MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7259-TDI/703

OBSERVAÇÕES DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL COM DADOS DO GPS

Mariangel Fedrizzi

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Ivan Jelinek Kantor e pelo Dr. Eurico Rodrigues de Paula, aprovada em 10 de março de 1999.

INPE
São José dos Campos
1999

523.4 -853

FEDRIZZI, M.

Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS / M. Fedrizzi – São José dos Campos: INPE, 1999.

142p. (INPE-7259-TDI/703).

1.Sistema de Posicionamento Global (GPS). 2.Ionosfera. 3.Plasmasfera. 4.Propagação Ionosférica. 5.Conteúdo Eletrônico Total (TEC). 6.Efeito Faraday. I.Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Geofísica Espacial.**

Dr. Yogeshwar Sahai — Presidente

Dr. Ivan Jelinek Kantor — Orientador

Dr. Eurico Rodrigues de Paula — Orientador

Dr. Polinaya Muralikrishna — Membro da Banca

Dr. João Francisco Galera Monico — Membro da Banca Convidado

Candidata: Mariangel Fedrizzi

São José dos Campos, 10 de março de 1999.

Aos meus pais,

Renato e Luiza Matilde.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, especialmente, aos meus orientadores, Dr. Ivan Jelinek Kantor e Dr. Eurico Rodrigues de Paula, pela paciência e inestimável apoio prestados durante a realização deste trabalho e, principalmente, pela oportunidade de muito aprender com a experiência e conhecimento científico que lhes pertence.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Ivan Jelinek Kantor, Dr. Eurico Rodrigues de Paula, Dr. João Francisco Galera Monico, Dr. Muralikrishna Polinaya e Dr. Yogeshwar Sahai, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas críticas e sugestões recebidas.

Ao International GPS Service (IGS) que, através dos Centros de Dados, proporcionou todas as informações necessárias à aquisição dos dados. Um especial agradecimento à Carey Noll, do Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS), pela eficiência e atenção concedidas durante a transferência dos dados.

Ao Dr. Steven Musman, da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), pelas valiosas informações e fornecimento de um programa computacional, através do qual foram desenvolvidos os programas utilizados neste trabalho, e ao Dr. Attila Komjathy, da University of New Brunswick, pelo apoio e esclarecimentos.

Aos pesquisadores Paulo de Oliveira Camargo (UNESP), Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira (UFPr) e Dr. Hélio Koiti Kuga (INPE), pelas informações e contribuições para o desenvolvimento dos programas computacionais.

Ao Dr. Eduardo Whitaker Bergamini e Vivéca Sant'Ana Lemos (ATSME-INPE), pelo empenho e eficiência na obtenção de informações para a aquisição dos dados, e ao técnico Avicena Filho (INPE-Fortaleza), pelas fotografias da estação receptora de Fortaleza.

Ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), pelo apoio concedido durante o processo de transferência dos dados.

Aos colegas e professores que colaboraram no sentido de ampliar o conhecimento científico desta aluna.

Aos amigos, Christiano Garnett Marques Brum, pelas críticas e auxílio na elaboração dos gráficos, Paula Márcia Aranha de Brito e José Henrique Fernandez, pelo constante apoio.

À Sofia Sundfeld Veloso e Luiz Henrique Pavanelli, pelo suporte computacional.

Às secretárias dos Departamentos de Aeronomia e Geofísica (INPE), pela colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial às bibliotecárias do INPE, pela disposição e eficiência no apoio e atendimento aos alunos de pós-graduação.

RESUMO

Um método para a obtenção do Conteúdo Eletrônico Total (CET), a partir das observáveis do "Global Positioning System" (GPS) é apresentado. A maior parte dos dados disponíveis de CET, no setor sul-americano, foi obtida através de medidas de rotação Faraday, que não contêm a contribuição dos elétrons situados acima de 2.000 km de altura. Todavia, valores de CET que incluem o conteúdo eletrônico plasmasférico, podem ser obtidos através dos dados de satélites GPS. O método utiliza-se da característica dispersiva do meio ionosférico para determinar o conteúdo eletrônico total a partir da diferença entre medidas de código e fase simultâneas, nas duas freqüências dos sinais enviados pelos satélites GPS. Medidas do CET foram obtidas através deste método para estações receptoras, pertencentes à rede "International GPS Service" (IGS), situadas nas regiões da América do Sul e Península Antártica. Os resultados permitiram efetuar um estudo da variação diurna, latitudinal e sazonal do CET, nestas regiões, para uma época de baixa atividade solar, em condições ionosféricas magneticamente calmas. Estes resultados são comparados com modelos empíricos de ionosfera (IRI-95) e plasmasfera (Gallagher-88). Uma análise dos dados em condições ionosféricas magneticamente calmas e perturbadas e a observação de flutuações ionosféricas, mostra o potencial do estudo do efeito das tempestades magnéticas e irregulariades ionosféricas a partir da utilização de dados do GPS.

TOTAL ELECTRON CONTENT OBSERVATIONS WITH GPS DATA

ABSTRACT

A method to determine the Total Electron Content (TEC) from Global Positioning System (GPS) observables is presented. This method takes advantage of the dispersive characteristic of the ionospheric medium to determine the TEC from differential pseudoranges and carrier phases. Most of the available TEC data, in the South American region, has been taken by measurements of Faraday rotation, which only contains the contribution of electrons up to heights of approximately 2,000 km. However, TEC measurements obtained from GPS data include the plasmaspheric electron content. Diurnal, latitudinal and seasonal TEC variations, during solar minimum and quiet ionosphere conditions, were obtained and analysed for International GPS Service (IGS) stations, located at South America and Antarctic Peninsula. These results were compared with ionospheric IRI-95 and plasmaspheric Gallagher-88 empirical models. The TEC diurnal behavior for disturbed conditions and the presence of fluctuations on TEC observations offer an excellent means to monitor magnetic storm effects on GPS measurements and ionospheric irregularities.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 19

CAPÍTULO 2 - O SISTEMA GPS 23

2.1 - Introdução 23
2.2 - Sistemas de Tempo e Calendário 25
2.3 - Posicionamento 27
2.4 - Estrutura do Sinal 28
2.5 - Receptores 31
2.6 - Aplicações do GPS 33

CAPÍTULO 3 - INFLUÊNCIA DA IONOSFERA SOBRE OS SINAIS DO GPS 35

3.1 - Ionosfera 35
3.2 - Plasmasfera 38
3.3 - Conteúdo Eletrônico Total 39
3.4 - Propagação de Ondas na Ionosfera 40
3.4.1 - Propagação de Ondas em um Meio Isotrópico 42
3.4.2 - Polarização 44
3.4.3 - Propriedades do Plasma 46
3.4.3.1 - Freqüência Angular de Plasma 46
3.4.3.2 - Freqüência Ciclotrônica 47
3.4.3.3 - Freqüência de Colisão 48

3.4.4 - Relações Constitutivas 50
3.4.5 - Índice de Refração em um Meio Anisotrópico 51
3.4.6 - Efeitos da Ionosfera sobre os Sinais do GPS 53
3.4.7 - Efeito Farday 57

CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL A PARTIR DE DADOS DO GPS 61

4.1 - Observáveis 61
4.1.1 - Pseudo-Distâncias 61
4.1.2 - Fase de Batimento da Onda Portadora 63
4.2 - Fatores que Afetam as Observáveis 65
4.3 - Cálculo do CET a Partir das Observáveis do GPS 69
4.3.1 - Detecção e Correção da Perda de Ciclo 71
4.3.2 - Ambigüidade e Nivelamento 72
4.3.3 - Mapeamento do CET e Obtenção do Atraso Instrumental Diferencial 74

CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NO TRABALHO 79

5.1 - A Rede Global IGS 79
5.2 - Estrutura dos Dados 80
5.2.1 - Formato RINEX 80
5.2.2 - Formato SP3 82
5.3 - Aquisição dos Dados 82
5.3.1 - Seleção do Período de Dados a ser Analisado 83
5.3.2 - Transferência dos Dados 85
5.3.3 - Estações Receptoras 88

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 93

6.1 - Programas Computacionais 93

6.2 - Variação diurna 94
6.3 - Variação latitudinal 96
6.4 - Anomalia Equatorial 97
6.5 - Variação Sazonal 99
6.6 - Comparação com Medidas de Rotação Faraday 100
6.7 - Flutuações do CET 103
6.8 - Efeito das Tempestades Magnéticas 104
6.9 - Comparação dos Resultados com os Modelos IRI-95 e Plasmasférico 106
6.9.1 - Modelo IRI-95 106
6.9.2 - Modelo Plasmasférico 107
6.9.3 - Resultados 109

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES 115

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS FORMATOS RINEX E SP3 125

A.1 - Descrição dos Arquivos de Dados no Formato RINEX 125
A.2 - Principais Parâmetros Fornecidos no Formato SP3 136

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 - Configuração orbital dos satélites GPS 24

2.2 - Satélite do grupo Bloco II 25

2.3 - Ilustração do avanço na precisão da medida de tempo 26

2.4 - Medida de posicionamento no receptor 29

2.5 - Modulação do código sobre a onda portadora 30

2.6 - Principais componentes de um receptor GPS 32

3.1 - Perfil vertical típico da ionosfera 36

3.2 - Contornos do CET vertical, em unidades de 10^{16} el/m^2, para as 20:00 UT (Março 1980) 41

4.1 - Princípio da medida de pseudo-distância 62

4.2 - Pseudo-distâncias diferenciais ($\rho_2 - \rho_1$) e portadoras de fase diferenciais ($\Phi_1 - \Phi_2$), durante a passagem do satélite PRN 24 sobre Neustrelitz, em 25 de março de 1995..... 73

4.3 - Geometria da trajetória do raio para sinais de satélites trans-ionosféricos .. 76

4.4 - Efeito da variação do atraso instrumental diferencial ($d^s + d^r$), sobre o *CETV* correspondente à passagem de um determinado satélite..... 77

5.1 - Variação do fluxo solar a 10,7 cm, entre os períodos de janeiro/1985 e novembro/1998 85

5.2 - Variação do índice K_p para os meses de março, junho e dezembro de 1996 86

5.3 - Variação dos índices K_p e D_{st} entre os dias 19 e 25 de março, 04 e 10 de junho, 08 e 14 de dezembro de 1996 87

5.4 - Estações receptoras IGS na América do Sul e Península Antártica 89

5.5 - Receptor TurboRogue SNR-8000 90

5.6 - Antena Dorne Margolin 90

5.7 - Equipamento receptor instalado na estação de Fortaleza 91

5.8 - Antena instalada na estação de Fortaleza 91

6.1- CET vertical, obtido para a estação de Fortaleza, em função da hora universal 95
6.2 - Variação diurna do CET vertical para Fortaleza, em função da hora local, apresentando o desvio padrão dos dados utilizados na obtenção do CET médio 95
6.3 - Diagrama informando sobre a existência de dados 97
6.4 - CET vertical suavizado através do IDL, para a estação de Fortaleza 97
6.5 - CET vertical obtido a partir do GPS, para a estação de Kourou 98
6.6 - CET vertical obtido para a estação de Santiago, utlizando-se dados do GPS 98
6.7 - Variação sazonal do CET vertical, para Fortaleza, no ano de 1996 99
6.8 - Médias mensais das variações diurnas do CET observado em Cachoeira Paulista e o valor calculado pelo IRI-90, para o ano de 1986 101
6.9 - Variação diurna do conteúdo eletrônico, em diferentes estágios do ciclo solar..... 102
6.10 - Flutuação do CET vertical observada em Kourou 103
6.11 - Variação diurna do CET vertical para a média dos dias calmos e para os dias perturbados, em dezembro de 1996..... 105
6.12a - CET vertical obtido através do IRI-95, para a estação de Fortaleza 109
6.12b - CET vertical obtido a partir do modelo de plasmasfera 110
6.12c - CET vertical obtido através da soma dos modelos 110
6.13a - CET obtido através do IRI-95, para Kourou 111
6.13b - CET plasmasférico, para a estação de Kourou 112
6.13c - CET vertical para Kourou, calculado a partir da soma dos valores dos modelos 112
6.14a - CET obtido através do IRI-95, para a estação de Santiago 113
6.14b - CET plasmasférico para Santiago 113
6.14c - CET vertical determinado a partir da soma dos valores obtidos nos modelos..... 114

LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 - Principais fatores que afetam as observáveis do GPS	65
5.1 - Mensagem de observação no formato RINEX	81
5.2 - Estações receptoras IGS analisadas	84
5.3 - Nível de atividade magnética para os dias analisados, no ano de 1996	85

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A ionosfera, região da atmosfera superior que se estende desde, aproximadamente, 50 km até 1.000 km de altura, é caracterizada pela alta condutividade, devido ao número elevado de íons e elétrons livres que a compõe. Conseqüentemente, uma onda eletromagnética que atravessa esta camada, tem a velocidade e direção de propagação alteradas. Esta propriedade caracteriza a ionosfera como um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação da onda é uma função do índice de refração do meio, permitindo determinar o atraso na modulação de grupo do sinal. Esta medida é diretamente proporcional ao número de elétrons presentes na trajetória de propagação do sinal, definido pelo Conteúdo Eletrônico Total (CET).

O CET é um parâmetro importante a ser medido na ionosfera e, por ser altamente dependente da radiação solar, apresenta variações diurnas, sazonais e geográficas, assim como variações relacionadas ao nível de atividade solar e tempestades magnéticas. Até o presente momento, a maior parte dos dados disponíveis de CET, no setor sul-americano, foi obtida através de medidas de rotação Faraday, que utiliza ondas de rádio transmitidas por satélites, nas freqüências entre 40 e 400 MHz. Todavia, estas medidas não contêm as contribuições do CET para alturas superiores a 2.000 km, devido à diminuição com a altura dos valores do campo magnético terrestre e densidade eletrônica.

Os satélites utilizados nas medidas de CET, através da técnica de rotação Faraday, estão praticamente desativados. Atualmente, o conteúdo eletrônico total vem sendo determinado a partir de medidas do "Global Positioning System" (GPS), um sistema de navegação que permite determinar a posição e velocidade de objetos situados em qualquer ponto sobre ou próximo à superfície terrestre, em relação à um sistema de referência. Os sinais transmitidos pelos satélites são gerados coerentemente a partir da freqüência fundamental de 10,23 MHz e transmitidos nas freqüências de 1.575,42 MHz

e 1.227,60 MHz. A combinação destes sinais permite determinar o atraso de grupo da portadora modulada e, conseqüentemente, obter a medida do CET.

A utilização de dados do GPS na determinação das medidas de conteúdo eletrônico total proporcionou um aumento na cobertura de dados, devido ao grande número de receptores distribuídos globalmente. Entretanto, no hemisfério Sul os dados de CET ainda são escassos e os modelos existentes não representam corretamente esta região. Desta forma, espera-se que este trabalho venha contribuir para a ampliação da base de dados do CET, no setor sul-americano.

O principal objetivo deste trabalho é a determinação da componente vertical do conteúdo eletrônico total (CET vertical), calculada a partir da utilização de dados do GPS, para as estações receptoras de Arequipa, Bogotá, Fortaleza, Kourou, La Plata, O'Higgins (Península Antártica) e Santiago. Para tanto, foram desenvolvidos vários programas computacionais, cujos resultados possibilitam estudar as variações diurna, sazonal e latitudinal do CET vertical, além dos efeitos das tempestades magnéticas sobre estas medidas. A partir de uma análise destes resultados, a anomalia equatorial e a presença de flutuações ionosféricas devem ser observadas. Os resultados são, ainda, comparados com medidas de conteúdo eletrônico obtidas a partir da técnica de rotação Faraday e modelos empíricos (IRI-95 e modelo plasmasférico).

No Capítulo 2, uma descrição do sistema GPS é apresentada. Considerando que as fontes de consulta disponíveis sobre este assunto são muito vastas, somente os principais aspectos relacionados à este trabalho serão abordados. Uma breve descrição dos meios ionosférico e plasmasférico, o comportamento do conteúdo eletrônico total e uma análise dos efeitos da ionosfera sobre a propagação dos sinais do GPS são apresentados no Capítulo 3. A metodologia utilizada na determinação do CET e os fatores que afetam as observáveis do GPS são descritos no Capítulo 4. No Capítulo 5, apresenta-se uma introdução sobre a rede "International GPS Service" (IGS) e estrutura dos dados, os procedimentos para seleção e aquisição de tais dados, além de uma breve descrição sobre os receptores e antenas que equipam as estações receptoras analisadas.

A análise e discussão dos resultados obtidos são apresentadas no Capítulo 6, incluindo um histórico sobre os programas utilizados na determinação do CET vertical. Finalmente, no Capítulo 7, as principais conclusões deste trabalho são apresentadas.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

2.1 Introdução

A utilização de ondas de rádio e satélites artificiais em navegação teve início na década de 60 com o desenvolvimento do "Navy Navigational Satellite System" (NNSS ou TRANSIT) (Jakowski, 1996). Em 1973, após vários estudos com o objetivo de aperfeiçoar os sistemas de navegação por satélites, o "U.S. Department of Defense" iniciou um programa para testes e desenvolvimento de um sistema de posicionamento de alta precisão para satisfazer as exigências das forças armadas, o qual recebeu a denominação de "NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System" (NAVSTAR GPS). Este sistema, ao contrário do TRANSIT, fornece maior precisão nas informações de navegação e uma cobertura diária contínua, devido ao grande número de satélites disponíveis.

O sistema de posicionamento global ou "Global Positioning System" (GPS) é um sistema de rádio navegação que utiliza satélites artificiais para determinar a posição e a velocidade de um objeto, fixo ou móvel, situado em qualquer ponto sobre ou próximo à superfície terrestre, em relação a um sistema de referência. Os primeiros protótipos e satélites de desenvolvimento (Bloco I) foram lançados entre 1978 e 1985, totalizando 11 satélites dispostos em dois planos orbitais com 63° de inclinação (Seeber, 1993). Os satélites do grupo Bloco II, cujo lançamento inicial ocorreu em 1989, foram designados para fazer parte da primeira constelação operacional, constituída por 24 satélites (21 ativos e 3 reservas), orbitando em 6 planos com inclinação de 55° (Figura 2.1). Atualmente, a constelação é formada por 27 satélites dos Blocos II, IIA e IIR (USNO, 1999a), estes últimos contendo sistemas mais avançados. A capacidade operacional inicial foi obtida em dezembro de 1983, quando 24 satélites (Blocos I, II e IIA) estavam

operando com êxito (Leick, 1995; Parkinson, 1996) e a capacidade operacional plena ocorreu em 27 de abril de 1995 (Monico, 1996).

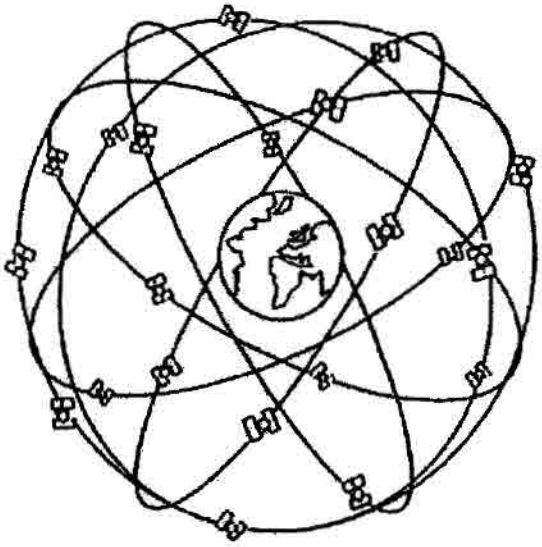


Fig. 2.1 - Configuração orbital dos satélites GPS.
FONTE: Seeber (1993, p. 209).

Os satélites GPS estão dispostos em órbitas aproximadamente circulares, situadas a 20.200 km de altura em relação à superfície terrestre e com um período orbital de 12 horas siderais. Esta altitude foi estabelecida em função dos seguintes fatores: visibilidade do usuário, passagem periódica sobre as estações de controle e superfície continentais norte-americanas e custos de lançamento (Parkinson, 1996). Além disso, órbitas muito baixas demandariam um grande número de satélites para prover uma cobertura global do planeta; por outro lado, órbitas elevadas exigiriam poucos satélites, mas necessitariam de transmissores muito potentes. A vida útil dos satélites do Bloco II foi planejada para atingir 7,5 anos, todavia, os satélites que apresentam falhas operacionais são substituídos. A Figura 2.2 apresenta um satélite GPS na linha de montagem.

Os satélites GPS são constantemente rastreados através de estações de controle distribuídas em várias partes do globo terrestre, as quais transmitem os dados de cada

satélite a um centro de controle principal. A partir destes dados, as informações orbitais e os parâmetros dos relógio dos satélites são preditos e posteriormente enviados para os respectivos satélites por meio de antenas de superfície que transmitem os sinais na banda S, situada no intervalo de freqüências entre 2 e 4 GHz (Skolnik, 1970).

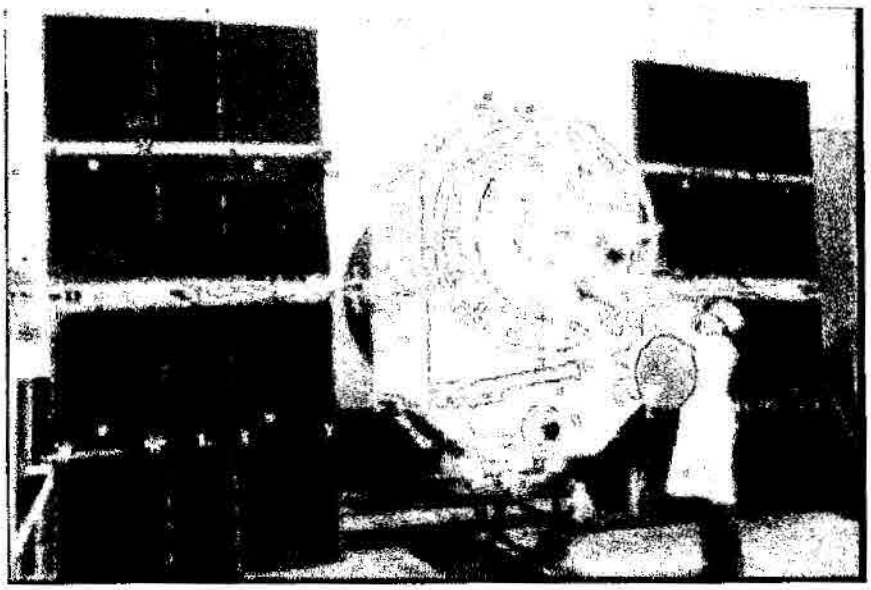


Fig. 2.2 - Satélite do grupo Bloco II.
FONTE: IBM (1999).

