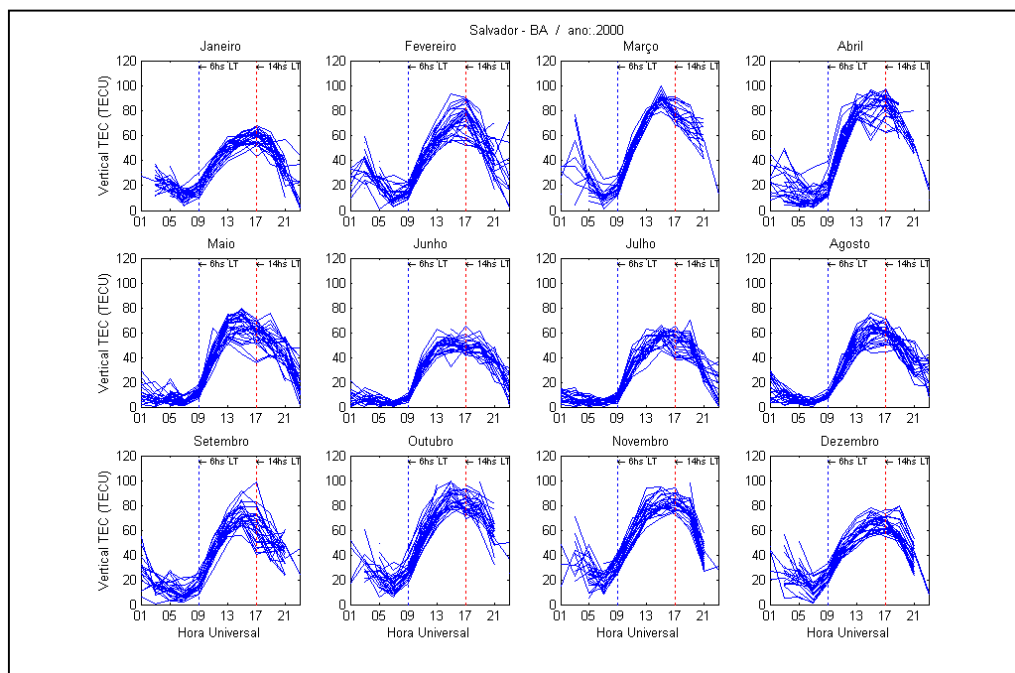


FIG. B44: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE SALVADOR – 2000

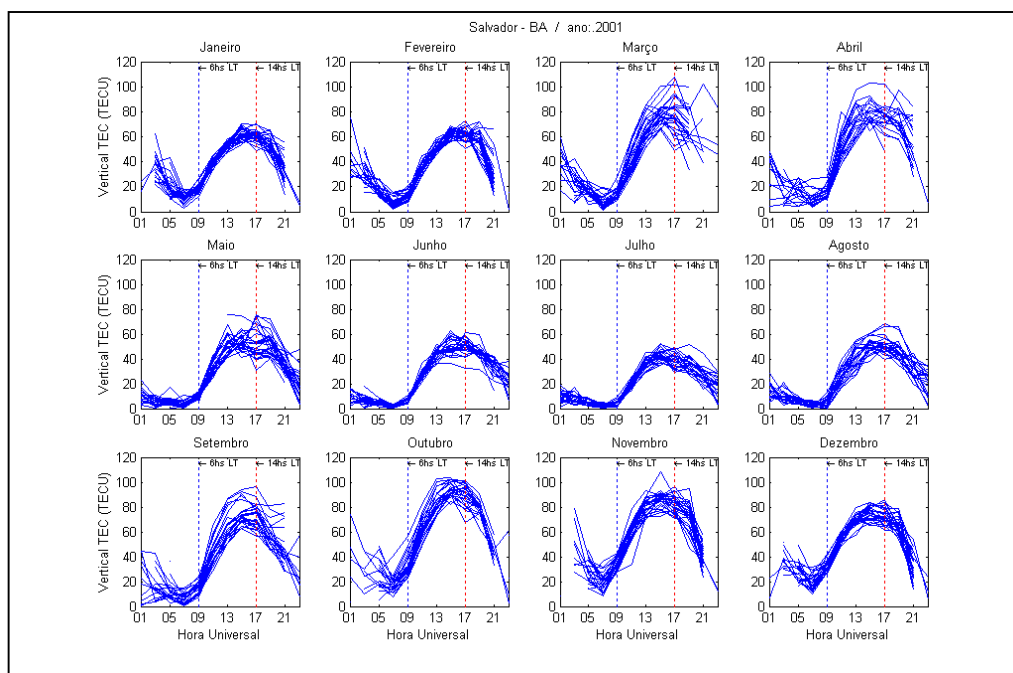


FIG. B45: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE SALVADOR - 2001

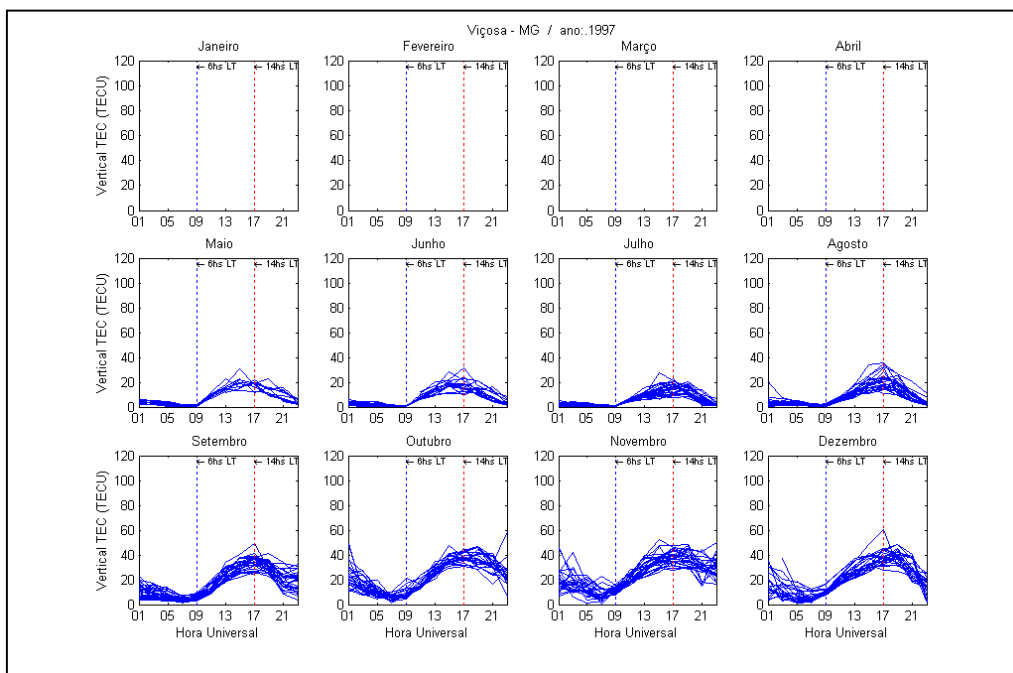


FIG. B46: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1997

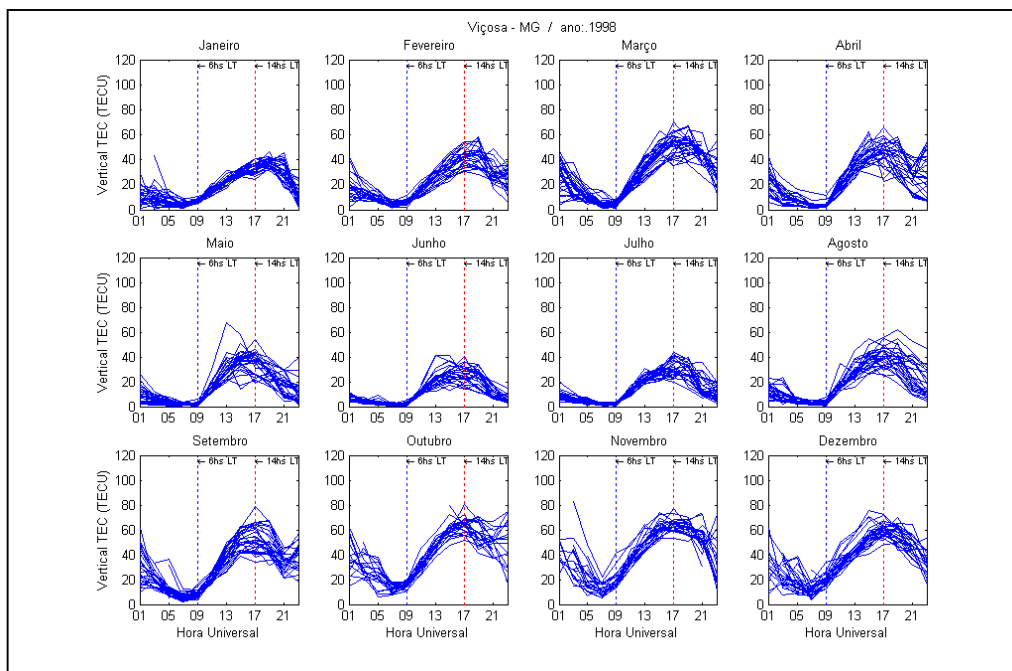


FIG. B47: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1998

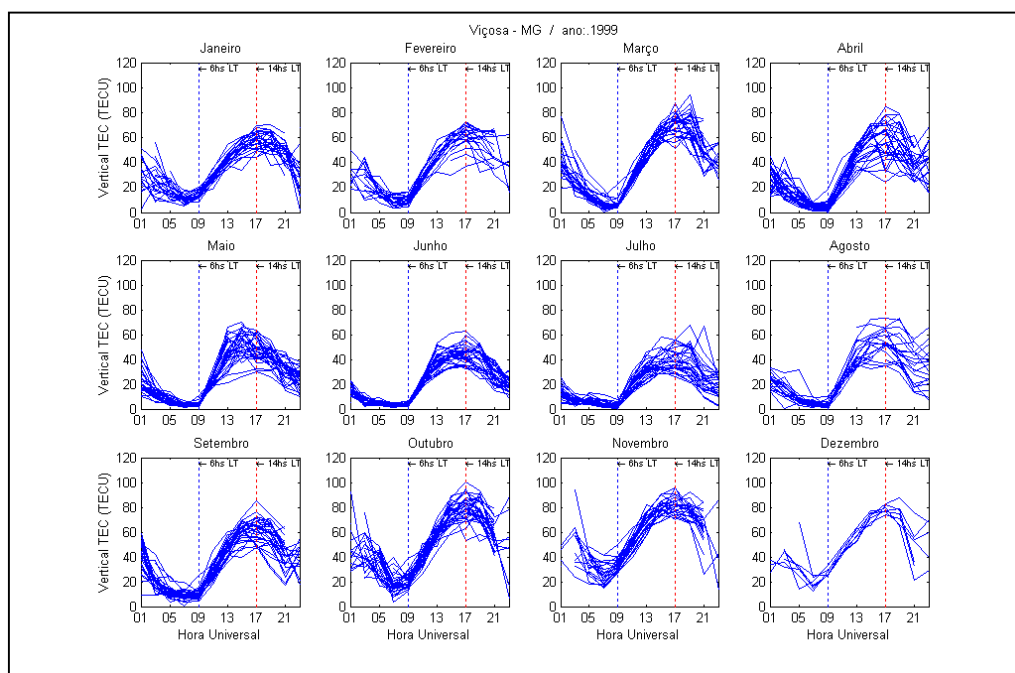


FIG. B48: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 1999

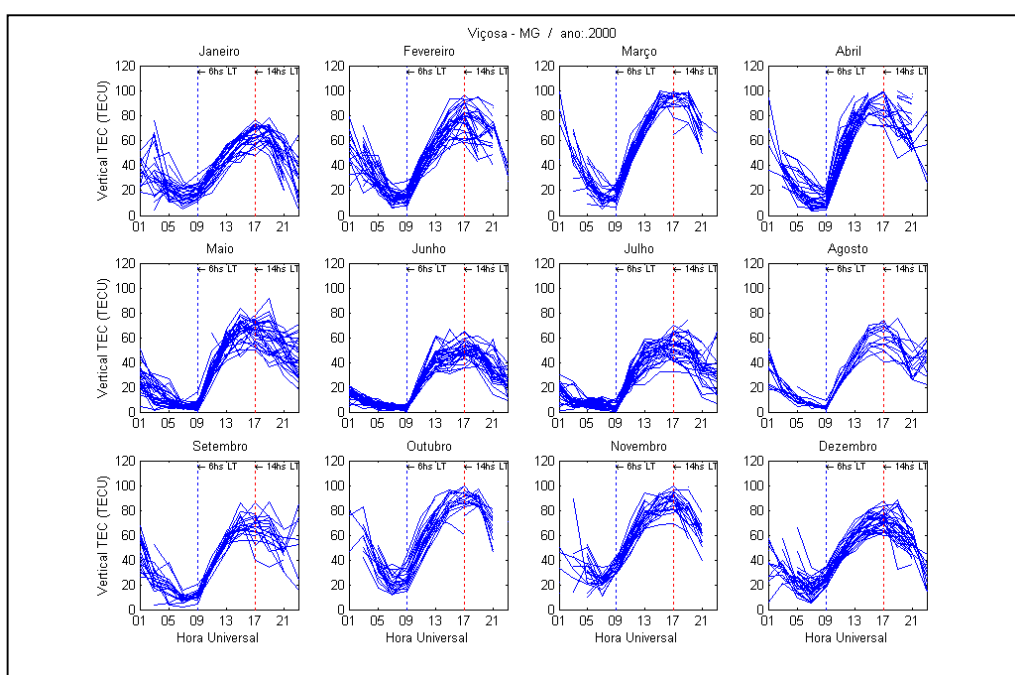


FIG. B49: PERFÍS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 2000



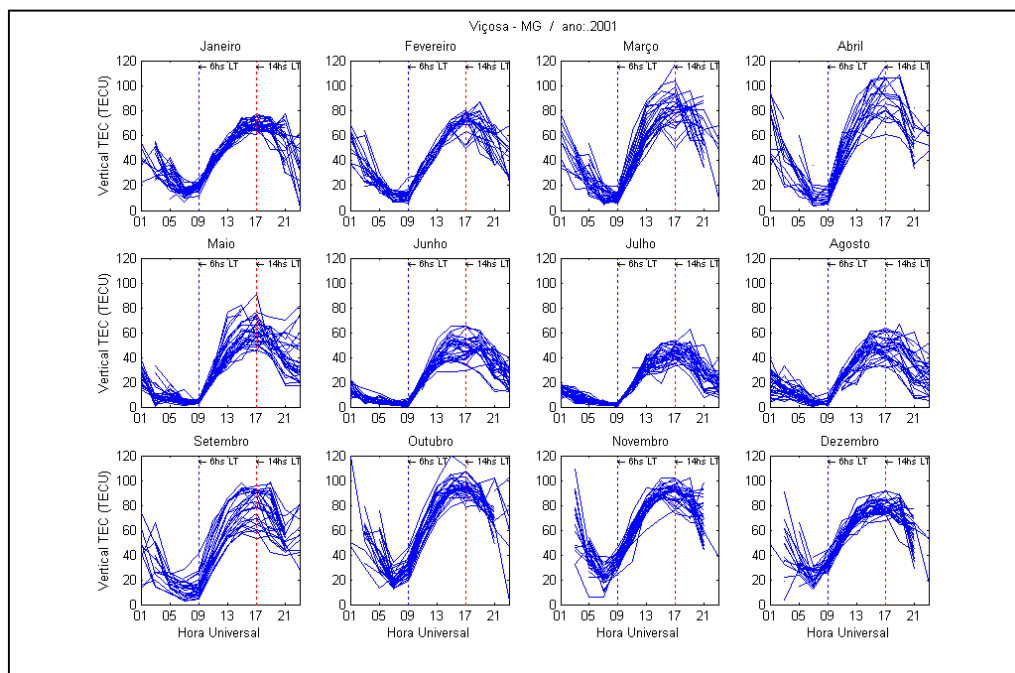