2.2 Sistemas de Tempo e Calendário

Os vários sistemas de tempo existentes na atualidade são baseados em distintos processos periódicos. Na verdade, qualquer dispositivo capaz de gerar uma seqüência de intervalos constantes no tempo pode ser utilizado como um relógio. Algumas escalas de tempo, como o tempo universal (UT) e o tempo sideral (ST), surgiram devido ao movimento de rotação terrestre. Os movimentos do sol e da lua definiram uma escala de tempo mais precisa, denominada tempo das efemérides (ET). Contudo, maior precisão foi obtida com osciladores de cristais de quartzo e, posteriormente, com osciladores atômicos que utilizam os elementos césio, rubídio e hidrogênio (Figura 2.3).

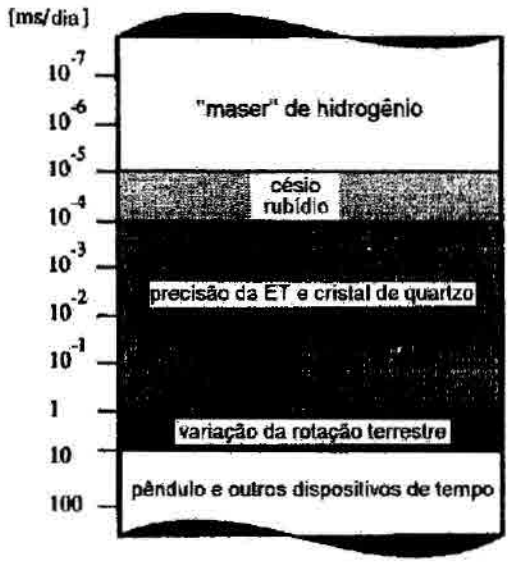


Figura 2.3 - Ilustração do avanço na precisão da medida de tempo.
FONTE: Leick (1995, p. 27).

A precisão do sistema de posicionamento global deve-se, fundamentalmente, à estabilidade dos osciladores atômicos que compõem o sistema. Os satélites utilizam tradicionalmente relógios atômicos de césio e rubídio, que fazem parte do sistema GPS e cuja escala de tempo é definida operacionalmente como tempo GPS. A responsabilidade pelo monitoramento do tempo GPS deve-se ao centro de controle principal, que efetua as comparações e correções necessárias nos relógios dos satélites através da utilização de um conjunto de relógios atômicos de césio altamente precisos e destinados especificamente para este fim (Spilker Jr., 1996).

O sistema GPS requer medidas de tempo extremamente precisas e, por tratar-se de um sistema de navegação, este parâmetro deve estar associado à rotação terrestre. A relação entre o tempo atômico e a rotação terrestre ocorre através da introdução de uma escala de tempo universal coordenado (UTC), para obter uma unidade de tempo uniforme e com a melhor adaptação possível à rotação terrestre. Esta escala de tempo diferencia-se

do tempo GPS por um número inteiro de intervalos de segundos cumulativos que são inseridos nesta última em determinadas épocas, mantendo próximas estas escalas de tempo. O sistema de tempo GPS iniciou em 5 de janeiro de 1980, às 00:00 UTC, e caracteriza-se por apresentar um número que identifica a semana GPS (0 a 1023) e um intervalo de segundos que definem a semana corrente, ou seja, a hora GPS pode variar entre 0 e 604.800, respectivamente, no início e no final de uma semana (Seeber, 1993). Quando encerrar a semana 1023, a contagem reiniciará a partir da semana 0 (Monico, 1998). A partir do início de janeiro de 1999, a diferença entre o tempo GPS e UTC encontra-se em 13 segundos (USNO, 1999b). A determinação da semana GPS a partir de uma data civil (ano, mês e dia) e vice-versa pode ser obtida por meio de equações que relacionam o dia juliano à estas datas civis, de acordo com Hofmann-Wellenhof et al. (1994). A utilização do dia juliano, definido como o número de dias solares médios decorridos desde o ano de 4713 B.C., é mais apropriada em programas computacionais por ser representado através de uma única variável, ao contrário das datas civis que são representadas por um conjunto de três variáveis. Informações adicionais sobre estes sistemas de tempo e suas relações estão descritas em Hofmann-Wellenhof et al. (1994), Leick (1995), Seeber (1993) e Spilker Jr. (1996).

2.3 Posicionamento

O sistema GPS foi desenvolvido fundamentalmente com o objetivo de fornecer um posicionamento preciso aos usuários, através de medidas da distância entre satélite e receptor. O processo para determinação destas medidas é baseado no tempo de propagação do sinal enviado pelo satélite, desde o instante da emissão até o momento de sua chegada no receptor. Admitindo-se que os relógios dos satélites e receptores estivessem perfeitamente sincronizados com o tempo GPS, o tempo de propagação deste sinal corresponderia à distância geométrica entre o satélite e o receptor. Todavia, os relógios dos receptores, por serem menos precisos, apresentam uma pequena diferença em relação ao tempo GPS e, apesar da precisão dos osciladores atômicos instalados a bordo dos satélites, periodicamente são efetuados ajustes em seus relógios. Isto significa

que as distâncias obtidas através do sistema GPS não correspondem às distâncias reais entre satélites e receptores pois, em ambos, os relógios estão defasados em relação ao sistema de tempo do GPS. Estas medidas incorretas de distância recebem, portanto, o nome de pseudo-distâncias ("pseudoranges"). Além do atraso dos relógios, estão incluídos nas medidas de pseudo-distância os erros devido à propagação e à limitação na precisão do sinal GPS e os erros relacionados aos receptores e satélites, os quais serão discutidos posteriormente.

O posicionamento do receptor em um referencial tridimensional ocorre, aproximadamente, da seguinte forma: considerando-se que o receptor esteja situado a uma distância R de um determinado satélite e os relógios dos satélites e receptores estejam perfeitamente sincronizados com o tempo GPS, é possível dizer que o receptor encontra-se em algum ponto sobre a superfície de uma esfera que envolve o satélite e cujo raio é igual a R. Entretanto, se o receptor estabelecer as distâncias relativas à dois satélites, então ele pode estar localizado em qualquer ponto sobre o círculo formado pela intersecção entre duas esferas. Adicionando-se um terceiro satélite, apenas dois pontos (um dos quais, fisicamente incorreto) resultam da intersecção entre três esferas. Admitindo-se que os relógios estejam incorretos, a intersecção das esferas ocorrerá em pontos falsos (Figura 2.4). Todavia, a medida de um quarto satélite visível ao receptor elimina os erros de posicionamento devido à imprecisão dos relógios dos receptores (Hofmann-Wellenhof et al., 1994).

2.4 Estrutura do Sinal

A precisão do sistema GPS deve-se, principalmente, ao controle dos sinais emitidos pelos satélites através dos osciladores atômicos. Estes sinais são coerentemente derivados da freqüência fundamental de 10,23 MHz e transmitidos na banda L, situada no intervalo de freqüência entre 1 e 2 GHz (Skolnik, 1970), com polarização circular à direita, através das seguintes portadoras:

$$L1 = 154 \times 10{,}23 = 1575{,}42 \text{ MHz}$$

e

$$L2 = 120 \times 10{,}23 = 1227{,}60 \text{ Mhz}$$

cujos comprimentos de onda são, aproximadamente, 19,05 cm e 24,45 cm.

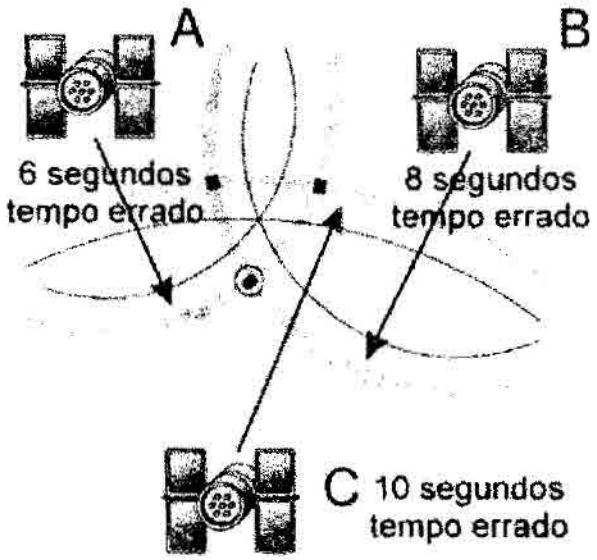


Fig. 2.4 - Medida de posicionamento no receptor.

FONTE: Dottori e Negraes (1997, p. 17)

O satélites podem ser identificados através de um número relacionado a um segmento particular do código pseudo-aleatório ("Pseudo Random Noise" - PRN), definido por uma seqüência de códigos modulados sobre as portadoras (Figura 2.5) que é atribuído individualmente a cada satélite (Seeber, 1993). Desta forma, todos os satélites GPS podem transmitir nas mesmas freqüências, diferenciando-se apenas pela modulação da portadoras L1 e L2. Os códigos pseudo-aleatórios transportam informações aos receptores através de seqüências de valores binários (0 e 1, ou +1 e -1) que parecem aleatórias, porém são identificadas sem ambiguidades.

Os códigos PRN modulados sobre as portadoras são conhecidos como código C/A ("Coarse/Acquisition"), que está disponível para uso civil, e código P ("Precision"), restrito apenas a militares e usuários autorizados. O código C/A, com freqüência de 1,023 MHz, é transmitido apenas na portadora L1, onde está modulado sobre esta portadora em quadratura de fase com o código P e repete-se a cada 1 milisegundo. O código P, modulado em ambas as portadoras L1 e L2 com freqüência de 10,23 MHz, é gerado por um algoritmo que se repete a cada 266 dias. A seqüência de pulsos do código P não apresenta nenhuma simetria ao longo deste período, possibilitando o rastreamento de um satélite em particular, pois cada satélite transmite um segmento específico do código P em intervalos de 7 dias. Além dos códigos PRN, a mensagem de navegação é modulada sobre as portadoras contendo informações sobre os relógios, órbitas e funcionamento dos satélites.

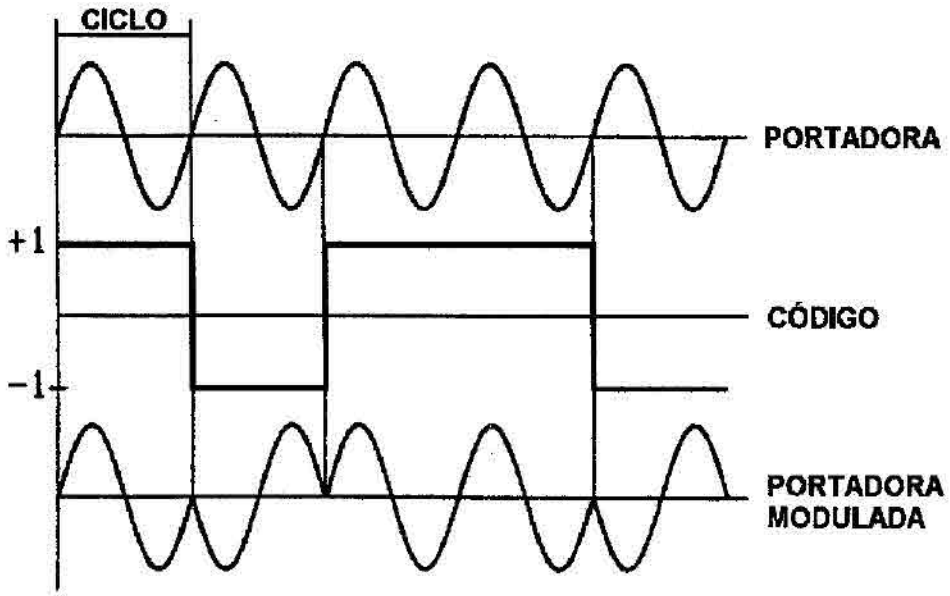


Fig. 2.5 - Modulação do código sobre a onda portadora.
FONTE: Hofmann-Wellenhof et al. (1994, p. 77).

As portadoras moduladas podem ser representadas pelas seguintes equações:

$$L1(t) = a_1 P(t)\, D(t) \cos [\omega_1 t + \phi(t)] + a_1 C/A(t)\, D(t) \operatorname{sen} [\omega_1 t + \phi(t)]$$

e

$$L2(t) = a_2 P(t)\, D(t) \cos [\omega_2 t + \phi(t)]$$

onde $a_i \cos [\omega_i t + \phi(t)]$ é a portadora não modulada, D(t) contém a mensagem de navegação, P(t) e C/A(t) representam as seqüências de pulsos dos códigos P e C/A, respectivamente. O índice i = 1,2 representa a portadora L1 ou L2, ω é a freqüência angular da portadora e $\phi(t)$ é o ruído da fase.

A restrição do código P ao uso civil ocorre através de um procedimento conhecido como "Anti-Spoofing" (AS). Neste caso, ao código P é somado um código secreto (código W), resultando no código Y. Assim, quando o AS está ativado, o código P nas portadoras L1 e L2 é substituído pelo código Y (Hofmann-Wellenhof et al., 1994). Este código de proteção evita que usuários não-autorizados transmitam sinais falsos, perturbando o sistema e causando erros de posicionamento. Além do "Anti-Spoofing", a precisão do sistema à usuários autorizados pode ser limitada por meio da degradação intencional do sinal do satélite através da disponibilidade seletiva ou "Selective Availability" (SA). Este método consiste na manipulação das efemérides e instabilização sistemática do relógio do satélite, resultando na introdução de erros nas medidas de pseudo-distâncias. O efeito da SA afeta identicamente os dados do GPS (Blewitt, 1990) e, portanto, é praticamente eliminado na diferenciação das observáveis (Monico, 1996). Por outro lado, as limitações na precisão do posicionamento devido ao AS variam entre 20 e 40 m para o código C/A, de acordo com Kremer et al. (1989), citado por Seeber (1993).

2.5 Receptores

Atualmente, existem diversos tipos de receptores que possuem características próprias e são utilizados em áreas específicas, tais como navegação, geodésia, atividades militares, entre outras. Apesar desta diversidade de equipamentos, os receptores em geral são

compostos basicamente pelos seguintes elementos (Seeber, 1993), de acordo com a Figura 2.6:

- antena com pré-amplificador
- seção de rádio freqüência (RF)
- oscilador de precisão
- dispositivo de armazenamento
- microprocessador
- interface para o usuário (painel de visualização e controle)
- fonte de energia

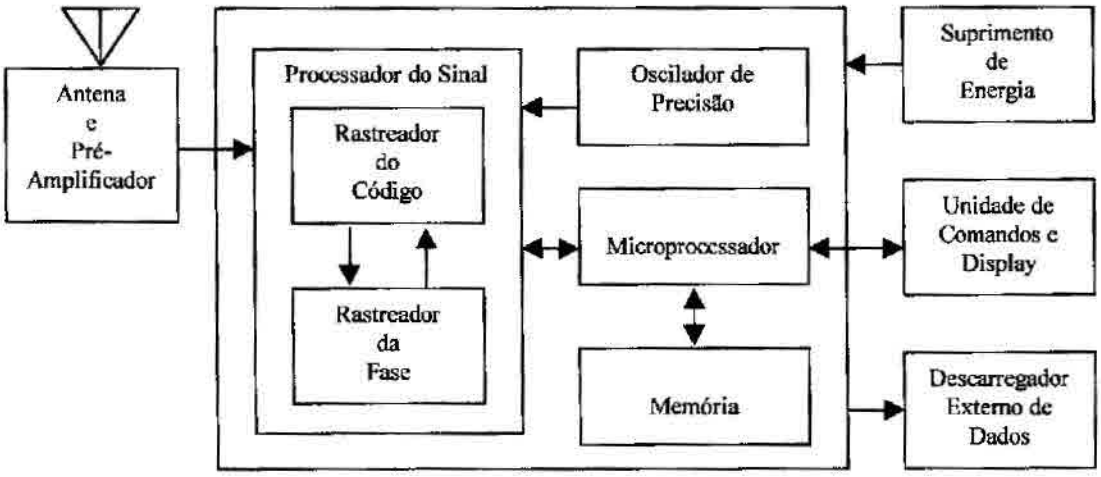


Fig. 2.6 - Principais componentes de um receptor GPS.
FONTE: Seeber (1993, p. 230).

Uma antena detecta os sinais dos satélites que são amplificados e filtrados para eliminar a maior quantidade possível de interferências. Em geral, os receptores utilizam uma antena onidirecional hemisférica, cujo diagrama de radiação permite a recepção do sinal em todas as elevações e azimutes do hemisfério visível. O sinal é enviado, posteriormente, à seção de rádio freqüência e processado em um ou mais canais, de acordo com o tipo de receptor. Alguns receptores podem sintonizar quatro ou mais satélites simultaneamente,

enquanto outros fazem um rastreamento alternado entre os satélites. A seção de rádio freqüência é formada por osciladores (onde é gerada a freqüência de referência), multiplicadores, filtros e misturadores. A freqüência de referência é controlada por osciladores de cristal quartzo, menos precisos do que os osciladores atômicos dos satélites, denominados osciladores de precisão. Os dados recebidos (observáveis e mensagens de navegação) devem estar constantemente disponíveis para um posterior processamento e, por este motivo, um dispositivo de armazenamento torna-se necessário. Alguns receptores têm memórias internas ou armazenam os dados em fitas magnéticas. Todavia, os dados podem ser gravados diretamente em micro-computadores conectados ao receptor. As operações do receptor, tais como aquisição e processamento dos sinais, decodificação das mensagens transmitidas e cálculos de posição e velocidade, são controladas pelo microprocessador. A comunicação entre o receptor e o usuário é estabelecida por meio de um painel de vizualização e controle e o fornecimento de energia para o funcionamento dos receptores pode ocorrer através de baterias internas recarregáveis ou fontes externas, conforme o período de tempo de utilização e tipo de receptor.

2.6 Aplicações do GPS

Inicialmente desenvolvido para atender às necessidades militares, o GPS vem ocupando um espaço crescente em diversas aplicações da área civil. A utilização do GPS em navegação aérea, marítima e terrestre é cada vez mais extensa, devido à disponibilidade contínua de dados em tempo real e a precisão proporcionada na determinação da posição. Todavia, existem aplicações onde a precisão torna-se um fator crítico e o efeito da degradação do sinal pode ser minimizado através da utilização do GPS Diferencial ("Differential GPS" - DGPS). Neste caso, um receptor situado em uma posição conhecida pode determinar os erros contidos no sinal do satélite e transmitir uma mensagem de correção a outros receptores situados em áreas próximas, possibilitando a obtenção de um posicionamento mais preciso. Navegação em rota, procedimentos de pouso e decolagem, aproximação de embarcações em portos e áreas restritas são alguns

exemplos de aplicações do GPS e DGPS. O GPS é ainda utilizado na determinação de órbitas e posição de outros satélites, na obtenção de medidas ionosféricas, em geodinâmica, fotogrametria, geodésia marinha e glacial (Hofmann-Wellenhof et. al, 1994; Parkinson, 1996; Seeber, 1993; Spilker Jr. e Parkinson, 1996).

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DA IONOSFERA SOBRE OS SINAIS DO GPS

3.1 Ionosfera

A parte da atmosfera superior onde íons e elétrons existem em quantidades suficientes para afetar a propagação das ondas de rádio é denominada de ionosfera (Standards on wave..., 1950). Esta região está situada, aproximadamente, entre 50 km e 1000 km de altura e sua formação está associada à radiação solar incidente na atmosfera terrestre e, em menor grau de importância, à radiação cósmica. Conseqüentemente, o comportamento desta região atmosférica depende do ângulo zenital solar, da latitude, da estação do ano e do nível de atividade solar.

A radiação solar, nos espectros do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X, ao incidir sobre a atmosfera neutra produz uma grande quantidade de íons positivos e elétrons livres, através do processo de fotoionização. À medida que esta radiação penetra na atmosfera mais densa a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons. Conseqüentemente, devido às diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes atmosféricos, distintas regiões são formadas na ionosfera, as quais são denominadas de camadas D, E, F1 e F2 (Figura 3.1).

A ionosfera pode ser considerada um plasma fracamente ionizado onde, na ausência de perturbações externas, a densidade eletrônica é aproximadamente igual à densidade iônica (neutralidade macroscópica). A exceção à esta igualdade ocorre na região D, situada entre 50 e 90 km de altura, onde os elétrons podem combinar com moléculas para formar íons negativos (Tascione, 1988). Este processo, conhecido como junção eletrônica ou "attachment", ocorre à noite e causa o desaparecimento da camada D.

Todavia, na presença da radiação solar, os elétrons voltam a aparecer devido ao processo de "detachment". Nesta região, as principais fontes de radiação para a produção de íons são os Raios-X solares e a radiação cósmica galáctica (especialmente responsável pela ionização na parte inferior da camada). A ionização da região D é altamente dependente da atividade solar, aumentando consideravelmente em períodos perturbados (Banks e Kockarts, 1973).