FIG. B50: PERFIS DIÁRIOS DO TEC PARA A ESTAÇÃO DE VIÇOSA – 2001

## LISTA DE REFERÊNCIAS

ABDU, M. A.; Informação Pessoal, 2002.

BLACK, H. D.; EISNER, A.; Correcting satellite doppler data for tropospheric effects. **Journal of Geophysical Research**, Washington,DC, v. 83, n. B4, p.1825-1828. , mês 9.1984.

BRUNNER, F. Refraction, refractive index and dispersion: some relevante history. In: MUNCK J. C.; SPOELTRA T. A. Th. (eds.). REFRACTION OF TRANSATMOSPHERIC SIGNALS IN GEODESY. **Proceedings of the symposium**. Delft, Netherlands. Geodetic Commission, 1992. p. 3-9. ISBN 90 6132 243 X.

CAMARGO, P.O.; **Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores GPS de uma Frequência**. Curitiba, 1999. 191 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

CAMPBELL, J; CLOPPENBURG, H.; LOHMAR, F. J.; ESTIMATING THE IONOSPHERIC REFRACTION EFFECTS ON INTERFEROMETRIC GPS – MEASUREMENTS. **Proceedings of International Symposium of Space Techniques for Geodynamics**. Soprom, v.2, 1984. p. 196-206.

CAMPOS, M. O.; WANNINGER, L.; SEEBER, G. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: **Resumos expandidos** do Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro – RJ. 1993, p. 601-604.

DAVIES, K.; **Ionospheric radio**. London: IEE - Institution of Electrical Engineers, 1990. 580p. (Electromagnetic Waves Series, v. 31). ISBN 0 86341 186 X.

FEDRIZZI, M.; **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. São José dos Campos, 1999. 142p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