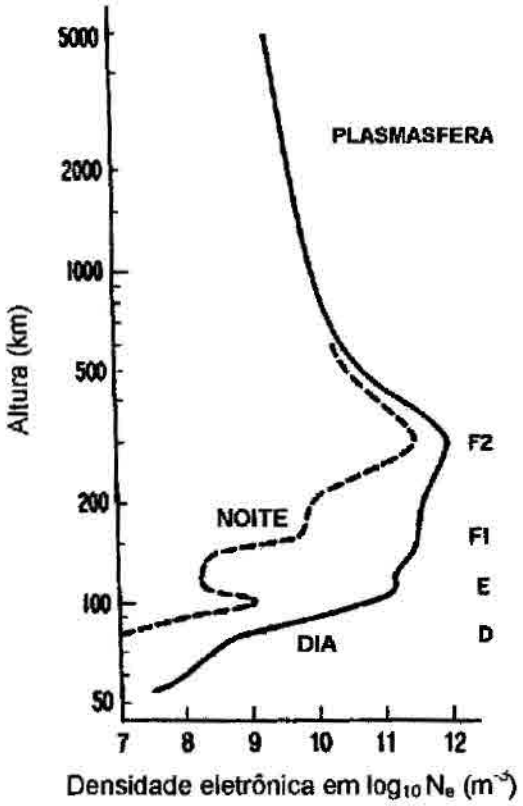


Fig. 3.1 - Perfil vertical típico da ionosfera.
FONTE: Davies (1990, p. 57)

A região E localiza-se entre 90 e 140 km de altura, tendo como principal fonte de ionização a radiação solar no espectro dos raios-X moles. Essencialmente, o comportamento da camada E depende da posição do sol em relação ao zênite e da atividade solar, apresentando máxima concentração eletrônica em horários próximos ao meio-dia local e em períodos com maior ocorrência de manchas solares. À noite, esta

camada torna-se tão tênue que, normalmente, sua presença pode ser desprezada (Tascione, 1988). Uma camada ionizada relativamente mais densa, com alguns quilômetros de espessura e algumas centenas de quilômetros de extensão, freqüentemente aparece nesta região em altitudes entre 100 e 120 km de altura, denominada camada E esporádica. Em latitudes médias, o surgimento da camada E esporádica é suposto estar associado à intensos cisalhamentos verticais de vento e precipitação de fragmentos de meteoros; em latitudes baixas, ocorre devido à instabilidade causada pela alta velocidade de deriva dos elétrons e em altas latitudes, provavelmente seja resultado da precipitação de partículas (McNamara, 1991; Tascione, 1988).

A camada F1, cujos limites inferior e superior estão aproximadamente situados em 140 e 200 km de altura, tem como principal fonte de ionização a radiação solar no espectro do EUV. A camada F1 pode ser observada somente durante o dia, pois a concentração eletrônica é controlada, fundamentalmente, pelo ângulo zenital solar. A variação sazonal e a atividade solar também influenciam no comportamento desta camada, que é mais pronunciada nos períodos de verão, em épocas de menor número de manchas solares e durante a ocorrência de perturbações ionosféricas (Davies, 1990).

A camada F2 estende-se desde 200 km de altura até o início da plasmasfera, em aproximadamente 1000 km. A principal característica desta camada é a existência de uma região de máxima concentração eletrônica, situada tipicamente entre 250 e 400 km de altitude, cuja formação deve-se à competição entre processos químicos e de transporte de plasma. A radiação ionizante desta camada é basicamente a mesma radiação responsável pela ionização da camada F1 porém, ao contrário desta, a camada F2 não segue a mesma variação diurna e sazonal (Davies, 1990). Os processos de transporte e as perturbações associadas às tempestades magnéticas tornam a variação temporal e espacial desta camada extremamente complexa, onde a radiação solar desempenha um papel limitado na produção e manutenção de elétrons livres. O pico de densidade eletrônica tende a atingir um valor máximo logo após o pôr-do sol, devido à processos de transporte de plasma (Rich, 1985), e a camada F2 pode persistir por toda a

noite, embora sua intensidade diminua continuamente, pois a atmosfera neutra nesta região da atmosfera é suficientemente tênue para evitar que haja uma recombinação significativa (Beard, 1975). Valores mínimos ocorrem pouco antes do amanhecer, devido à recombinação dos elétrons durante o período noturno (McNamara, 1991), e aumentam gradativemente durante o decorrer do dia. A densidade eletrônica no pico da camada F2 tende a ser consideravelmente maior no inverno do que no verão, caracterizando a anomalia de inverno, ou anomalia sazonal, que é mais evidente nas latitudes médias e ocorre somente durante o dia (Davies, 1990), não existindo em períodos de mínimo número de manchas solares (Rishbeth e Garriott, 1969). Uma grande dependência geomagnética na distribuição global da densidade eletrônica pode ser observada em regiões próximas às latitudes geomagnéticas de ± 20°, onde a concentração de elétrons é máxima, caracterizando a anomalia equatorial. Existe, ainda, uma influência do ciclo solar no comportamento da camada F2. Exceto para períodos perturbados, o aumento da freqüência crítica e da altura máxima do pico da camada F2 são proporcionais ao aumento da atividade solar (Johnson, 1961; McNamara, 1991).

3.2 Plasmasfera

A região inferior da magnetosfera situada, aproximadamente, entre 1.000 km e 30.000 km de altura é conhecida como plasmasfera. Os íons predominantes nesta região da atmosfera são os prótons, cuja concentração decresce exponencialmente com a altitude. O comportamento da densidade eletrônica na plasmasfera é consideravelmente afetado pelo ciclo solar e pela variação sazonal. Essencialmente, não há produção de plasma nesta região: durante o dia, o plasma ionosférico difunde-se verticalmente em direção à plasmasfera; à noite, ocorre o inverso. Este processo auxilia na manutenção da camada F durante a noite (Davies, 1990). O conteúdo eletrônico plasmasférico pode variar entre 10% do valor do conteúdo eletrônico ionosférico existente durante o dia, quando a densidade eletrônica da região F2 é alta, até aproximadamente 50% durante o período noturno, quando a densidade da região F2 é reduzida (Klobuchar, 1996), dependendo da época do ano e nível de atividade solar (Davies, 1990).

3.3 Conteúdo Eletrônico Total

O Conteúdo Eletrônico Total (CET) representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde a superfície terrestre até uma determinada altura na atmosfera, e cuja área da base é unitária. Este parâmetro ionosférico é medido em unidades de CET (UCET), em analogia à abreviatura TECU ("Total Electron Content Unit"), onde 1 UCET corresponde a 1×10^{16} elétrons/m^2. O CET é altamente dependente da radiação solar ionizante e apresenta distintas variações diurnas e sazonais, variações relacionadas ao nível de atividade solar e às tempestades magnéticas. Adicionalmente, os efeitos do campo elétrico e ventos neutros, as variações de temperatura e a composição da atmosfera neutra têm sua parcela de influência no comportamento do CET (Klobuchar, 1985).

As variações diurnas do conteúdo eletrônico dependem, entre outros fatores, da latitude, da época do ano e do nível de atividade solar. Em geral, o CET apresenta um máximo durante o dia e um mínimo pouco antes do amanhecer (Davies, 1990). Um segundo pico pode ser observado após o pôr-do-sol, em médias e baixas latitudes (Titheridge, 1973; Souza, 1992). Nas regiões de médias latitudes, o CET pode apresentar valores consideravelmente maiores no inverno do que no verão, caracterizando a anomalia sazonal. Este fenômeno ocorre somente durante o dia e torna-se observável à medida que a atividade solar cresce (Rishbeth e Garriott, 1969). Por outro lado, valores de CET maiores nos equinócios do que nos solstícios determinam uma variação semi-anual deste parâmetro, resultado do equilíbrio entre a intensidade da radiação solar e a densidade da atmosfera neutra, de acordo com Golton (1964), citado por Kantor (1969). Em geral, o conteúdo eletrônico decresce em direção aos pólos, aumentando de forma irregular na região auroral devido à precipitação de partículas. Todavia, os valores máximos globais deste parâmetro ocorrem nas latitudes aproximadas de ±15° em relação ao equador magnético, que correspondem à região dos picos da anomalia equatorial. O acúmulo de plasma nestas latitudes está associado ao efeito fonte: o plasma é elevado na região do equador (resultado da deriva eletromagnética ($\mathbf{E}\times\mathbf{B}$) causada por um campo elétrico na direção leste-oeste, gerado na região E), e difunde-se

ao longo das linhas de força do campo magnético e deposita-se ao norte e sul do equador magnético, aumentando a concentação eletrônica nestas regiões. Uma representação do comportamento médio global de CET é ilustrado na Figura 3.2.

O valor do conteúdo eletrônico total é proporcional ao aumento da atividade solar. Em períodos de máxima atividade, o CET máximo diurno pode atingir valores até 50% maiores do que em períodos de mínima atividade (Beard, 1975). Variações diurnas e sazonais também podem ser observadas nos diferentes estágios do ciclo solar. Ao contrário dos períodos magneticamente calmos, onde o conteúdo eletrônico apresenta um comportamento essencialmente regular e previsível, durante as tempestades magnéticas o CET exibe uma grande variabilidade. Poucas horas após o início da tempestade, há um aumento do conteúdo eletrônico seguido por um decréscimo nas horas seguintes. A precipitação de partículas na região auroral e o aquecimento Joule, devido às correntes aurorais, aquecem a atmosfera. Este aquecimento produz ventos neutros que fluem na direção do equador e elevam o plasma para as regiões do campo geomagnético onde a concentração de elétrons é menor, resultando em uma tempestade positiva. O decréscimo do conteúdo eletrônico, associado à fase negativa da tempestade, resulta das variações na taxa de recombinação de elétrons, devido aos ventos neutros que transportam a perturbação em direção ao equador. O conteúdo eletrônico pode seguir diretamente ao estágio negativo quando o início da tempestade ocorre à noite, em médias latitudes (Davies, 1990). As regiões equatoriais são menos afetadas pelas tempestades, em comparação com as altas latitudes, e seu efeito sobre a ionosfera é mais significativo nos períodos de verão e equinócios (McNamara,1991).

3.4 Propagação de Ondas na Ionosfera

Os sinais emitidos pelos satélites GPS são afetados pela ionosfera, ao se propagarem através deste meio anisotrópico. Este fato é uma decorrência da natureza dispersiva da ionosfera, onde a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua freqüência. Os principais efeitos desta região atmosférica sobre os sinais do GPS são o atraso de grupo na modulação do sinal, o avanço na fase portadora, o

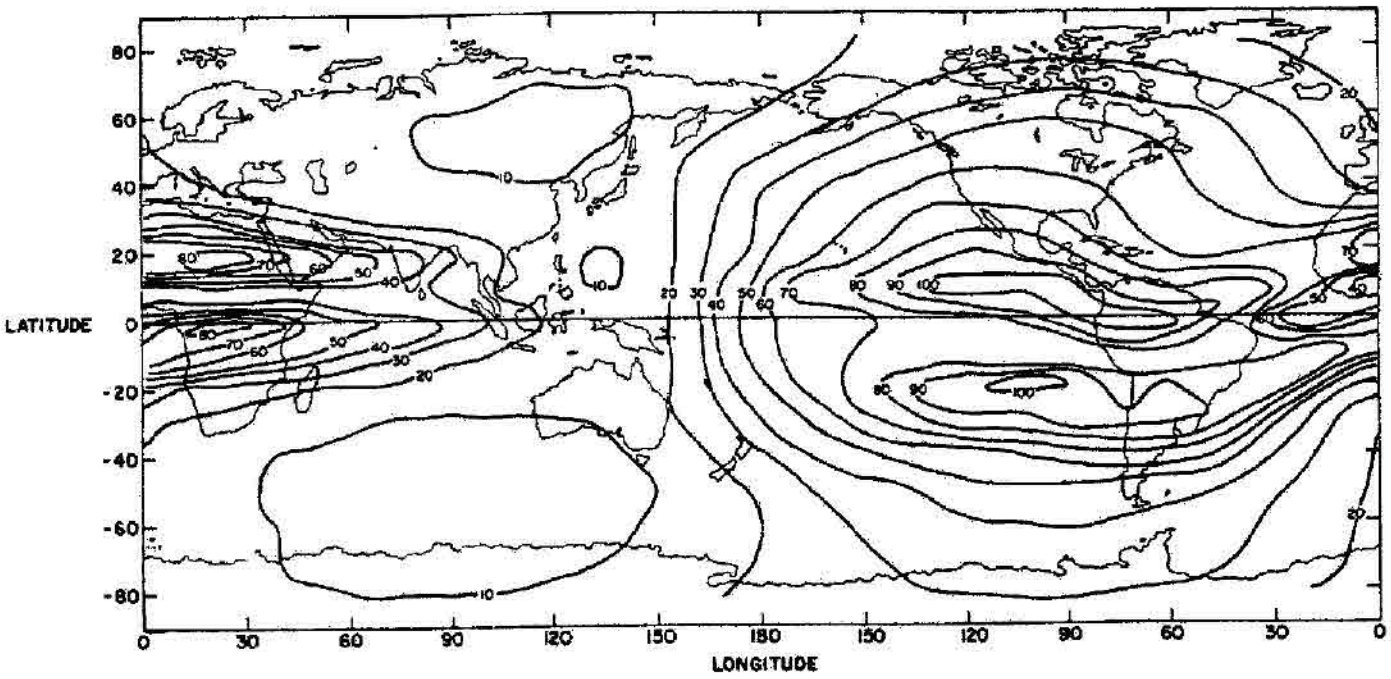


Fig. 3.2 - Contornos do CET vertical, em unidades de 10^{16} el/m^2, para as 20:00 UT (Março 1980).

FONTE: Klobuchar (1985, p. 10-90).

deslocamento Doppler, a rotação da polarização do sinal, a refração da onda de rádio, a distorção na forma de onda do pulso, a cintilação da fase do sinal, o enfraquecimento e a cintilação da amplitude do sinal (Klobuchar, 1996). O método utilizado neste trabalho para a determinação do conteúdo eletrônico total está relacionado ao atraso da modulação e avanço na fase da portadora. Estes efeitos, assim como a teoria que envolve a propagação de ondas em um meio anisotrópico, serão discutidos nesta seção. Posteriormente, uma breve descrição do efeito Faraday será apresentada, devido à sua ampla utilização na obtenção de medidas do conteúdo eletrônico durante um período de mais de 3 décadas (Klobuchar, 1985), antes do surgimento do GPS.

3.4.1 Propagação de Ondas em um Meio Isotrópico

A propagação de ondas eletromagnéticas através de um determinado meio deve satisfazer as equações de Maxwell. Considerando um meio eletricamente e magneticamente isotrópico, onde as densidades de carga e corrente elétrica sejam nulas, tais equações podem ser escritas na seguinte forma (Davies, 1990):

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \mathbf{0} \tag{3.1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0} \tag{3.2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \tag{3.3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \tag{3.4}$$

onde $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$. As quantidades $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ são os vetores deslocamento elétrico, indução magnética, intensidade elétrica e intensidade magnética e as constantes

ε e μ representam a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, respectivamente.

Tomando o rotacional de (3.3) e substituindo (3.4) neste resultado, obtém-se:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\varepsilon \, \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}.$$

Utilizando a identidade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ na expressão anterior e observando que $\nabla \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}$, obtém-se a equação da onda:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \, \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \tag{3.5}$$

Esta equação pode ter como solução uma onda plana do tipo $\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_0 \exp\, i(\omega\, t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$, onde ω é a freqüência angular da onda e $\mathbf{k}$ é o vetor da onda. Utilizando esta notação complexa, os operadores ∇ e $\partial/\partial t$ tornam-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} = i\omega \tag{3.6}$$

e

$$\nabla = -\, i\mathbf{k}. \tag{3.7}$$

Substituindo esta notação na equação (3.5), obtém-se o número de onda (representado pelo módulo de $\mathbf{k}$):

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}. \tag{3.8}$$

De acordo com a equação (3.5), a velocidade de propagação de uma onda plana é dada por $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$. Relacionando esta expressão com a equação (3.8), obtém-se:

$$v = \frac{\omega}{k} \tag{3.9}$$

e o índice de refração n do meio é dado por:

$$n = \frac{c}{v} \tag{3.10}$$

onde c corresponde à velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, através do vácuo.

3.4.2 Polarização

Seja uma onda plana propagando-se na direção positiva do eixo z, em um meio eletricamente neutro e anisotrópico, onde o campo elétrico **E** e a polarização elétrica **P** do meio têm direções diferentes. Considerando que a polarização seja uma função das oscilações da carga, a anisotropia elétrica do meio é dada por:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}. \tag{3.11}$$

As propriedades magnéticas para um gás ionizado e para o vácuo são, essencialmente, as mesmas (Davies, 1990). Portanto,

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \tag{3.12}$$

Considerando que os vetores elétricos e magnéticos da onda não variam nas direções x e y, a utilização de (3.7) nas equações (3.1) e (3.2) resulta nas expressões:

$$D_z = \varepsilon_0 E_z + P_z = 0 \tag{3.14}$$

e

$$B_z = \mu_0 H_z = 0 \tag{3.15}$$

Similarmente, utilizando a notação complexa nas equações (3.3) e (3.4), obtém-se:

$$-kE_y = \mu_0 \omega H_x \tag{3.16}$$

$$kE_x = \mu_0 \omega H_y \tag{3.17}$$

$$kH_y = i\omega\left(\varepsilon_0 E_x + P_x\right) \tag{3.18}$$

$$-kH_x = i\omega\left(\varepsilon_0 E_y + P_y\right). \tag{3.19}$$

Substituindo (3.16) em (3.19) obtém-se, após algumas operações algébricas, a seguinte expressão:

$$n^2 = 1 + \frac{P_y}{\varepsilon_0 E_y} \tag{3.20}$$

e, da mesma forma, substituindo-se (3.17) em (3.18), resulta:

$$n^2 = 1 + \frac{P_x}{\varepsilon_0 E_x} \tag{3.21}$$

Relacionando as equações (3.20) e (3.21) e este resultado às equações (3.16) e (3.17), obtém-se a polarização da onda R:

$$R = \frac{E_y}{E_x} = \frac{P_y}{P_x} = -\frac{H_x}{H_y}. \tag{3.22}$$

3.4.3 Propriedades do Plasma

A ionosfera é considerada um plasma fracamente ionizado, onde a densidade numérica de de íons e elétrons é aproximadamente igual. O movimento e a interação entre estas partículas, na presença de campos elétricos e magnéticos, serão descritos a seguir.

3.4.3.1 Freqüência Angular de Plasma

Na presença de um campo elétrico estático $\mathbf{E}$, a equação do movimento de um íon de carga e e massa m, na direção x, é dada por (Davies, 1966):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = eE. \tag{3.23}$$

A ocorrência de uma perturbação em um plasma, tal que haja deslocamento de íons positivos e elétrons, produz uma campo elétrico induzido:

$$E = -\frac{Nex}{\varepsilon_0}$$

onde N é a densidade numérica de íons. A atração eletrostática, por sua vez, produz uma força restauradora:

$$eE = -\frac{Ne^2x}{\varepsilon_0}$$

Substituindo este resultado em (3.23), obtém-se a equação do movimento de um elétron:

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{Ne^2x}{m\varepsilon_0}=0. \tag{3.24}$$

A equação (3.24) representa o movimento de um oscilador harmônico simples, cuja freqüência angular de plasma ω_N é dada por:

$$\omega_N^2=\frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}. \tag{3.25}$$

3.4.3.2 Freqüência Ciclotrônica

Na presença de um campo magnético externo $\mathbf{B}_0$, um íon de carga e e massa m que se move com uma velocidade $\boldsymbol{v}$ em uma região do espaço, é submetido à uma força (Bittencourt, 1995):

$$m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=e(\boldsymbol{v}\times\mathbf{B}_0). \tag{3.26}$$

A partir deste momento, $\mathbf{B}_0$ será referido apenas como campo magnético. A velocidade desta partícula tem componentes nas direções paralela e perpendicular ao campo magnético. A componente paralela não é afetada pelo campo magnético, e a velocidade ao longo de $\mathbf{B}_0$ mantém-se constante no tempo. A força resultante, portanto, deve-se apenas à componente do movimento na direção perpendicular à $\mathbf{B}_0$, ou seja:

$$m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=e(\boldsymbol{v}_\perp\times\mathbf{B}_0).$$

A partícula é, então, acelerada em torno das linhas de força do campo magnético. A projeção deste movimento sobre um plano perpendicular à $\mathbf{B}_0$ é um círculo de raio r_H e

a velocidade angular da partícula ω_H, denominada por freqüência ciclotrônica ou freqüência angular de plasma, é dada por (Davies, 1966):

$$\omega_H = \frac{eB_0}{m}. \tag{3.27}$$

3.4.3.3 Freqüência de Colisão

A colisão entre um elétron e os átomos ou moléculas de um determinado gás pode ocorrer quando o elétron aproximar-se dentro de uma distância r_a das moléculas deste gás, medida em relação aos centros das partículas. A freqüência média das colisões entre elétrons e partículas neutras ν_{ea} é determinada pela relação (Ratcliffe, 1962):

$$\nu_{ea} = \frac{v_e}{l_e} \tag{3.28}$$

onde v_e é a velocidade média dos elétrons. O termo l_e corresponde ao livre caminho médio dos elétrons:

$$l_e = \left(\pi\, r_a^2 n_a\right)^{-1} \tag{3.29}$$

onde n_a á a densidade numérica dos átomos ou moléculas.