FEEN M. M.; EBERT W.L. Ionospheric refraction correction for single frequency doppler navigation. In: NATIONAL AEROSPACE SYMPOSIUM NAVIGATION

SATELLITE USERS. Springfield, 1979. **Proceedings**. Alexandria: ION The Institute of Navigation, 1979. p. 83 - 87.

FORTES, L. P. S.; GODOY, R. A. Z. Rede brasileira de monitoramento contínuo do sistema de posicionamento global - GPS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, 1991. **Coletânea de Trabalhos Técnicos**. Rio de Janeiro: SBC, 1991, v.3, p. 677-682.

FORTES, L. P. S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. Rio de Janeiro, 1997. 152p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia.

FORTES, L. P. S. et al. **The brazilian network for continuous monitoring of GPS (RBMC): operation and products**. Advances in Positioning and Reference Frames, International Association of Geodesy Symposia, Germany, v. 118, Spring-Verlag, 1998.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos (Preliminares)**. Rio de Janeiro, 1992.

GEORGIADIOU, Y., KLEUSBERG, A. On the effects ionospheric delay on geodetic relative GPS positioning. **Manuscripta Geodaetica**, v.13, n.1, p.1-8, 1988.

GFZ - GeoForschungsZentrum Potsdam - **Geomagnetic Kp Index**. Disponível em: <[http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/niemegk/kp\\_index/kp.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/niemegk/kp_index/kp.html)>. Acesso em: 26 de nov. 2001.

GUSTAFSSON, G., N. E. PAPITASHVILI, AND V. O. PAPITASHVILI, A revised corrected geomagnetic coordinate system for epochs 1985 and 1990, **Journal of Atmospheric and Solar and Terrestrial Physics**, n. 54, p. 1609-1631, 1992.

HARGRAVES, J. K. The Solar-terrestrial environment. **Cambridge Atmospheric and Space Science Series**, v. 5, 420 p. Cambridge, Cambridge University Press, 1992.

HARTMANN, G. K., LEITINGER R. Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. **Bulletin Geodesique**, v.58, p.109-136, 1984.

HEIN, G. W.; GODET, J.; ISSLER, J. L.; MARTIN, J. C.; RODRIGUEZ, R. L.; PRATT T. **The Galileo Frequency Structure and Signal Design**. Disponível em: <[http://www.europa.eu.int/comm/energy\\_transport/em/gal\\_doc\\_em.html#5](http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/em/gal_doc_em.html#5)>. Acesso em: 13 de set. 2001.

HIEBER, S. Satellite systems for geodesy and geodynamics. (Draft Report of CCIR Study Group 2), **CSTG Bulletin**, n. 6, 252 p., 1983.

HOFMANN - WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.; **GPS: theory and practice**. Austria: Springer-Verlag Wien New York, 4<sup>a</sup> edição, 1997. 389p. ISBN 3 211 82839 7.

HOPFIELD, H. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research** v. 74, n. 18, aug. 20, 1969.

HOPFIELD, H. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: prediction from surface weather data. **Radio Science**, v. 6, n. 3, p. 357-367, 1971.

HUGENTOBLER, U.; SCHAER, S.; FRIDEZ, P. (Ed.) **Bernese GPS Software, Version 4.2**. Switzerland. Astronomical Institute, University of Bern: 2001. 515 p.

HUNSUCKER, R. D. **Radio techniques for probing the ionosphere**. New York, Spring-Verlag: 1991.

ISGI - The International Service of Geomagnetic Indices. **List of observatories by name**. Disponível em: <<http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/obser1.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2001.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**, v.43. International Geophysics series, 1989, ISBN 0 12 404012 8.

KIRCHHOFF, V.W.J.H., **Introdução à geofísica espacial**. Nova Stella, Editora da USP:FAPESP, 149p. 1991. ISBN 85 7233 001 1.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems**, New York, v. AES 23 n 2, 1987.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. **GPS World Magazine**, Cleveland, v. 2, n. 4, p. 48-51, 1991.

KOMJATHY A. **Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system**. Tese (Doutorado). Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n<sup>o</sup> 188. University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canadá, 248 pp. 1997.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 560p. 1995. ISBN 0 471 30626 6.

MCCARTHY, D. D. (Ed.) **IERS conventions**, Paris: Observatoire de Paris, 1996. 95p. (IERS Technical note 21).

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo, Editora UNESp, 2000. 287p. ISBN: 85 7139 328 1.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.; JANES, H.W. Ionospheric modeling for single frequency users of the Global Positioning System: a status report. In: **Proceedings of the second international symposium on precise positioning with global positioning system GPS-90**, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, sept. 1990, p.429-443.

NEWBY, S. P.; LANGLEY, R. B. Three Alternative Empirical Ionosphere Models – are they better than GPS broadcast model. In: **Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning**, Columbus, OH, USA. mar. 16-20, 1992, v.1, p 240-244.

NGDC – National Geophysical Data Center. Bolder. **Sunspot Numbers**. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/SSN/ssn.html>>. Acesso em: 21 de nov. 2001.

NSSDC – National Space Science Data Center. **GEO\_GGM.FOR**. Disponível em <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/cgm/cgm.html>>. Acesso em 2 de março 2002.