A relação entre v_e e a temperatura T, de acordo com a teoria cinética dos gases, é dada por:

$$\frac{1}{2} m v_e^2 = \frac{3}{2} KT \tag{3.30}$$

onde m é a massa do elétron e K é a constante de Boltzmann. Substituindo as equações (3.30) e (3.29) na equação (3.28), obtém-se:

$$\nu_{ea} = \pi\, r_a^2 n_a \left(3\frac{KT}{m}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{3.31}$$

O movimento dos elétrons através de um gás composto por partículas neutras e ionizadas é influenciado, adicionalmente, pela força de Coulomb. Neste caso, o raio efetivo r_{ef} de colisão entre um íon e um elétron pode ser muito maior do que r_a, e o evento será considerado como colisão quando a deflexão do elétron alcançar uma determinada distância em relação ao íon, tal que as energias potencial e cinética do elétron sejam iguais, ou seja:

$$\frac{3}{2}KT = \frac{e^2}{\varepsilon_0 r_{ef}}. \tag{3.32}$$

A freqüência de colisão entre elétrons e íons ν_{ei}, derivada da equação (3.31), pode ser escrita na forma:

$$\nu_{ei} = \frac{4\pi}{3^{3/2}} \frac{e^4}{\varepsilon_0^2 m^{1/2}} (KT)^{-\frac{3}{2}} n_i \tag{3.33}$$

onde n_i corresponde à densidade numérica dos íons.

Finalmente, de acordo com Cowling (1945), citado por Ratcliffe (1962), a freqüência de colisão ν é dada por:

$$\nu = \nu_{ea} + \nu_{ei}$$

ou

$$\nu = 1{,}8\times10^{-8}\left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{1}{2}} n_a + 6{,}1\times10^{-3}\left(\frac{T}{300}\right)^{-\frac{3}{2}} n_i . \qquad (3.34)$$

3.4.4 Relações Constitutivas

As relações constitutivas são expressões que relacionam os vetores $\mathbf{P}$ e $\mathbf{E}$, em um meio magneto-iônico. Considerando o movimento dos elétrons sob a influência do campo elétrico da onda e de um campo magnético externo $\mathbf{B}_0$ uniforme e, ainda, considerando somente as colisões entre elétrons e moléculas neutras, as forças que atuam sobre estes elétrons são as seguintes: a força eletrostática $e\mathbf{E}$, a força de Lorentz $e\boldsymbol{v}\times\mathbf{B}_0$, devido ao movimento dos elétrons em relação ao campo magnético externo $\mathbf{B}_0$, a força de atrito $m\nu\boldsymbol{v}$ devido à perda de momentum dos elétrons através das colisões e a força devido ao movimento do elétron no campo magnético da onda. Esta última pode ser desprezada, pois a força que atua sobre os elétrons, devido ao campo magnético da onda, é muito menor do que a força devido ao campo elétrico da onda. Assim, a equação do movimento pode ser escrita na seguinte forma:

$$m\mathbf{a} = e\mathbf{E} + e\boldsymbol{v}\times\mathbf{B}_0 - m\nu\boldsymbol{v} . \qquad (3.35)$$

Utilizando a expressão (3.6), resulta em:

$$e\mathbf{E} = -m\omega^2\mathbf{r} - ei\omega\,\mathbf{r}\times\mathbf{B}_0 - m\nu i\omega\,\mathbf{r} . \qquad (3.36)$$

Multiplicando-se a equação acima pelo termo $Ne/m\varepsilon_0$ é possível, através do uso de (3.25) e (3.27), obter a seguinte expressão:

$$\varepsilon_0\frac{\omega_N^2}{\omega^2}\mathbf{E} = -\mathbf{P} - i\mathbf{P}\times\hat{\mathbf{B}}_0\frac{\omega_H}{\omega} + i\frac{\nu}{\omega}\mathbf{P} \qquad (3.37)$$

onde $\mathbf{P} = Ne\mathbf{r}$. Após algumas operações algébricas, obtém-se a seguinte expressão para as relações constitutivas:

$$-\varepsilon_0 X\mathbf{E} = (1 - iZ)\mathbf{P} + i\mathbf{P} \times \mathbf{Y} \tag{3.38}$$

onde $X = \omega_N^2 / \omega^2$, $Y = eB_0 / m\omega$, $Z = \nu / \omega$ e ω corresponde à freqüência angular da onda. Considerando que a onda propaga-se na direção z de um sistema ortogonal de eixos e o campo magnético externo esteja situado no plano xz, em relação à este sistema, as componentes da equação (3.38) podem ser escritas na seguinte forma:

$$-\varepsilon_0 XE_x = P_x + iY_L P_y - iZP_x \tag{3.39}$$

$$-\varepsilon_0 XE_y = P_y + iY_T P_z - iY_L P_x - iZP_y \tag{3.40}$$

$$-\varepsilon_0 XE_z = P_z - iY_T P_y - iZP_z \tag{3.41}$$

onde $Y_L = eB_L / m\omega$ e $Y_T = eB_T / m\omega$. Os índices L e T referem-se, respectivamente, às componentes longitudinal e transversal ao campo magnético, relativas à direção de propagação da onda.

3.4.5 Índice de Refração em um Meio Anisotrópico

Uma expressão que relaciona a polarização da onda R e os termos X, Y e Z pode ser obtida a partir das relações constitutivas. Substituindo a equação (3.14) na equação (3.41), obtém-se:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{iY_T}{1 - iZ - X}. \tag{3.42}$$

Multiplicando as equações (3.39) e (3.40), respectivamente, por P_y e P_x e subtraindo estes resultados, obtém-se:

$$Y_L P_y^2 = Y_T P_x P_z - Y_L P_x^2 . \tag{3.43}$$

Substituindo-se (3.42) em (3.43) e lembrando que $R = P_y / P_x$, resulta na seguinte equação quadrática:

$$Y_L R^2 - \frac{iY_T^2}{1 - X - iZ} R + Y_L = 0 . \tag{3.44}$$

Em geral, existem duas soluções distintas para a equação acima, que correspondem às duas ondas características possíveis de existir no meio considerado, as quais são dadas por:

$$R = \frac{i}{2Y_L} \left\{ \frac{Y_T^2}{1 - X - iZ} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1 - X - iZ)^2} + 4Y_L^2} \right\} . \tag{3.45}$$

A equação que representa o índice de refração em um meio anisotrópico é, então, obtida a partir da substituição de (3.39) e (3.22) na equação (3.21), o que resulta em:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 + iY_L R - iZ} . \tag{3.46}$$

e, posteriormente, utilizando a equação (3.45) na expressão acima, obtém-se:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}} . \tag{3.47}$$

A partir da equação acima, conhecida como fórmula de Appleton-Hartree, dois métodos utilizados na determinação do conteúdo eletrônico total serão derivados: o primeiro

método, sobre o qual está baseado este trabalho, envolve o atraso da modulação e avanço na fase da portadora do sinal transmitido pelo satélite GPS, cuja freqüência é da ordem de 1 GHz; o segundo, relacionado ao efeito Faraday, será descrito brevemente com o objetivo de proporcionar uma comparação entre ambos os métodos.

3.4.6 Efeitos da Ionosfera sobre os Sinais do GPS

A influência da ionosfera sobre a propagação de ondas de rádio é descrita através do índice de refração. Considerando que, neste meio anisotrópico, a freqüência ciclotrônica tem um valor típico de 1,5 MHz e a freqüência de colisão é da ordem de 10^4 Hz (Klobuchar, 1996), os termos Y_T, Y_L e Z da expressão (3.47) podem ser desprezados. Assim, esta equação pode ser aproximada por:

$$n^2 = 1 - X . \tag{3.48}$$

O termo X, definido na equação (3.38), pode ser reescrito na forma $X = f_N^2 / f^2$, através da relação $f = \omega / 2\pi$, onde f é a freqüência da onda. Considerando que a freqüência de plasma, na ionosfera, raramente excede 20 MHz (Klobuchar, 1996) e, portanto, $f >> f_N$, é possível efetuar a seguinte expansão em série binomial:

$$\sqrt{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2}$$

e o índice de refração ionosférico, então, torna-se:

$$n = 1 - \frac{X}{2} . \tag{3.49}$$

A ionosfera é um meio dispersivo, onde a velocidade de fase varia de acordo com a freqüência da onda que a atravessa. A velocidade de fase corresponde à velocidade de

uma onda senoidal pura (Beard, 1975), enquanto que a velocidade de propagação da modulação de uma onda é denominada velocidade de grupo. Na ionosfera, estas velocidades são distintas e, de acordo com a equação (3.9), a velocidade de fase da portadora do sinal é dada por:

$$v_p = \frac{\omega}{k} \tag{3.50}$$

e o índice de refração de fase, de acordo com a equação (3.49), é dado por:

$$n_p = 1 - \frac{X}{2}. \tag{3.51}$$

Utilizando-se a equação (3.10), a expressão acima pode ser reescrita na forma:

$$v_p = \frac{c}{1-(X/2)}. \tag{3.52}$$

Relacionando as equações (3.50) e (3.52), em termos de k, e diferenciando este resultado, obtém-se a seguinte expressão para a velocidade de grupo:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{1+(X/2)} \tag{3.53}$$

onde o índice de refração de grupo, de acordo com a equação (3.10), é dado por:

$$n_g = 1 + \frac{X}{2}. \tag{3.54}$$

Comparando-se as equações (3.51) e (3.54), é possível observar que:

$$n_g > n_p$$

e, conseqüentemente,

$$v_g < v_p$$

demonstrando que o efeito da ionosfera sobre as velocidades de fase e grupo é aproximadamente igual em magnitude, porém com sinais contrários (Seeber, 1993), o que corresponde a um atraso no grupo e um avanço na fase da portadora modulada. Esta última, embora propague-se com velocidade maior do que a velocidade da luz, não transporta nenhuma informação (Klobuchar, 1996).

A presença da ionosfera na trajetória de propagação das ondas de rádio transmitidas pelos satélites causa um desvio destes sinais em relação ao caminho geométrico retilíneo entre satélite e receptor, além de afetar a velocidade de propagação do sinal. Considerando que, no vácuo, uma onda eletromagnética propaga-se com a velocidade da luz, o intervalo de tempo necessário para o sinal percorrer a distância satélite-receptor será diferente daquele onde a ionosfera encontra-se presente na trajetória de propagação da onda. Desta forma, a diferença entre a distância s percorrida pelo sinal, desde a sua emissão até a sua chegada ao receptor, e a distância geométrica s_0 entre estes dois pontos pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\Delta^{iono} = \int n ds - \int ds_0 \tag{3.55}$$

onde $n = 1$ para s_0. Considerando que, para altas freqüências, a trajetória do sinal pode ser aproximada pela distância geométrica $(ds \approx ds_0)$ e substituindo (3.51) e (3.54) na equação acima, obtém-se as refrações ionosféricas de fase e grupo:

$$\Delta_p^{iono} = -\int \frac{40{,}3}{f^2} N ds_0 \,. \tag{3.56}$$

$$\Delta_g^{iono} = \int \frac{40,3}{f^2} N ds_0 \tag{3.57}$$

onde,

$$\frac{X}{2} = \frac{e^2 N}{8\pi^2 \varepsilon_0 m f^2} = \frac{40,3N}{f^2}$$

e os termos N e f são dados, respectivamente, em el/m^2 e Hertz. As equações (3.56) e (3.57) demonstram que a distância satélite-receptor medida por meio da fase da portadora é menor do que a distância s_0, enquanto que a distância medida através da portadora modulada é maior do que a distância geométrica satélite-receptor, e a quantidade desta diferença é a mesma para ambos os casos.

O efeito da refração ionosférica é diretamente proporcional ao número de elétrons presentes ao longo da trajetória de propagação de uma onda eletromagnética, o que define o conteúdo eletrônico total:

$$CET = \int N ds_0 \,. \tag{3.58}$$

Assim, reescrevendo as equações (3.56) e (3.57), obtém-se:

$$\Delta_p^{iono} = -\frac{40,3}{f^2} CET \tag{3.59}$$

e

$$\Delta_g^{iono} = \frac{40,3}{f^2} CET \tag{3.60}$$

onde o CET é dado em eletrons/m^2.

3.4.7 Efeito Faraday

O efeito Faraday consiste na rotação do plano de polarização de uma onda eletromagnética linearmente polarizada que se propaga através de um meio magneto-iônico. Um sinal de rádio transmitido via satélite, ao encontrar a ionosfera, divide-se em duas componentes: ordinária e extraordinária. Estas componentes têm rotação da polarização em sentidos opostos, velocidades e trajetórias de propagação próprias e índices de refração distintos, resultando na rotação do plano de polarização da onda eletromagnética original. O número de rotações experimentados por esta onda depende do número de elétrons existentes ao longo da trajetória de propagação do sinal e da componente longitudinal do campo magnético terrestre (Titheridge, 1973), e pode ser obtido por meio da seguinte comparação entre as distâncias percorridas pela fase da onda através da ionosfera P e do vácuo R (Garriott, 1970):

$$\Delta P = R - P \tag{3.61}$$

onde,

$$P = \int n \cos\alpha \, ds \tag{3.62}$$

e

$$R = \int ds \, . \tag{3.63}$$

Neste caso, n é o índice de refração de fase na direção normal da onda, α é o ângulo entre a direção normal à frente de onda e a direção de propagação e a integral é obtida ao longo da trajetória de propagação entre satélite-receptor. Existem equações similares para cada componente da onda, desde que o acoplamento entre tais modos seja desprezível. Esta condição é satisfeita para altas freqüências, em regiões onde a aproximação quase longitudinal é válida (Garriott, 1970), ou seja, quando:

$$\left| Y_T^2 / 2Y_L \right| << \left| 1 - X - iZ \right| . \tag{3.64}$$

Considerando que a freqüência de plasma, na ionosfera, raramente excede 20 MHz, a freqüência ciclotrônica tem um valor típico de 1,5 MHz, a freqüência de colisão é da ordem de 10^4 Hz (Klobuchar, 1996) e os sinais transmitidos pelos satélites utilizados na obtenção das medidas de rotação Faraday possuíam freqüências da ordem de 10^2 MHz, a aproximação acima aplicada à equação (3.45) resulta em:

$$R = \mp\, i \tag{3.65}$$

e, desprezando o termo devido às colisões, a equação (3.47) reduz-se à seguinte forma:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 \pm Y_L}. \tag{3.66}$$

Os termos X e Y_L são muito menores do que a unidade, permitindo expandir em série a expressão acima. Portanto, o índice de refração será dado por:

$$n \approx 1 - \frac{1}{2} X \pm \frac{1}{2} X Y_L. \tag{3.67}$$

Na propagação de ondas com freqüências altas, a trajetória percorrida pelo sinal é aproximadamente igual à distância geométrica satélite-receptor ($cos\alpha \approx 1$) e a equação (3.61) pode ser reescrita na forma:

$$\Delta P = \int (1 - n)\, ds. \tag{3.68}$$

De acordo com Garriott (1970), a polarização da onda resultante é dada pela rotação angular Ω, em radianos, onde:

$$\Omega = \frac{\pi}{\lambda} \left(\Delta P_{ord} - \Delta P_{ext} \right). \tag{3.69}$$

Substituindo as equações (3.68) e (3.67) na expressão acima, obtém-se:

$$\Omega \approx \frac{\pi}{\lambda} \int XY_L \, ds \tag{3.70}$$

ou

$$\Omega \approx \frac{2{,}36 \times 10^4}{f^2} \int NB_L \, ds \tag{3.71}$$

em unidades MKS. A influência direta do campo magnético terrestre na determinação do CET através do método de rotação Faraday pode ser observada na equação acima. No caso do GPS, o efeito do campo magnético é de segunda ordem (Davies , 1990). Considerando que o campo magnético terrestre decresce na razão aproximada de $1/r^3$, onde r é a distância radial terrestre, a integral do produto entre B_L e N é desprezível acima de 2000 km de altura. Portanto, o conteúdo eletrônico obtido através das medidas de rotação Faraday não inclui a contribuição dos elétrons situados acima de 2000 km (Klobuchar,1985; Titheridge, 1973).

O valor médio de B_L para a altura de 400 km, pode ser utilizado na determinação do conteúdo eletrônico até aproximadamente 1000 km de altura, com uma boa precisão (Titheridge, 1972). Desta forma, a equação (3.71) pode ser escrita na forma:

$$\Omega \approx \frac{2{,}36 \times 10^4}{f^2} \overline{B_L} \int N ds \,, \tag{3.72}$$

ou seja,

$$\Omega \approx \frac{2{,}36 \times 10^4}{f^2} \overline{B_L} \; CET \tag{3.73}$$

obtendo-se, assim, o conteúdo eletrônico total.

CAPÍTULO 4

DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL A PARTIR DE DADOS DO GPS

4.1 Observáveis

As observáveis básicas do GPS podem ser identificadas pelos seguintes tipos, de acordo com Seeber (1993):

- pseudo-distâncias a partir de medidas do código;
- diferenças de pseudo-distâncias a partir da contagem Doppler integrada;
- fase ou diferença de fase da portadora;
- diferenças no tempo de propagação do sinal, a partir de medidas interferométricas.

Entretanto, as observáveis mais utilizadas são as pseudo-distâncias e as fases da portadora, as quais serão discutidas a seguir.

4.1.1 Pseudo-Distâncias

As pseudo-distâncias obtidas a partir do código ("code pseudoranges") correspondem às medidas de distância entre satélite e receptor, obtidas através da comparação entre segmentos específicos dos códigos PRN gerados pelos osciladores dos satélites e as respectivas réplicas geradas internamente no receptor. O sinal recebido apresenta um deslocamento em relação ao sinal gerado pelo receptor. Desta forma, o intervalo de tempo necessário para que ocorra a máxima correlação entre ambos corresponde ao tempo de propagação do sinal enviado pelo satélite até sua chegada ao receptor (Figura 4.1). Considerando que apenas os erros devido à sincronização dos relógios afetam esta medida, a diferença de tempo Δt entre o instante da emissão (t^S) e recepção (t_R) do sinal, pode ser representada por (Hofmann-Wellenhof et al., 1994):

$$\Delta t = t_R - t^S \tag{4.1}$$

$$\Delta t = \left[t_R(GPS) - \delta_R\right] - \left[t^S(GPS) - \delta^S\right]$$

$$\Delta t = \Delta t(GPS) + \Delta\delta \tag{4.2}$$

onde $\Delta t(GPS) = t_R(GPS) - t^S(GPS)$ e $\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$. Os termos δ^S e δ_R representam, respectivamente, os desvios dos relógios do satélite e receptor em relação ao sistema de tempo do GPS. Multiplicando-se Δt pela velocidade da luz c, obtemos a pseudo-distância:

$$\rho = c\Delta t = c\Delta t(GPS) + c\Delta\delta = R + c\Delta\delta \tag{4.3}$$

onde R é a distância geométrica satélite-receptor.

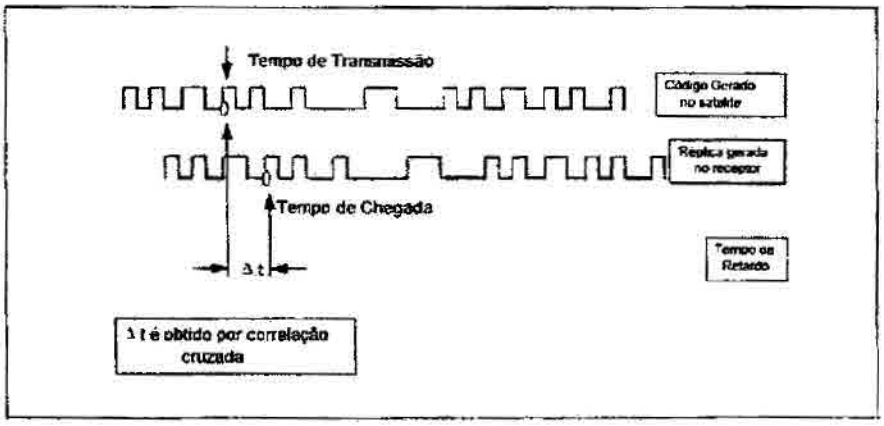


Figura 4.1 - Princípio da medida de pseudo-distância.
FONTE: Monico (1998, p.76).