OLIVEIRA, L.C. **Refração atmosférica nas medidas doppler**. Curitiba, 1990. 141p. Dissertação (Mestrado) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

PARKINSON, B. W.; SPILKER JR, J. J.; AXELRAD, P.; ENGE, P. (Ed.). **Global Positioning System: theory and applications (Volume I)**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, INC. Washington, DC: 3 ed.1996. 793 p. ISBN: 1-56347-106-X.

PEREIRA, K. D. **Indicadores técnicos para uso da RBMC no mapeamento**. Rio de Janeiro, 2001. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia.

RATCLIFFE, J. A. An introduction to the Ionosphere and magnetosphere, Cambridge: Cambridge University Press, 1972, ISBN: 0 521 08341 9.

ROTHACHER, M., MERVART, L. (Ed.) **Bernese GPS software, version 4.0**. Switzerland: Astronomical Institute, University of Bern, 1996. 418p.

SAASTAMOINEN, J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. **Bulletin Geodesique**, n. 167, p. 13-34, 1973.

SAPUCCI, L. F.; **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Presidente Prudente, 2001. 193 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia da UNESP.

SCHAER, S.; Beutler, G.; Mervant, L.; Rothacher, M.; Wild, U. Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable. In: **Proceedings of the IGS workshop on Special Topics and New Directions**. Edited by G. Gendt e G. Dick. P. 77-92. GFZ Potsdam, Alemanha, may 15-18, 1995.

SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. IONEX: The IONosphere Map EXchange format version 1. In: **Proceedings of the IGS AC Workshop**. Germany: feb. 09-11, 1998. p. 01-15.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system**. Bern, Switzerland, 1999. PhD Thesis (Doutorado), 205 p. University of Bern.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: Foundations, methods and applications**. Berlin - New York: Walter de Gruyter, 1993. 531p. ISBN 3 11 012753 9.

SIDC – Sunspot Index Data Center. Bruxelas. **Calculation of the international sunspot number**. Disponível em: <<http://sidc.oma.be/Activities/node3.html>>. Acesso em: 21 de nov. 2001.

SILVA, N. C. C.; **Análise dos modelos de refração troposférica no posicionamento geodésico usando dados da RBMC**. Rio de Janeiro, 1998. 137 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia.

SKONE, S.; **Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region**. Calgary, Canada, 1998. 198 p. PhD Thesis (Doutorado), University of Calgary.

SPIPKER Jr., J. J. ; DIERENDONCK, A. J. VAN; Proposed new civil gps signal at 1176.45 MHz. In: **Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation**. ION GPS-99. Nashville, Tennessee, USA, sept. 14 –17, 1999, cd-rom.

SPOELTRA, T. A T.; The ionosphere as a refractive medium. In: **Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy**. The Hague – Netherlands. May 19-22, 1992. p 69-76.

SUGIURA, M., Hourly values of equatorial Dst for the IGY, **Annual International Geophysical Year**, 35, 9, Pergamon Press, Oxford, 1964.

TSYGANENKO, N. A., et al. Software for computations of the geomagnetic field and related coordinate systems, **Soviet Geophysical Committee**. Moscow, 58 p., 1987.

WANNINGER, L. Monitoring total electron ionospheric irregularities with GPS. In: MUNCK J. C.; SPOELTRA T. A. Th. (eds.). **Refraction of transatmospheric signals in geodesy: Proceedings of the symposium**. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1992. p.141-146. ISBN 90 6132 243 X.

WANNINGER, L. Effects of the equatorial ionosphere on GPS. **GPS World**, p. 48-54, jul. 1993.

WEBSTER, I. **A Regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the global positioning system**. New Brunswick, 1993. Dissertação (Mestrado) - Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.

WELLS, D. E. **Doppler satellite control**. Fredericton: UNB - University of New Brunswick, 1974. 277 p. (Technical Report n° 29).

WELLS, D. E. (Ed.) **Guide to GPS positioning**. Fredericton: Canadian GPS Association, 1987. ISBN 0 920 114 73 3.