4.1.2 Fase de Batimento da Onda Portadora

As medidas de fase de batimento da portadora ("phase pseudoranges") correspondem às diferenças de fase entre o sinal de referência gerado pelo oscilador do receptor e o sinal por este recebido, transmitido pelo satélite. A fase de batimento da portadora φ_R^S (em ciclos), de acordo com Hofmann-Wellenhof et al. (1994), é dada por:

$$\varphi_R^S(t) = \varphi^S(t) - \varphi_R(t) \tag{4.4}$$

onde φ^S é a fase da portadora recebida, φ_R é a fase da portadora gerada no receptor e t refere-se ao sistema de tempo GPS iniciado no instante $t_0 = 0$. Considerando apenas a influência dos erros devido à sincronização dos relógios nas medidas de fase, a diferença entre a fase do sinal emitido pelo satélite e a fase deste sinal, no momento de sua chegada ao receptor, é decorrente do tempo de propagação da onda através da distância R. Neste caso, as equações de fase podem ser representadas por:

$$\varphi^S(t) = f^S t - f^S \frac{R}{c} - \varphi_0^S \tag{4.5}$$

e

$$\varphi_R(t) = f_R t - \varphi_{0R} \tag{4.6}$$

onde f^S e f_R são, respectivamente, as freqüências dos sinais gerados pelos osciladores do satélite e receptor. As fases iniciais φ_0^S e φ_{0R}, que contêm os desvios dos relógios em relação ao tempo GPS, são dadas por:

$$\varphi_0^S = f^S \delta^S$$

e

$$\varphi_{0R} = f_R \delta_R .$$

Portanto, a equação (4.4) pode ser reescrita na forma:

$$\varphi_R^S(t) = -f^S \frac{R}{c} - f^S \delta^S + f_R \delta_R + \left(f^S - f_R\right) t . \tag{4.7}$$

O desvio das freqüências f^S e f_R em relação à freqüência nominal é muito pequeno, de forma que $f^S \approx f_R \approx f$. Assim, a fase do batimento da portadora reduz-se à seguinte equação:

$$\varphi_R^S(t) = -f \frac{R}{c} - f\Delta\delta \tag{4.8}$$

Considerando que a emissão do sinal, pelo satélite, ocorra no instante t_0 e que a medida da fase do batimento da portadora, no receptor, seja iniciada a partir deste mesmo instante de tempo, o número inteiro de ciclos contidos na trajetória do sinal, desde sua emissão até sua chegada ao receptor será desconhecido. Esta incógnita, conhecida como ambigüidade (N), deve ser considerada na medida de $\varphi_R^S(t)$ e permanece invariável enquanto o rastreio do satélite for contínuo. Portanto, a fase do batimento em um determinado instante t é dada por:

$$\varphi_R^S(t) = \Delta\varphi_R^S|_{t0}^{t} + \mathrm{N} \tag{4.9}$$

onde $\Delta\varphi_R^S$ corresponde à fase fracional mensurável no receptor. Substituindo a equação (4.9) na equação (4.8) e considerando, por simplicidade, que $\Delta\varphi_R^S(t_0) = 0$, obtém-se a seguinte equação para a fase de batimento da portadora:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} R + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + \mathrm{N} \tag{4.10}$$

onde $\phi = -\Delta\varphi_R^S$ e $\lambda = c/f$. Referenciando as pseudo-distâncias de fase em unidades de distância, a equação (4.10) pode ser reescrita na forma:

$$\Phi = \lambda\phi = R + c\Delta\delta + \lambda\,\mathrm{N}. \tag{4.11}$$

4.2 Fatores que Afetam as Observáveis

Os sinais do GPS estão sujeitos à influência de vários fatores que afetam as medidas de pseudo-distância e fase da portadora. Estes fatores podem ser eliminados ou minimizados através da utilização de modelos e técnicas apropriadas. A Tabela 4.1 apresenta uma relação das fontes de erros e principais efeitos que envolvem as observáveis, os quais serão descritos a seguir. Informações adicionais podem ser obtidas em Hofmann-Wellenhof et al. (1994), Leick (1995), Monico (1996), Seeber (1993), Spilker e Parkinson (1996).

TABELA 4.1 - PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM AS OBSERVÁVEIS DO GPS

FONTES	EFEITOS
Satélite	Erro no relógio do satélite
	Erro orbital
	Atraso instrumental do satélite
Propagação do sinal	Refração ionosférica
	Refração troposférica
	Múltiplo caminho
	Perdas de ciclo
Receptor	Erro no relógio do receptor
	Centro de fase da antena
	Atraso instrumental do receptor

(a) Erros nos relógios dos satélites e receptores:

Em geral, os relógios dos satélites e receptores não estão perfeitamente sincronizados entre si e a hora GPS, afetando as medidas de distância entre satélite e receptor. Os dados utilizados para relacionar a hora GPS e a hora de um determinado satélite estão incluídos na mensagem de navegação (Leick, 1995) transmitida pelo satélite através das portadoras L1 e L2. Os erros nos relógios dos receptores podem ser eliminados através de técnicas apropriadas (Seeber, 1993).

(b) Erros orbitais:

Os erros orbitais ocorrem devido às discrepâncias entre as efemérides transmitidas pelos satélites e a sua posição orbital verdadeira, afetando diretamente a medida de posicionamento no receptor. As informações orbitais podem ser obtidas através das efemérides transmitidas ou das efemérides precisas. Esta última resulta de um pós-processamento dos dados coletados nas estações rastreadoras, atingindo uma precisão de 10 partes por bilhão (Monico,1996). A disponibilidade destas efemérides aos usuários, porém, ocorre somente no período de uma semana após a coleta dos dados. As efemérides transmitidas são utilizadas, principalmente, no posicionamento em tempo real. A exatidão destas medidas, porém, não é suficiente nas situações em que a precisão deve estar associada à grandes distâncias (Seeber, 1993).

(c) Atraso instrumental diferencial dos satélites e receptores:

O atraso instrumental é gerado pelos diferentes caminhos que as portadoras L1 e L2 percorrem dentro do "hardware" dos satélites e receptores GPS. Estes desvios instrumentais sistemáticos são a principal fonte de erro na determinação do conteúdo eletrônico total a partir de dados do GPS nas duas freqüências. Embora exista um erro instrumental para cada uma das freqüências do GPS, a estimativa do CET é afetada pela diferença entre estas freqüências, para cada satélite e receptor, a qual é referida como atraso instrumental diferencial. Os erros sistemáticos instrumentais podem atingir vários

nanosegundos (1 ns = $2,86 \times 10^{16}$ el/m^2) e, portanto, estes valores devem ser conhecidos se valores confiáveis de CET necessitam ser obtidos (Sardón, 1997).

(d) Refração ionosférica:

A presença de elétrons livres e íons na trajetória de propagação do sinal do GPS causa um atraso na modulação do código e um avanço na fase deste sinal, gerando erros nas medidas de distância entre satélite e receptor. A magnitude deste efeito é uma função do índice de refração ionosférico e da freqüência do sinal emitido. Existem, fundamentalmente, duas técnicas para a eliminação destes erros (Parkinson, 1996). A primeira consiste na utilização de modelos ionosféricos, cujos parâmetros de correção são fornecidos através da mensagem de navegação do GPS. A segunda técnica utiliza as duas freqüências transmitidas pelos satélites para medir o atraso na modulação do grupo da portadora e determinar o número de elétrons presentes em sua trajetória.

(e) Refração troposférica:

A troposfera comporta-se como um meio não dispersivo para freqüências abaixo de 30 GHz (Leick, 1995), ou seja, a refração troposférica não depende da freqüência dos sinais transmitidos pelos satélites GPS. O índice de refração, nesta camada neutra da atmosfera, é uma função da temperatura, pressão do ar e pressão do vapor d'água. A refração troposférica causa um atraso na propagação do sinal, seja na modulação ou na fase da portadora. Este atraso resulta de uma contribuição de, aproximadamente, 90% devido à componente relacionada ao ar seco e o restante devido à porção úmida (Coco et al., 1991; Leick, 1995). A obtenção de um modelo que represente a atmosfera seca é relativamente simples. Ao contrário, os efeitos da atmosfera úmida são mais difíceis de modelar devido à variação temporal e espacial do vapor d'água presente na atmosfera (Hofmann-Wellenhof et al., 1994).

(f) Múltiplo caminho:

O efeito do múltiplo caminho ocorre quando a antena do receptor recebe, além do sinal direto do satélite, sinais refletidos por superfícies localizadas nas proximidades do receptor. Este efeito sobre as medidas de código é duas ordens de magnitude maior do que sobre as medidas de fase (Bishop et al., 1985). Além disso, sinais com distintas freqüências também são diferentemente afetados pelo múltiplo caminho. Não existe um método geral para solucionar este problema, devido à arbitrariedade das diferentes situações geométricas. De acordo com Hofmann-Wellenhof et al. (1994), existem alguns métodos que possibilitam a eliminação ou redução deste efeito. Entretanto, recomenda-se evitar a presença de superfícies refletoras nas proximidades dos receptores.

(g) Perdas de ciclo:

Uma perda de ciclo ou "cycle slip" é uma descontinuidade (por um número inteiro de ciclos) na medida de fase da portadora, caracterizada pela ocorrência de um salto súbito nesta medida. Quando um receptor é ligado, a fase do batimento fracional é medida e um contador inteiro é inicializado. Assim, durante o rastreamento este contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase fracional variar de 2π até 0 e, em um determinado instante, a fase acumulada observada corresponderá à soma da fase fracional e o número inteiro registrado no contador. Quando uma perda de ciclo ocorre o contador é reinicializado, resultando em um salto na fase acumulada instantânea. A parte fracional não é afetada por esta descontinuidade na seqüência de observação, ou seja, quando o sinal é recuperado a fase fracional volta a ser medida corretamente. As perdas de ciclo ocorrem quando o receptor deixa de rastrear o sinal do satélite devido, entre outros fatores, à obstrução do sinal, inclinação da antena, ruído provocado pelo efeito do múltiplo caminho, cintilações ionosféricas e satélites em baixa elevação (Seeber, 1993).

(h) Variação do centro de fase da antena:

O centro de fase da antena do receptor é o ponto em relação ao qual as medidas dos sinais são referenciadas e, geralmente, não coincide com o centro geométrico desta antena. A variação do centro de fase da antena difere para as portadoras L1 e L2 e depende da elevação, azimute e intensidade do sinal do satélite (Hofmann-Wellenhof et al., 1994). O centro de fase pode ser determinado através de experimentos de laboratório, para antenas de um único modelo, e utilizado na correção das observáveis. Uma forma de minimizar este efeito é utilizar sempre o mesmo tipo de antena, mantendo-se a orientação desta ao longo do tempo. Todavia, devido às lentas variações temporais na geometria satélite-antena, a contribuição desta medida não afeta significativamente a taxa de variação do conteúdo eletrônico total (Wanninger, 1992).

4.3 Cálculo do CET a Partir das Observáveis do GPS

Considerando os efeitos e erros relacionados às observáveis, descritos na seção anterior, a equação (4.3) pode ser reescrita, para as portadoras L1 e L2, na seguinte forma:

$$\rho_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{\rho 1}^{Iono} + \Delta^{Trop} + d_{\rho 1}^{r} + d_{\rho 1}^{s} + m_{\rho 1} + \varepsilon_{\rho 1} \tag{4.12}$$

$$\rho_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{\rho 2}^{Iono} + \Delta^{Trop} + d_{\rho 2}^{r} + d_{\rho 2}^{s} + m_{\rho 2} + \varepsilon_{\rho 2} \tag{4.13}$$

onde Δ^{Iono} e Δ^{Trop} correspondem, respectivamente, aos efeitos da refração ionosférica e troposférica, d^r e d^s são os atrasos instrumentais do receptor e satélite, m contém o efeito do múltiplo caminho e ε refere-se ao ruído do receptor. Os termos relacionados à distância geométrica satélite-receptor, ao efeito da troposfera e aos erros nos relógios dos satélites e receptores afetam identicamente as observáveis, nas portadoras L1 e L2. O termo Δ_{ρ}^{Iono}, na observável de pseudo-distância, está relacionado ao atraso de grupo de acordo com a equação (3.60). Subtraindo-se a equação (4.12) de (4.13), resulta:

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{1}{S} CET_\rho + d_\rho^r + d_\rho^s + m_\rho + \varepsilon_\rho \qquad (4.14)$$

onde S é um fator de conversão, dado por:

$$S = \frac{1}{40{,}3} \frac{f_2^2 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = 9{,}52 \times 10^{16} \quad \left[el/m^3\right],$$

$m_\rho = m_{\rho 2} - m_{\rho 1}$, $\varepsilon_\rho = \varepsilon_{\rho 2} - \varepsilon_{\rho 1}$, $d_\rho^r = d_{\rho 2}^r - d_{\rho 1}^r$ e $d_\rho^s = d_{\rho 2}^s - d_{\rho 1}^s$. Estes dois últimos termos correspondem aos atrasos instrumentais diferenciais do receptor e satélite, respectivamente, para as medidas de código (Komjathy, 1997) e as freqüências das portadoras L1 e L2 são dadas por f_1 e f_2.

Desta forma, o conteúdo eletrônico total para as observáveis de código, em um determinado instante de tempo, é dado por:

$$CET_\rho = S \left[(\rho_2 - \rho_1) - d_\rho - m_\rho - \varepsilon_\rho \right] \qquad (4.15)$$

onde $d_\rho = d_\rho^r + d_\rho^s$.

No caso das medidas de fase, a equação (4.11) pode ser reescrita na forma:

$$\Phi_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{\phi 1}^{Iono} + \Delta^{Trop} + \lambda_1 \mathrm{N}_1 + d_{\phi 1}^r + d_{\phi 1}^s + m_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 1} \qquad (4.16)$$

$$\Phi_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{\phi 2}^{Iono} + \Delta^{Trop} + \lambda_2 \mathrm{N}_2 + d_{\phi 2}^r + d_{\phi 2}^s + m_{\phi 2} + \varepsilon_{\phi 2}. \qquad (4.17)$$

onde convém observar que $\Delta_\rho^{Iono} = -\Delta_\phi^{Iono}$, conforme as equações (3.59) e (3.60). Subtraindo a equação (4.17) de (4.16) e considerando que o termo Δ_ϕ^{Iono}, na medida de fase, é dado pela equação (3.59), obtém-se:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{1}{S} CET_\phi + \lambda_1 \mathrm{N}_1 - \lambda_2 \mathrm{N}_2 + d_\phi^r + d_\phi^s + m_\phi + \varepsilon_\phi . \qquad (4.18)$$

onde $m_\phi = m_{\phi 1} - m_{\phi 2}$, $\varepsilon_\phi = \varepsilon_{\phi 1} - \varepsilon_{\phi 2}$, $d_\phi^r = d_{\phi 1}^r - d_{\phi 2}^r$ e $d_\phi^s = d_{\phi 1}^s - d_{\phi 2}^s$. Similarmente à equação (4.14), d_ϕ^r e d_ϕ^s correspondem aos atrasos instrumentais diferenciais do receptor e satélite para as medidas de fase.

Assim, a expressão do conteúdo eletrônico total para as observáveis de fase é dada por:

$$CET_\phi = S \left[(\Phi_1 - \Phi_2) - (\lambda_1 \mathrm{N}_1 - \lambda_2 \mathrm{N}_2) - d_\phi - m_\phi - \varepsilon_\phi \right] \qquad (4.19)$$

onde $d_\phi = d_\phi^r + d_\phi^s$.

4.3.1 Detecção e Correção da Perda de Ciclo

As perdas de ciclo devem ser removidas das medidas de fase e, para tanto, a localização e o tamanho do salto ocorrido na seqüência de observação devem ser determinados. A detecção de uma perda de ciclo é baseada na comparação entre a diferença de fase das portadoras ($\Phi_2 - \Phi_1$) em um instante t e a diferença de fase no instante $t-1$. Quando o valor desta diferença for maior do que um valor limite, determinado empiricamente, considera-se que houve uma perda de ciclo. Algumas vezes, porém, ocorre um intervalo entre duas passagens de um mesmo satélite ou, ainda, ocorrem perdas de dados durante a passagem de um determinado satélite, produzindo uma lacuna temporal nos dados e gerando um salto falso ou "time skip". A detecção do "time skip" ocorre através da comparação entre a diferença de tempo de medidas de fase consecutivas e um valor limite, acima do qual o evento será considerado como um salto no tempo.

A correção da perda de ciclo pode ser efetuada através do ajuste de um polinômio do segundo grau para as três últimas diferenças de fase ($\Phi_2 - \Phi_1$) consecutivas. Posteriormente, extrapola-se um quarto valor para o instante seguinte, o qual é

comparado com o dado observado. Quando a perda de ciclo for detectada, de acordo com as condições anteriormente definidas, os valores subsequentes serão corrigidos pela diferença entre os dados extrapolado e observado. Outros métodos utilizados na determinação e correção das perdas de ciclo estão descritos em Hofmann-Wellenhof et al. (1994) e Seeber (1993).

4.3.2 Ambigüidade e Nivelamento

Um dos principais problemas associados às medidas de fase envolve a ambigüidade. A determinação deste parâmetro pode ocorrer através da combinação entre as observações de fase da portadora e pseudo-distância, fazendo uso do caráter não-ambíguo desta última. O conteúdo eletrônico total calculado a partir das medidas de código (CET_ρ), é afetado pelo atraso instrumental diferencial, múltiplo caminho e ruído. Por outro lado, o CET_ϕ obtido através das medidas de fase contém um termo adicional em relação às medidas de pseudo-distância: o termo da ambigüidade. Os efeitos do múltiplo caminho e ruído nas medidas de pseudo-distância são consideravelmente maiores do que nas medidas de fase, especialmente em baixos ângulos de elevação (Figura 4.2). Considerando que:

$$CET_\phi = CET_\phi' - S\left(\lambda_1 \mathrm{N}_1 - \lambda_2 \mathrm{N}_2\right) \tag{4.20}$$

onde CET_ϕ' é o conteúdo eletrônico calculado a partir das medidas de fase, fornecidas pelo receptor, as quais não contêm a ambigüidade.

As medidas de CET_ρ e CET_ϕ devem ter o mesmo valor, sejam obtidas a partir das pseudo-distâncias ou da fase da portadora. Considerando a existência de ruído nestas medidas, na média, isto significa que:

$$\left\langle CET_\rho - CET_\phi \right\rangle = 0 \tag{4.21}$$

onde o símbolo $\langle\ \rangle$ representa a média para um arco de fase conectado, ou seja, um período de dados que não contém perdas de ciclo (Blewitt, 1990).

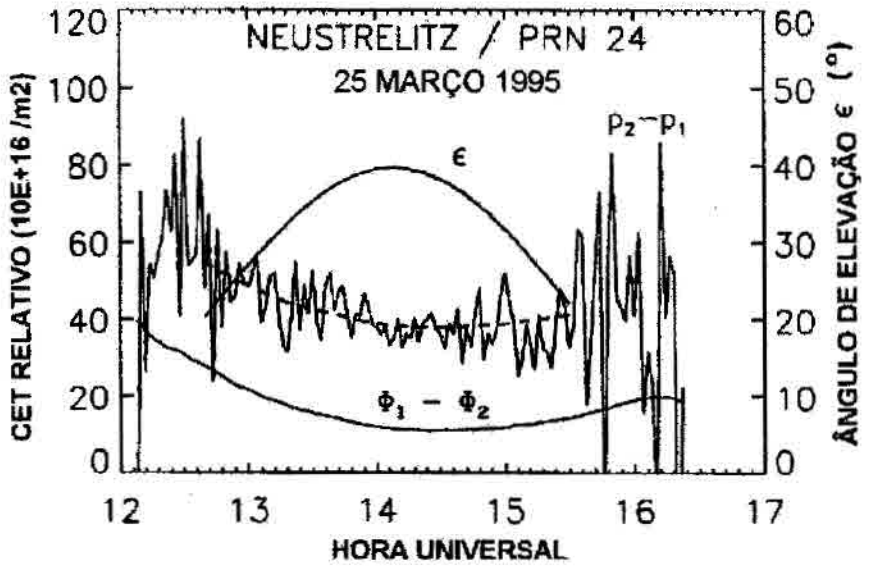


Figura 4.2 - Pseudo-distâncias diferenciais $(\rho_2 - \rho_1)$ e portadoras de fase diferenciais $(\Phi_1 - \Phi_2)$, durante a passagem do satélite PRN 24 sobre Neustrelitz, em 25 de março de 1995.
FONTE: Jakowski (1996, p.379)

Substituindo a equação (4.20) na equação (4.21), obtém-se:

$$\left\langle CET_{\phi} - CET_{\rho} \right\rangle - S\left(\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2\right) = 0 \qquad (4.22)$$

onde N_1 e N_2 são constantes em um arco conectado.

O conteúdo eletrônico total calculado a partir da fase, utilizando a ambigüidade combinada $\left(\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2\right)$, é denominado de CET nivelado ("leveled"), de acordo com Sardón e Zarraoa (1997) e Komjathy (1997), ou seja:

$$CET_L = CET_\phi^{'} - \left\langle CET_\phi^{'} - CET_\rho \right\rangle \tag{4.23}$$

Substituindo as equações (4.20) e (4.22) na equação (4.23), obtém-se:

$$CET_L = S\left[(\Phi_1 - \Phi_2) - d_\phi - m_\phi - \varepsilon_\phi\right] -$$

$$S\left\langle (\Phi_1 - \Phi_2) - d_\phi - m_\phi - \varepsilon_\phi - (\rho_2 - \rho_1) + d_\rho + m_\rho + \varepsilon_\rho \right\rangle.$$

Considerando que a média do ruído é nula, o atraso instrumental e o efeito do múltiplo caminho são aproximadamente constantes ao longo de um arco conectado, obtém-se:

$$CET_L = S\left[(\Phi_1 - \Phi_2) - \left\langle\ (\Phi_1 - \Phi_2) - (\rho_2 - \rho_1)\ \right\rangle - d_\rho - m_\rho - \varepsilon_\phi\right]. \tag{4.24}$$

O CET_L, representado pela linha tracejada na Figura 4.2, tem a precisão da medida de fase e um nível de ruído semelhante ao CET_ϕ. De acordo com Fraile-Ordónez (1995), a combinação das medidas de pseudo-distância e fase possibilitam um considerável redução do ruído, devido às pseudo-distâncias, e efeito do múltiplo caminho na determinação de CET.

4.3.3 Mapeamento do CET e Obtenção do Atraso Instrumental Diferencial

O CET é normalmente expresso através do Conteúdo Eletrônico Total Vertical (CETV), mais utilizado devido à facilidade na comparação de valores, do que aqueles observados em vários ângulos de elevação (Klobuchar, 1996). O CETV corresponde à projeção do CET na vertical do ponto sub-ionosférico situado no caminho de propagação do sinal, entre o satélite e o receptor, ou seja:

$$CETV = CET_L \cos\chi\,. \tag{4.25}$$

onde,

$$\cos\chi = \left[1 - \frac{r_e^2 \cos^2 \mathrm{E}}{(r_e + h_m)^2}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

De acordo com a Figura 4.3, χ corresponde ao ângulo zenital no ponto sub-ionosférico, r_e é o raio médio terrestre, E representa o ângulo de elevação do satélite e h_m é a altura média da ionosfera (350 a 400 km).

A medida do CET relativo é suficiente para estudar as perturbações da ionosfera, porém, os valores do atraso diferencial dos satélites e receptores devem ser conhecidos, quando uma estimativa do CET absoluto for necessária . Para obter os atrasos diferenciais instrumentais e efetuar um mapeamento do conteúdo eletrônico total, a medida do CET_L, para um instante t e dada por $T^{rs}(t)$, entre um determinado satélite s e um receptor r, pode ser modelada pela equação:

$$T^{rs}(t) = M(\mathrm{E})\ I(\theta,\gamma,t) + d^s + d^r \qquad (4.26)$$

onde $M(\mathrm{E})$ é uma função de mapeamento para a elevação E, $I(\theta,\gamma,t)$ é um modelo ionosférico do CET, θ, γ e t são, respectivamente, latitude, longitude e instante da medida.

Conhecidas as órbitas dos satélites e a posição do receptor, θ, γ e E são determinados e, utilizando-se as medidas do CET nivelado, os atrasos diferenciais dos satélites e receptores, e os parâmetros do modelo ionosférico $I(\theta,\gamma,t)$ podem ser determinados através do ajuste dos mínimos quadrados ou filtro de Kalman (Lanyi e Roth, 1988; Coco et al., 1991; Gail et al., 1993; Mannucci et al., 1993; Wilson e Mannucci, 1993; Sardón et al.,1994; Komjathy e Langley, 1998). Estes métodos são consideravelmente complicados para uma aplicação imediata, mas devem ser estudados futuramente. Todavia, valores pré-calculados dos atrasos instrumentais deferenciais dos satélite e receptores podem ser obtidos no CDDIS, via Internet (Feltens, 1998).

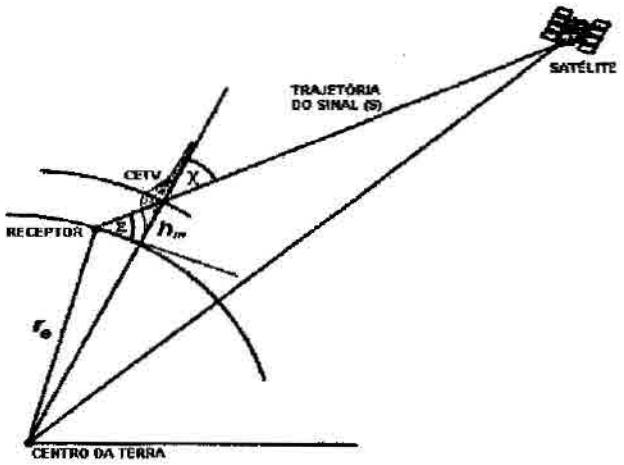


Fig. 4.3 - Geometria da trajetória do raio para sinais de satélites trans-ionosféricos.
FONTE: Jakowski (1996, p.373).

Métodos relativamente mais simples para obter os atrasos instrumentais diferenciais consideram valores de CET em torno de 3 a 5 UTEC, em horários noturnos próximos às 04:00h (hora local). O método da similitude (Kantor et al., 1998), ainda em estudo, considera que para uma determinada estação receptora e cada satélite a medida do CET vertical sobre um arco de dados é dada por:

$$I^{r,s}(LT) = \left[T^{r,s}(LT) - \left(d^s + d^r\right)\right] \cos\chi^{r,s}(LT) \qquad (4.27)$$

onde LT corresponde à hora local sub-ionosférica. Variando os atrasos instrumentais d^s e d^r, na expressão acima, a forma gráfica da medida $I(LT)$ varia desde uma forma aproximada de $\cup$ até a forma invertida $\cap$ (Figura 4.4). Através de uma comparação entre as curvas para vários satélites, espera-se que a variação tais curvas, para os diferentes satélites, sejam similares. Por este motivo, o programa que calcula este medida denomina-se "U-Shape". O resultado é um conjunto de valores válidos para o atraso diferencial satélite-receptor ($d^s + d^r$).

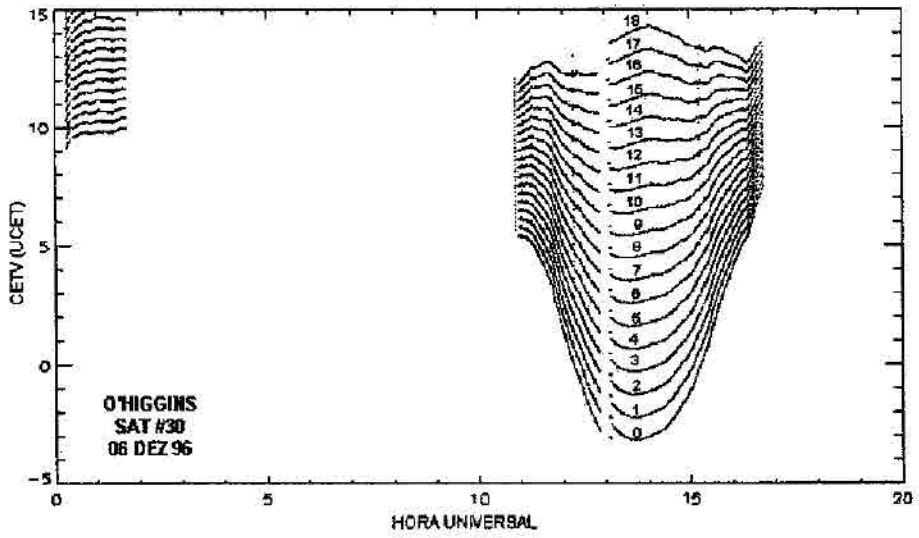


Fig. 4.4 - Efeito da variação do atraso instrumental diferencial ($d^s + d^r$), sobre o *CETV* correspondente à passagem de um determinado satélite.

Dois arcos de dados para diferentes satélites, em locais próximos, devem ter formas similares, supondo que a ionosfera não varie muito espacialmente. Esta similaridade é imposta através da soma de uma constante ajustável α_S em $I(LT)$, tal que:

$$\sum_{s,LT}\left[I^{r,s}(LT) - \alpha_S - \left\langle I^{r,s}(LT)\right\rangle_S\right]^2 \tag{4.28}$$

seja mínimo. O símbolo $\langle\ \rangle_S$ indica a média entre todos os satélites. Os atrasos instrumentais diferenciais dos receptores e satélites não podem ser separados, mas considerando que o atraso do receptor é mais significativo do que o atraso do satélite, a solução torna-se mais simples (Kantor et al., 1998).

CAPÍTULO 5

DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NO TRABALHO

5.1 A Rede Global IGS

O "International GPS Service" (IGS) consiste de um serviço científico internacional, cujo propósito é apoiar as atividades de pesquisas geofísicas e geodésicas através da coleta, armazenamento e distribuição dos dados fornecidos pelo sistema GPS. Estes dados são utilizados para gerar efemérides de alta precisão, parâmetros da rotação terrestre, coordenadas e velocidades relativas às estações de rastreamento, informações sobre os relógios dos satélites e estações de rastreamento e informações ionosféricas.

O IGS foi instituído em 1993, através da "International Association of Geodesy" (IAG), a partir de um esforço da comunidade científica no sentido de promover padrões internacionais para a análise e aquisição de dados do GPS, tornando-se formalmente operacional em janeiro de 1994 (NASA, 1999a). Este sistema é formado pelos centros de dados ("Data Centers"), centros de análise ("Analysis Centers") e uma rede global composta por, aproximadamente, 200 estações rastreadoras de satélites equipadas com receptores capazes de obter as observáveis de código e fase das portadoras dos sinais transmitidos pelos satélites GPS. Os centros de dados operacionais ("Operational Data Centers") coletam os dados brutos das estações rastreadoras ("Tracking Stations") e os formatam de acordo com um modelo padrão, conhecido como "Receiver INdependent EXchange" (RINEX). Posteriormente, os dados são enviados para os centros regionais ("Regional Data Centers") que os transmitem aos centros globais ("Global Data Centers"). Os produtos fornecidos pelo IGS são obtidos através do processamento e análise dos dados rastreados, os quais são distribuídos para os centros globais que os mantêm armazenados e os disponibiliza a usuários e pesquisadores por meio de acesso "on-line". O sistema de informações via Internet é mantido pelo "IGS Central Bureau", cuja responsabilidade e administração deve-se à NASA, através do "Jet Propulsion

Laboratory" (JPL). Maiores informações sobre a rede IGS podem ser obtidas em NASA (1999b).

5.2 Estrutura dos Dados

Os dados utilizados neste trabalho têm os formatos RINEX (versão 2) e SP3. O primeiro refere-se às observáveis de pseudo-distância e fase da portadora, enquanto que o segundo fornece os dados de posição e correção dos relógios dos satélites. Uma breve descrição destes formatos será apresentada a seguir, porém, informações adicionais podem ser obtidas em Gurtner (1997) e Spofford e Remondi (1997).

5.2.1 Formato RINEX

O formato "Receiver INdependent EXchange" (RINEX) foi desenvolvido pelo "Astronomical Institute of the University of Berne" com o propósito de facilitar o intercâmbio dos dados coletados na campanha EUREF 89, que envolveu mais de 60 receptores GPS provenientes de 4 diferentes fabricantes (Gurtner, 1997). Esta padronização tornou-se necessária, devido aos distintos formatos e programas para o processamento dos dados obtidos nos diversos tipos de receptores. A segunda versão do RINEX foi publicada em 1990 e, posteriormente, sofreu algumas pequenas revisões. Atualmente, o formato RINEX é o mais utilizado pela comunidade internacional de usuários e fabricantes de receptores.

O formato RINEX consiste de três arquivos ASCII: dados de observação, mensagem de navegação e dados meteorológicos. Cada arquivo de observação refere-se à um determinado dia e estação receptora, contendo uma seção inicial ou cabeçalho para informações gerais e uma seção de dados. O comprimento máximo de gravação é de 80 caracteres por linha. As três quantidades fundamentais obtidas na seção de dados são as pseudo-distâncias de código (metros) e fase (ciclos inteiros), além do instante de observação (hora GPS) registrada de acordo com o relógio do receptor. A informação

sobre a ordem em que os dados L1, L2, P1, P2 e C1 são apresentados é obtida na seção inicial, na linha referente ao número e tipos de observação ("# / TYPES OF OBSERV"). Uma descrição completa dos arquivos de dados no formato RINEX pode ser obtida no Apêndice A.

TABELA 5.1 – MENSAGEM DE OBSERVAÇÃO NO FORMATO RINEX

```
2                OBSERVATION DATA    G (GPS)             RINEX VERSION / TYPE
RGRINEXO V2.4.2 LH  IfAG-Wettzell       11-MAR-96 09:05     PGM / RUN BY / DATE
IfAG-Wettzell                                               COMMENT
BIT 2 OF LLI (+4) FLAGS DATA COLLECTED UNDER "AS" CONDITION COMMENT
      0.000000000000          HARDWARE CALIBRATION (S)      COMMENT
     -0.000000004329          CLOCK OFFSET (S)              COMMENT
OHIG                                                        MARKER NAME
ARW                                                         OBSERVER / AGENCY
319                 TurboRogue SNR-8000 3.2                 REC # / TYPE / VERS
414                 DORNE MARGOLIN T                        ANT # / TYPE
  1525874.9925 -2432483.3348 -5676151.9662                  APPROX POSITION XYZ
        0.0010        0.0000        0.0000                  ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     5    C1    L1    L2    P2    P1                        # / TYPES OF OBSERV
    30                                                      INTERVAL
  1996     3     7     0     6    0.000000                  TIME OF FIRST OBS
                                                           END OF HEADER
 96  3  7  0  6  0.0000000  0  6 27 16 17 28 18 22
  21255525.459          -0.53219          -0.01156  21255526.1004
  21606880.941          -1.04819          -0.50655  21606881.7354
  24963237.216          -0.67216          -0.41754  24963240.1474
                        -0.53816          -0.01817  23868688.375     23868688.584
  21902124.704          -0.57919          -0.36155  21902125.1884
  24390657.759          -0.67616           0.43754  24390659.4404
 96  3  7  0  6 30.0000000  0  7 27 31 16 17 28 18 22
  21234706.079     -109406.529 9    -85251.40945  21234706.5474
  25172918.270          -0.35616
  21591402.449      -81338.881 9    -63380.64245  21591403.3324
  24941720.616     -113072.535 6    -88108.38843  24941723.0254
                   -103190.384 6    -80407.696 7  23849052.136     23849052.787
  21908739.751       34760.073 9     27085.85345  21908740.0554
  24400301.778       50681.700 6     39493.20644  24400302.9894
```

Após a implementação do "Anti-Spoofing", em janeiro de 1994 (Monico, 1996), a maior parte dos arquivos de observação não contêm os dados referentes à observável P1. Desta forma, quando o AS está ativado a pseudo-distância é calculada a partir do código C/A, aparecendo na posição da coluna C1; caso contrário, a pseudo-distância é calculada a partir do código P e aparece na coluna P1 (Musman, 1997). Ambos os casos podem ser observados na Tabela 5.1, quando um dos satélites tem o AS desativado. Nos casos em que a observável P1 não está presente no arquivo de observação, utiliza-se os dados da coluna C1 em substituição à pseudo-distância P1 (Iijima, 1997).

5.2.2 Formato SP3

Em 1985, o "National Geodetic Survey" (NGS) introduziu um formato padrão para as órbitas dos satélites GPS, denominado por "Standard Product # 1" (SP1). Este formato, apesar de conter informações sobre sistemas de coordenadas e tipos de órbitas, não fornecia informações para a correção dos relógios dos satélites (Spofford e Remondi, 1997). Em 1991, com o surgimento do formato "Standard Product # 3" (SP3), estas informações tornaram-se disponíveis. Um resumo das principais informações e parâmetros contidos no formato SP3 é apresentado no Apêndice A.

Inicialmente, as efemérides precisas eram determinadas pela "U. S. Defense Mapping Agency" (DMA), a partir de dados obtidos em 10 estações distribuídas globalmente, e disponibilizadas apenas à usuários autorizados. Atualmente, as efemérides precisas podem ser obtidas através de instituições civis, como a "Cooperative International GPS NETwork" (CIGNET), sob a coordenação do NGS, incorporada ao IGS (Monico, 1998). Os dados coletados nestas estações consistem de pseudo-distâncias suavizadas a cada 15 minutos, derivadas a partir dos dados brutos de pseudo-distância e fase da portadora (Seeber, 1993). Os arquivos no formato SP3, onde o tempo é referenciado em hora GPS, contêm dados de velocidade (dm/seg) e posição (km) do centro de massa do satélite para intervalos de 15 minutos, de acordo com o sistema de referência ITRF (Monico, 1998). Os dados de posição são normalmente utilizados para a determinação da elevação e azimute do satélite rastreado, além das coordenadas de latitude e longitude do ponto sub-ionosférico (interseção entre o caminho percorrido pelo sinal e a camada ionosférica média).

5.3 Aquisição dos Dados

Uma intensa pesquisa na Internet e vários contatos com pesquisadores de outras instituições, assim como do próprio INPE, constituíram fatores fundamentais para o processo de aquisição dos dados a serem utilizados neste trabalho. Todavia, informações

mais precisas foram obtidas somente após uma consulta aos centros de dados pertencentes à rede IGS. A seleção das estações envolvidas na pesquisa e a definição do período de dados a ser estudado ocorreu em função da disponibilidade dos dados de cada estação (Tabela 5.2), informação esta obtida através do "Crustal Dynamics Data Information System" (CDDIS), um dos centros globais consultados.

5.3.1 Seleção do Período de Dados a ser Analisado

O fluxo solar em 10,7 cm (Figura 5.1), em unidades de 10^{-22} W/m^2Hz, pode ser utilizado como um indicativo do nível de atividade solar (McNamara, 1991). Após uma análise deste parâmetro, a partir de meados de 1995, quando o período de dados era comum para todas as estações receptoras, concluiu-se que seria possível estudar o conteúdo eletrônico total para uma época de baixa atividade solar, ou seja, o ano de 1996. Dentro deste período, foram selecionados alguns dias magneticamente calmos e perturbados (Tabela 5.3), para os solstícios de verão e inverno (dezembro e junho, respectivamente, no hemisfério sul) e para um equionócio (março), em função do índice planetário K_p (Figura 5.2). Este índice corresponde à média do índice K (medida das variações do campo magnético terrestre, em intervalos de 3 horas) para 12 estações globais (Tascione, 1988), sendo utilizado para indicar o nível de atividade magnética devido ao vento solar. De acordo com Wrenn et al. (1987), os níveis de atividade magnética são definidos estatisticamente da seguinte forma: muito quieto (A_p=0 a 4 ou K_p=0 a 1), quieto (A_p=4 a 6 ou K_p=1 a 2^-), normal (A_p=6 a 18 ou K_p=2^- a 3^+), perturbado (A_p=18 a 30 ou K_p=3^+ a 4^-) e muito perturbado (A_p=30 a 400 ou K_p=4^+ a 9). Além do índice K_p, o índice "Disturbance Storm-Time" (DST), foi analisado para os períodos de dados selecionados. O índice DST, calculado a intervalos horários, representa a variação da componente horizontal do campo magnético devido à corrente de anel e, portanto, amplamente utilizado em baixas latitudes. As variações dos índices DST e K_p para a semana que contém os dias perturbados selecionados para o estudo, são apresentados na Figura 5.3.

TABELA 5.2 – ESTAÇÕES RECEPTORAS IGS ANALISADAS (1996)

ESTAÇÕES RECEPTORAS	CIDADE	LOCALIZAÇÃO	LATITUDE GEOG. (N)	LONGITUDE GEOG. (E)	ALTITUDE (m)	INCLINAÇÃO MAGNÉTICA	LATITUDE MAGN. (N)	LONGITUDE MAGN. (E)	INÍCIO DADOS DISPONÍVEIS
AREQ	AREQUIPA	PERU	-16,4655	-71,4928	2489,95	-6,74	-3,38	-0,22	31 JAN. 94
BOGT	BOGOTÁ	COLÔMBIA	4,6401	-74,0809	2578,04	30,83	16,61	-1,77	07 NOV. 94
FORT	FORTALEZA	BRASIL	-3,8774	-38,4256	20,49	-10,24	-5,16	34,88	18 JUL. 93
KOUR	KOUROU	GUIANA FRANCESA	5,2522	-52,8060	-24,76	21,45	11,12	23,12	09 AGO. 92
LPGS	LA PLATA	ARGENTINA	-34,9067	-57,9323	30,86	-36,31	-20,18	9,81	02 JUL. 95
OHIG	O'HIGGINS	ANTÁRTICA	-63,3207	-57,9003	31,70	-56,03	-36,58	12,31	31 MAR. 95
SANT	SANTIAGO	CHILE	-33,1503	-70,6686	724,05	-32,32	-17,55	0,75	24 FEV. 92

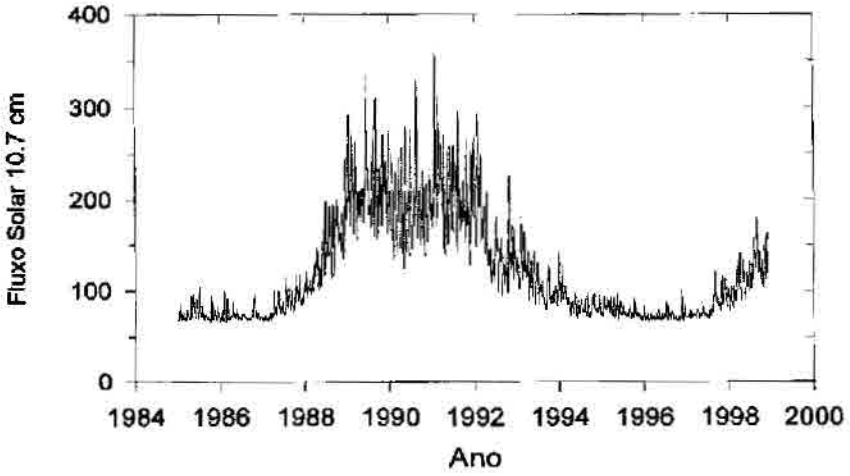


Fig. 5.1 - Variação do fluxo solar em 10,7 cm, entre os períodos de janeiro/1985 e novembro/1998.

TABELA 5.3 – NÍVEL DE ATIVIDADE MAGNÉTICA PARA OS DIAS ANALISADOS, NO ANO DE 1996.

Mês	Condição Magnética	
	Dias Calmos	Dias Perturbados
Março	02 e 07	21
Junho	12, 13 e 14	–
Dezembro	06, 26 e 28	9 e 10

5.3.2 Transferência dos Dados

As efemérides precisas (produzidas pelo NGS), no formato SP3, e os dados observação, no formato RINEX, foram fornecidos pelo CDDIS e transferidos em modo binário, via "file transfer protocol" (ftp). Os arquivos de observação vêm na forma compactada, o que impossibilita a sua utilização neste formato, devendo ser submetidos a um processo de descompactação. Em média, cada arquivo de observação contém 1,8 Mb de dados descompactados, enquanto que o tamanho de um arquivo de efemérides varia entre 150 e 200 Kb.

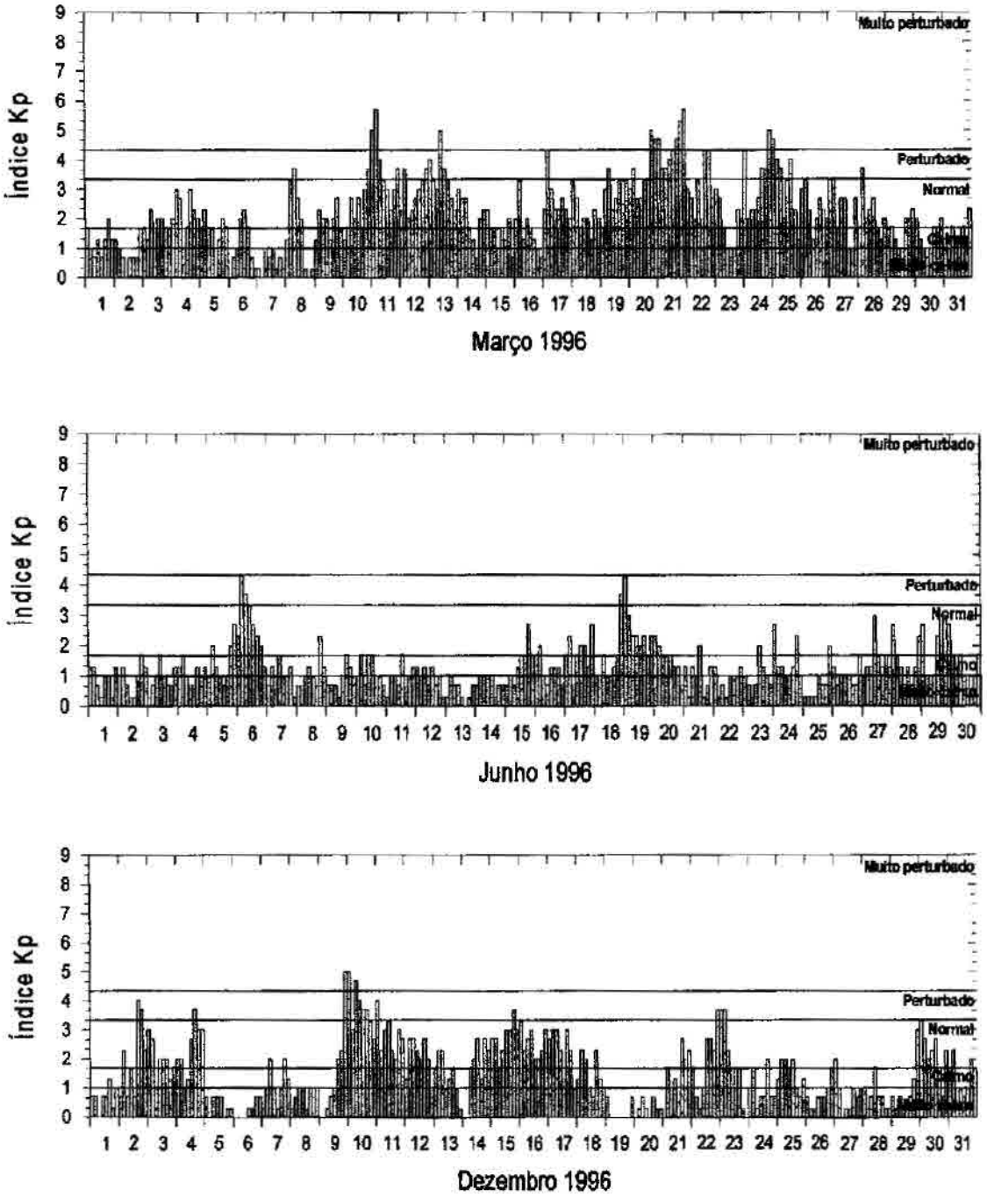


Fig 5.2 - Variação do índice K_p para os meses de março, junho e dezembro de 1996.

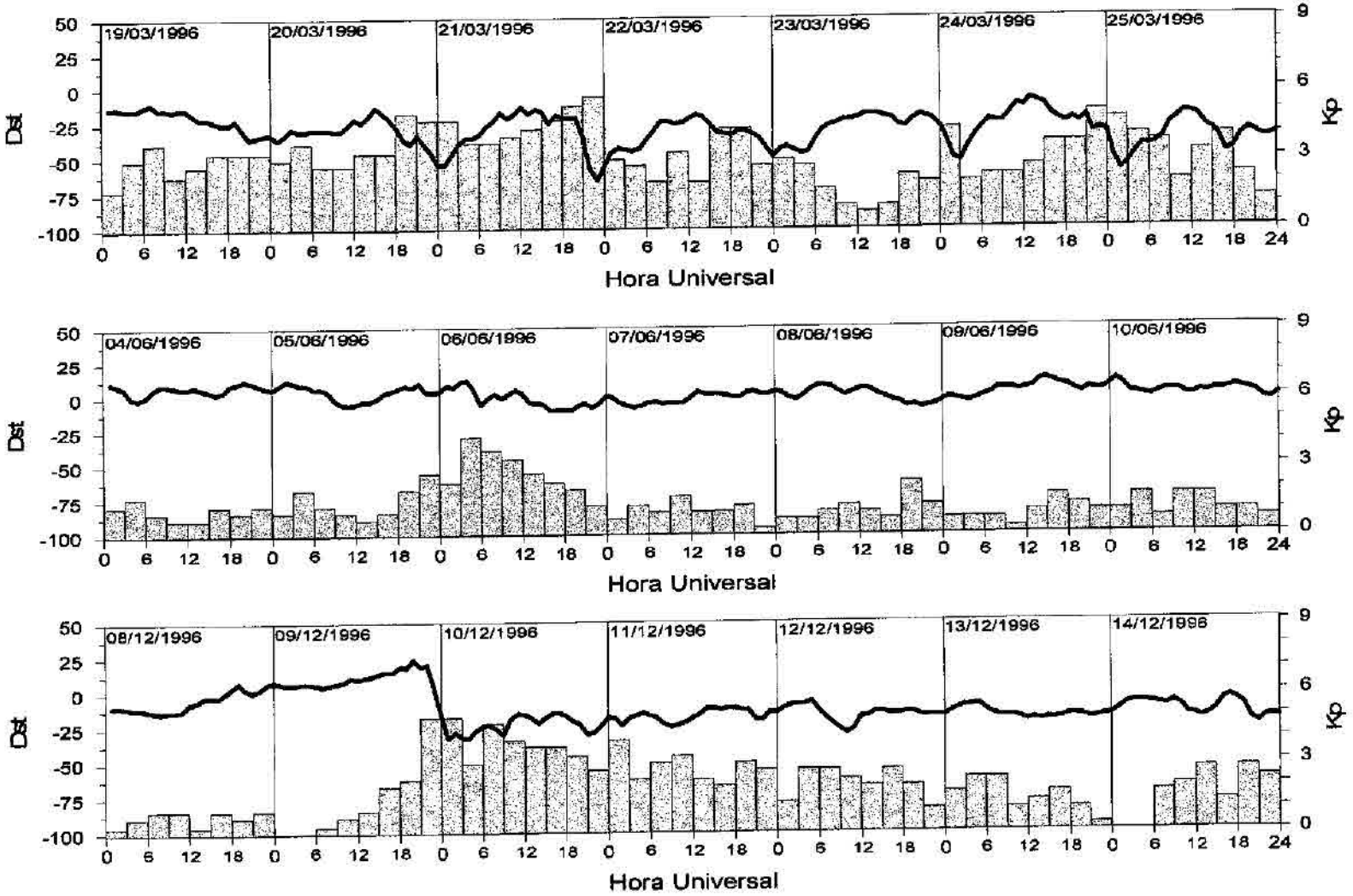


Fig. 5.3 - Variação dos índices K_p e D_{st} entre os dias 19 e 25 de março, 04 e 10 de junho, 08 e 14 de dezembro de 1996.

A nomenclatura dos arquivos de observação segue o seguinte modelo: ssssdddf.YYt, onde ssss designa o nome da estação receptora, ddd e f correspondem, respectivamente, ao dia do ano do primeiro registro de dados e número de seqüência do arquivo no decorrer do dia (0: contém todos os dados do dia), o ano do registro dos dados é representado por YY e o tipo de arquivo é indicado por t (O: observação, N: navegação e M: meteorológico). Os dados compactados vêm acompanhados, ainda, com a extensão .Z ou _Z. No caso das efemérides precisas, o nome dos arquivos é dado por SSSWWWWD.TTT, onde SSS designa o nome da agência, WWWW representa a semana GPS (SEMANA GPS = INT [(DIA JULIANO – 2444244,5)/7]), D corresponde ao número do dia da semana GPS (0 a 6: domingo à sábado, ou 7 para a semana inteira) e TTT indica o tipo de arquivo (SP3 ou EPH, para órbitas).

5.3.3 Estações Receptoras

As estações receptoras envolvidas neste trabalho pertencem à rede IGS e estão situadas na América do Sul (Arequipa, Bogotá, Brasília, Fortaleza, Kourou, La Plata e Santiago) e Antártica (O'Higgins), de acordo com a Figura 5.4. Os dados referentes à estação de Brasília eram insuficientes para o estudo proposto por esta dissertação e, portanto, não foram utilizados. Durante o ano de 1996, período em que os dados foram analisados, estas estações estavam equipadas com receptores TurboRogue-SNR 8000 (Figura 5.5) e antenas Dorne Margolin T (Figura 5.6), com exceção de Santiago (receptores Rogue SNR-8 e SNR-12 e antenas Dorne Margolin R e T). Os receptores Rogue têm um nível de ruído extremamente baixo para as medidas de código, possuindo 8 canais paralelos para as portadoras L1 e L2, os quais fornecem dados de código e fase em ambas as freqüências (Seeber, 1993). As antenas Dorne Margolin são do tipo "choke ring", consistindo de tiras condutoras concêntricas em relação ao eixo vertical da antena, de forma a reduzir os efeitos do múltiplo caminho. A antena é normalmente protegida contra fatores meteorológicos e vandalismo através de uma cúpula de proteção da antena, cujo efeito sobre o centro de fase da antena deve ser previamente determinado

(NASA, 1999c). Além disso, a obstrução nas proximidades da antena deve ser mínima acima de 15 graus de elevação, de acordo com os exigências do IGS. O receptor e a antena instalados na estação de Fortaleza (Brasil), são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8.



Fig 5.4 - Estações receptoras IGS na América do Sul e Península Antártica.
FONTE: CDDIS (1995).

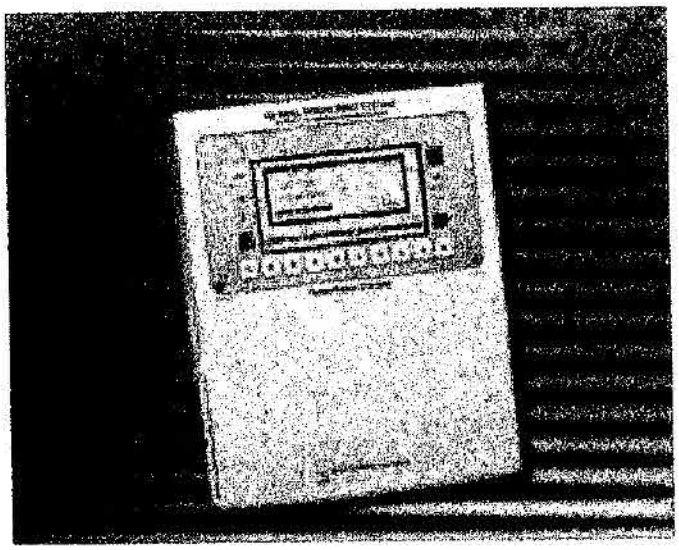


Fig. 5.5 - Receptor TurboRogue SNR-8000.

FONTE: AOA (1998)

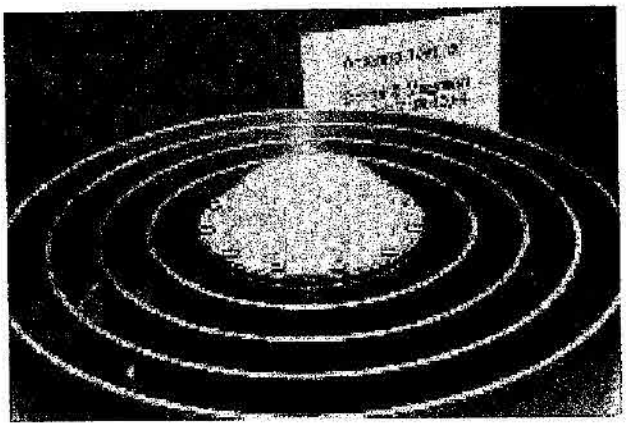


Fig. 5.6 - Antena Dorne Margolin

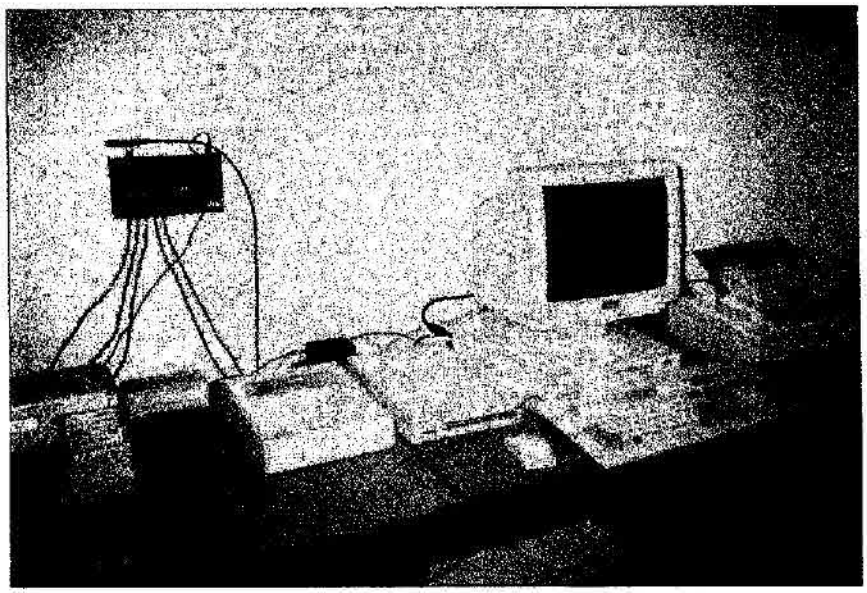


Fig. 5.7 - Equipamento receptor instalado na estação de Fortaleza.

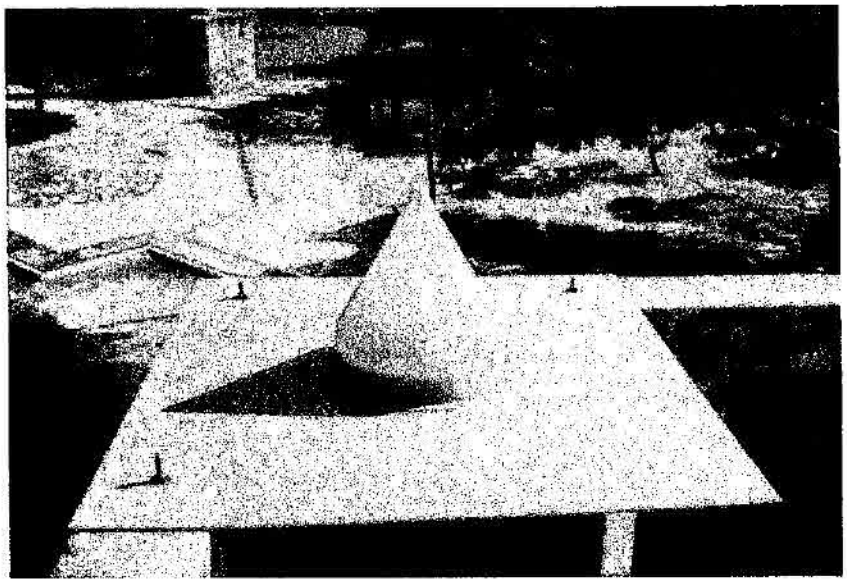


Fig. 5.8 - Antena instalada na estação de Fortaleza.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Programas Computacionais

Neste trabalho, a determinação do conteúdo eletrônico total a partir de dados do GPS teve início com a aquisição de um programa computacional, em linguagem FORTRAN, utilizado na obtenção da medida do atraso de grupo da portadora do sinal do GPS, para uma determinada passagem de satélite. Este programa sofreu inúmeras modificações e acréscimos até alcançar o formato em que se encontra atualmente, de forma a atender aos objetivos propostos por esta dissertação.

O programa desenvolvido para o cálculo do CET vertical, utiliza dados de todos os satélites rastreados durante uma sessão, normalmente com duração de 24 horas, gerando vários arquivos que contêm os valores do CET, CET vertical, latitude e longitude do ponto sub-ionosférico, elevação do satélite, entre outros parâmetros, em função do hora universal e local para uma determinada estação receptora GPS.

Devido à dependência geomagnética na distribuição espacial da densidade eletrônica, o CET vertical foi calculado em função da latitude geomagnética do ponto sub-ionosférico da estação considerada. Os valores de latitude geomagnética foram calculados a partir de uma equação ($Lat.magn. = a\tan\left(\tan I/2\right)$), que utiliza a declinação magnética I do local considerado, cujo valor é fornecido pelo programa fonte (em FORTRAN) que gera valores do "International Geomagnetic Refrerence Field" (IGRF), revisado em 1995. A longitude geomagnética foi obtida através de um programa computacional desenvolvido pela NASA, que determina o valor das coordenadas geomagnéticas a partir das coordenadas geográficas e vice-versa. Os valores de latitude geomagnética fornecidos por este programa não foram utilizados, pois apresentam discrepâncias em relação aos valores reais nas regiões próximas ao equador magnético.

Posteriormente, foram desenvolvidos alguns programas em linguagem IDL, com os seguintes objetivos: analisar os dados de cada satélite separadamente, a partir dos arquivos gerados pelo programa que fornece o CET vertical; calcular a média dos valores de CET para uma sessão de dados em função da hora local e latitude geomagnética; determinar o conteúdo eletrônico plasmasférico através da integração dos valores de densidade eletrônica, fornecidos por um modelo empírico (Gallagher, 1988). Os resultados obtidos a partir de tais programas serão apresentados a seguir.

6.2 Variação Diurna

A variação diurna do CET vertical para a estação de Fortaleza, em função da hora universal, é apresentada na Figura 6.1, para um dia magneticamente calmo. As curvas sobrepostas observadas referem-se à passagem dos distintos satélites e cada valor do CET vertical é obtido através da projeção vertical, em 400 km de altura, do conteúdo eletrônico total contido na trajetória do sinal satélite-receptor. Entretanto, a variação do CET vertical em relação à hora universal não é muito apropriada para uma análise da variação temporal deste parâmetro. Considerando que, para um sistema de coordenadas fixo em relação ao sol, o comportamento da ionosfera tem pouca variação, a longitude geomagnética e a hora universal foram combinadas para fornecer a variação do CET vertical em função da hora local de cada estação. Esta relação foi obtida através através da equação $LT = UT + (LONG/15)$, onde LT, UT e $LONG$ correspondem, respectivamente, às horas local e universal e longitude geográfica.

Os dados de CET vertical, compreendidos entre ± 20° (ao norte e ao sul) relativos à latitude geomagnética de cada estação receptora, no ponto sub-ionosférico, foram agrupados em intervalos de 30 minutos e 5° de latitude geomagnética. Em seguida, foram obtidos valores médios para estes intervalos de hora e latitude. O resultado deste procedimento é apresentado na Figura 6.2, onde o conteúdo eletrônico varia em função da hora local para uma faixa de 5 graus em torno da latitude geomagnética da estação de Fortaleza (5,16° S). A barra de erro representa o desvio padrão dos dados usados na média. Uma análise das Figuras 6.1 e 6.2 mostra que o CET vertical médio apresenta o

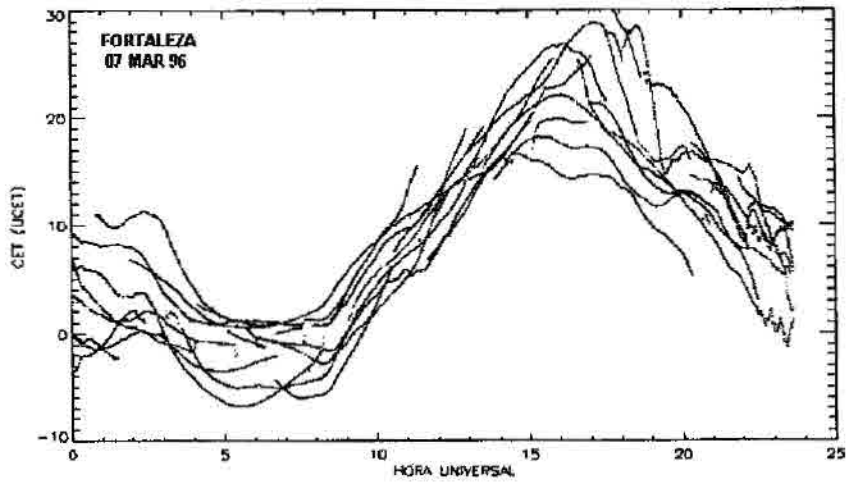


Fig. 6.1 - CET vertical, obtido para a estação de Fortaleza, em função da hora universal.

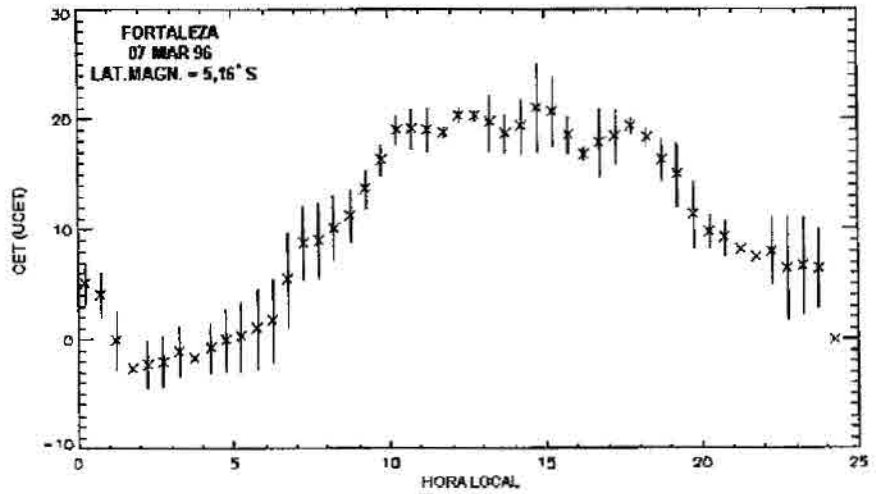


Fig. 6.2 - Variação diurna do CET vertical para Fortaleza, em função da hora local, apresentando o desvio padrão dos dados utilizados na obtenção do CET médio.

mesmo comportamento dos dados originais, com um valor mínimo ocorrendo poucas horas antes do amanhecer e valores máximos entre 12 e 18 horas (hora local). Os valores negativos do CET vertical, provavelmente, devem-se ao atraso instrumental diferencial do receptor, cujos valores confiáveis podem ser determinados somente através de métodos complicados ou programas computacionais não disponíveis no momento.

6.3 Variação Latitudinal

A observação do comportamento latitudinal do CET vertical obtido a partir de dados do GPS pode ser relativamente difícil, dependendo do número de estações receptoras envolvidas e da distância entre tais estações, além do movimento orbital do satélite em relação ao receptor. O satélite pode estar visível à um receptor instalado sobre superfície terrestre a partir da elevação zero, caso não existam obstáculos nas proximidades do receptor. No entanto, para reduzir o efeito do múltiplo caminho, os dados utilizados devem possuir uma elevação superior a 15° (Komjathy, 1997) ou 20° (Jakowski, 1996; Sardón e Zarraoa, 1997). Isto significa que o conjunto de dados situados nas latitudes mais afastadas em relação à estação devem ser eliminados, diminuindo o intervalo de latitude que contém dados confiáveis. Além disso, o satélite pode estar visível ao receptor por um período de tempo muito curto ou podem ocorrer perdas de ciclo, ocasionando falhas nos dados e impossibilitando a análise gráfica dos valores de CET vertical.

A Figura 6.3 apresenta um diagrama contendo a informação sobre a existência ou não de dados para um período de tempo de 24 horas e um intervalo de 20° de latitude para Norte e Sul, em relação à latitude geomagnética da estação de Fortaleza. A partir destes dados são construídos os gráficos de superfície (Figura 6.4), suavizadas através da triangulação de Delaunay, disponível no IDL. Apesar do limite latitudinal Norte e Sul ter sido reduzido, ainda é possível observar a variação do CET vertical com a latitude.

6.4 Anomalia Equatorial

O comportamento do conteúdo eletrônico total na região do equador é influenciado pela existência da anomalia equatorial (ou anomalia de Appleton), caracterizada por apresentar valores máximos de CET vertical nas latitudes geomagnéticas de, aproximadamente, 15° N e S.

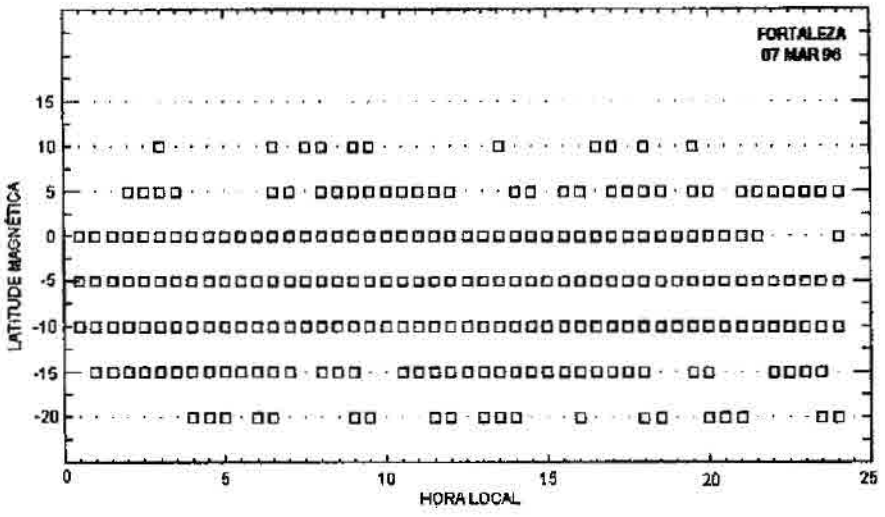


Fig. 6.3 - Diagrama informando sobre a existência de dados .

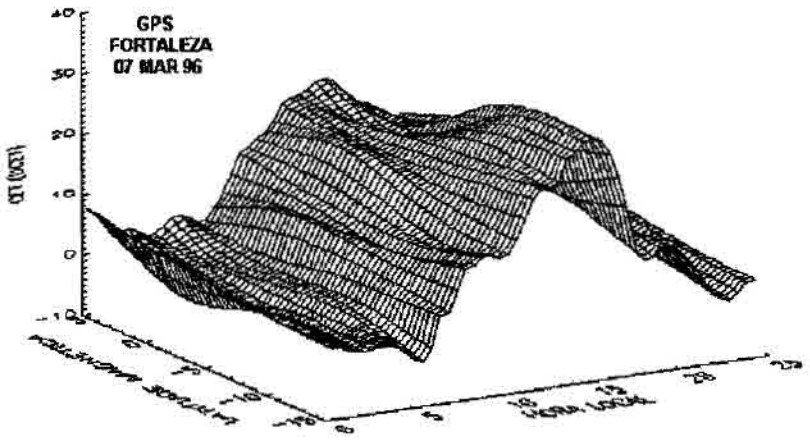


Fig. 6.4 - CET vertical suavizado através do IDL, para a estação de Fortaleza.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos para as estações de Kourou (Lat. Geomag. = 11,12° N) e Santiago (Lat. Geomag. = 17,55° S), para o solstício de verão do hemisfério Sul, em dias magneticamente calmos. O pico Norte da anomalia pode ser observado entre as latitudes geomagnéticas de 5° e 10° N, enquanto que o pico Sul está situado em, aproximadamente 15° S geomagnéticos. Ainda é possível observar que o fenômeno é mais acentuado no período diurno, o que é um resultado coerente.

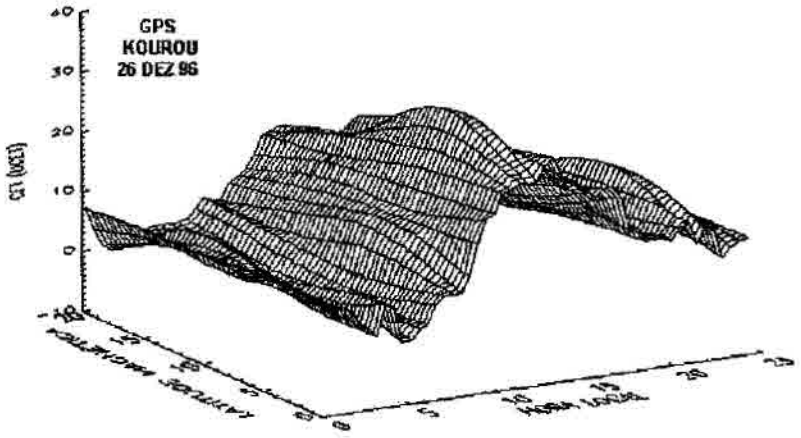


Fig. 6.5 - CET vertical obtido a partir do GPS, para a estação de Kourou.

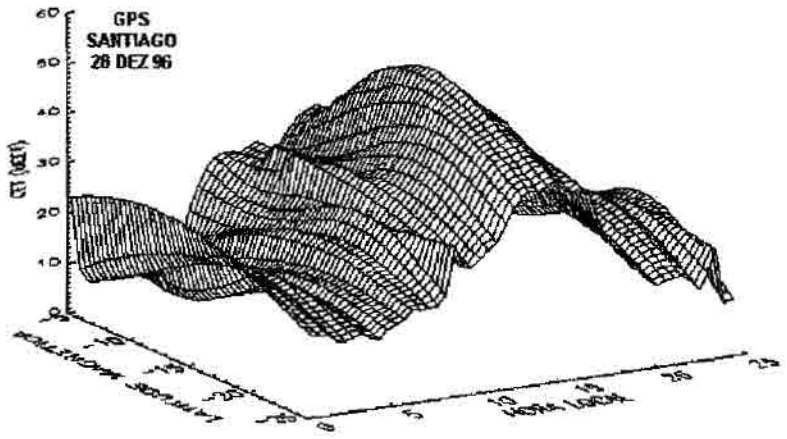


Fig. 6.6 - CET vertical obtido para a estação de Santiago, utilizando-se dados do GPS.

6.5 Variação Sazonal

A variação sazonal para a estação de Fortaleza é apresentada na Figura 6.7, onde $\overline{R}$ representa a média do número de manchas solares para cada mês analisado. Uma média da variação do CET vertical, em função da hora local, foi obtida para 2 dias calmos do equinócio de março, 3 dias calmos para o solstício de verão e 3 dias calmos para o inverno, de acordo com a Tabela 5.3. Não houve a possibilidade de incluir um maior número de dias calmos na determinação dos valores médios de CET vertical para cada estação, devido às condições magnéticas predominantes no período de equinócio (Figura 5.2), que limitaram o número de dias a ser analisado.

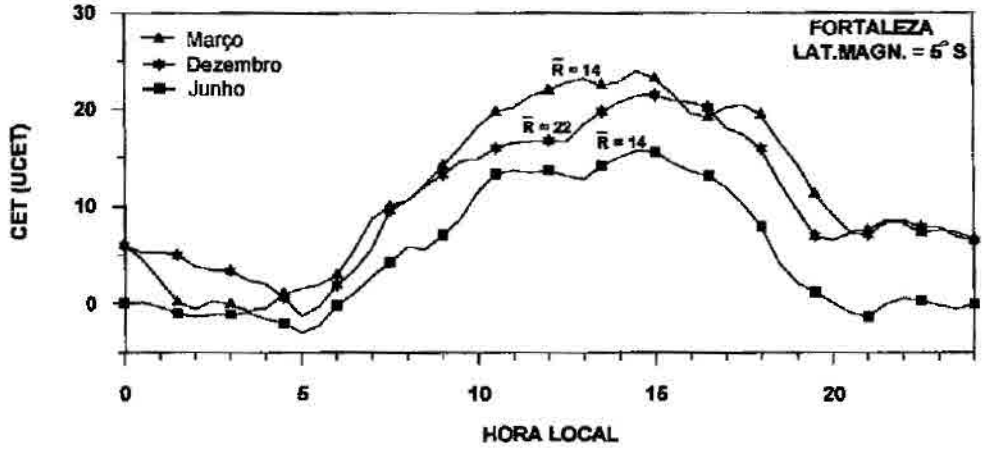


Fig. 6.7 - Variação sazonal do CET vertical, para Fortaleza, no ano de 1996.

Em geral, os resultados obtidos concordam com os resultados apresentados por Souza (1992) e Titheridge (1973), os quais podem ser observados nas Figuras 6.8 e 6.9. Estes autores, embora tenham utilizado o método de rotação Faraday na determinação do conteúdo eletrônico, obtiveram resultados para períodos de baixa atividade solar e, portanto, comparáveis aos resultados deste trabalho.

As diferenças no valor absoluto do CET vertical entre os resultados, podem ser explicadas em função das diferentes latitudes do hemisfério Sul escolhidas para a

obtenção do conteúdo eletrônico e devido ao fato do método de rotação Faraday não incluir o conteúdo eletrônico plasmasférico. Além disso, deve-se considerar que o atraso instrumental diferencial do receptor, na estação de Fortaleza não foi completamente eliminado, o que poderia explicar os valores negativos de CET vertical para esta estação.

6.6 Comparação com Medidas de Rotação Faraday

O método mais utilizado para a obtenção de medidas do conteúdo eletrônico total, antes do surgimento do GPS, foi o método de rotação Faraday. Este método foi utilizado por Souza (1992) para determinar o CET vertical durante períodos de baixa, média e alta atividade solar, em Cachoeira Paulista (SP), situada na latitude geomagnética de 16° S. Os valores calculados para o período de baixa atividade solar (1986) podem ser comparados com os valores de CET vertical obtidos, neste trabalho, a partir de dados do GPS, considerando-se as diferenças latitudinais entre as estações.

Os resultados obtidos por Souza (1992), para o equinócio de março e solstícios de inverno e verão, em um período de baixa atividade solar, são apresentados na Figura 6.8, onde é possível observar adicionalmente a variação do CET vertical calculado pelo modelo IRI-90. Uma análise entre os valores sazonais do conteúdo eletrônico obtido a partir do GPS (Figura 6.7), para a estação de Fortaleza, e os valores obtidos por Souza (1992), demonstra que o comportamento diurno do CET vertical é semelhante: os valores mínimos ocorrem em torno das 06:00 horas e os máximos, calculados pelo método Faraday estão ligeiramente deslocados (em média, 2 horas) para a direita em relação aos valores determinados a partir do GPS. Todavia, o valor absoluto deste parâmetro ionosférico é maior para Cachoeira Paulista, provavelmente, devido à sua proximidade geomagnética com a anomalia equatorial. Além disso, existe a influência do atraso instrumental diferencial nas medidas obtidas a partir das observáveis do GPS. Deve-se observar que o modelo IRI-90 também superestimou os valores observados para o CET vertical, obtidos através da rotação Faraday, de acordo com Souza (1992).

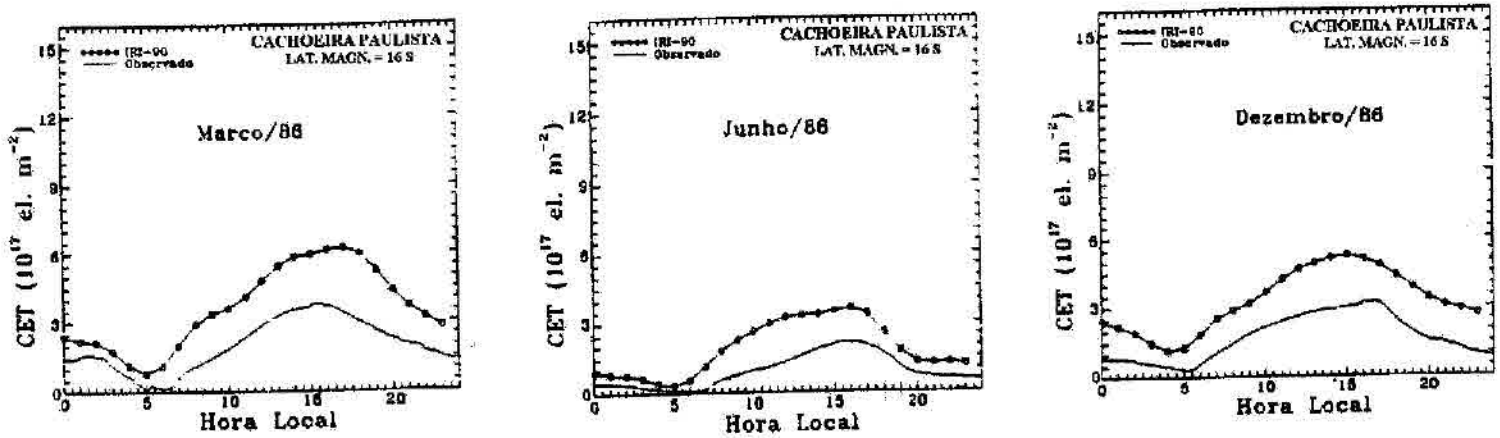


Fig. 6.8 - Médias mensais das variações diurnas do CET observado em Cachoeira Paulista e o valor calculado pelo IRI-90, para o ano de 1986.

FONTE: Souza (1992, p. 49).

O comportamento do conteúdo eletrônico total apresentado por Titheridge (1973), para um período de baixa atividade solar (Figura 6.9), onde $\overline{R}$ representa a média do número de manchas solares para 4 meses, está de acordo com os resultados obtidos a partir do GPS, apresentados na Figura 6.7.

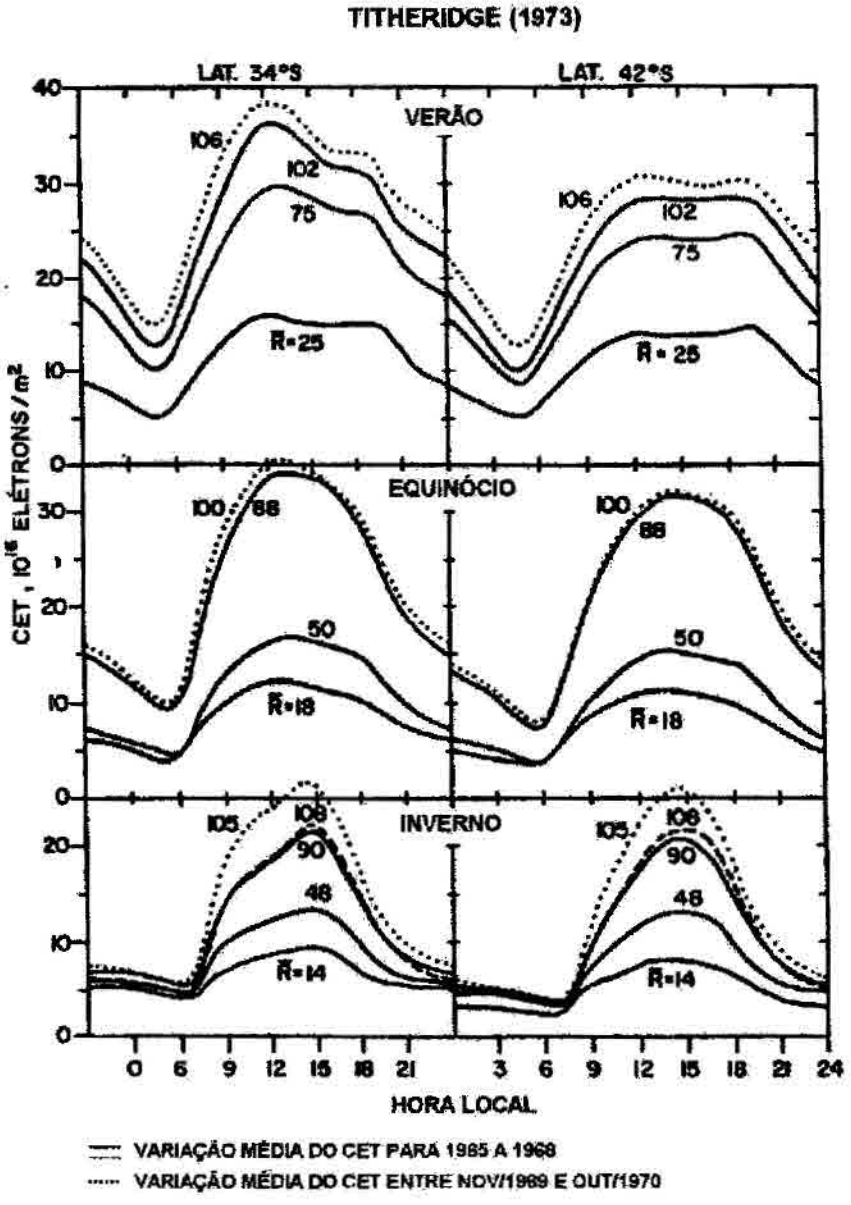


Fig. 6.9 - Variação diurna do conteúdo eletrônico, em diferentes estágios do ciclo solar.
FONTE: Titheridge (1973, p. 991).

As diferenças encontradas nos valores do CET vertical, provavelmente, devem-se à contribuição do CET plasmasférico nas medidas obtidas a partir do GPS, ao atraso instrumental diferencial e às latitudes magnéticas das estações consideradas. Neste último caso, existe uma considerável diferença entre a latitude geomagnética de Fortaleza (5,16° S) e as latitudes geomagnéticas das estações analisadas por Titheridge (38,2° S e 47,0° S), que estão mais afastadas do pico da anomalia equatorial e, portanto, têm valores menores de CET vertical.

6.7 Flutuações do CET

Durante o período de redução dos dados, foi observada a presença de flutuações na variação temporal do CET vertical, relativas à passagem de um satélite individual. A Figura 6.10 apresenta um exemplo destas flutuações, em função da hora universal, para a estação de Kourou (Lat. Geomag. = 11,12° N), em uma época de baixa atividade solar. Estes fenômenos apresentam variações temporal e espacial e são observados no período noturno, provavelmente devido às bolhas ionosféricas geradas na região equatorial.

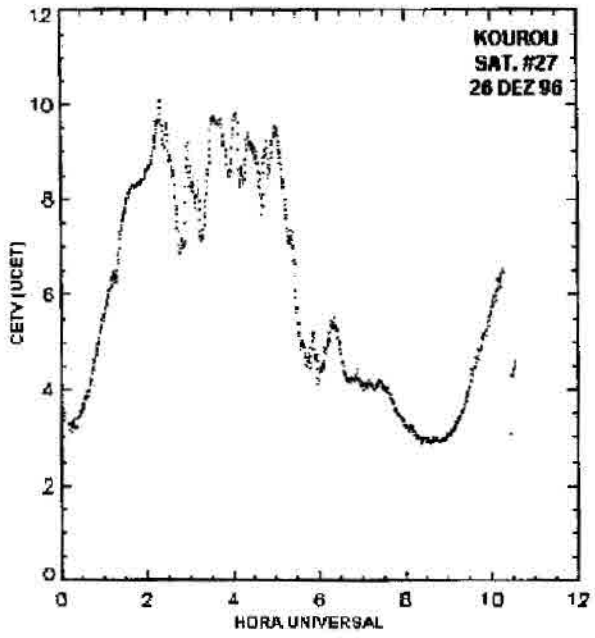


Fig. 6.10 - Flutuação do CET vertical observada em Kourou.

As bolhas ionosféricas ocorrem entre os meses de setembro a março, na América do Sul, e podem atingir uma distância de até 4.000 km para o Norte e Sul, em relação ao equador magnético. Este resultado mostra a potencialidade do estudo das irregularidades ionosféricas, através da utilização de flutuações no CET vertical.

6.8 Efeito das Tempestades Magnéticas

O efeito das tempestades magnéticas sobre o conteúdo eletrônico total foi possível ser analisado somente para uma tempestade magnética considerada fraca (Figura 5.3), dentro do período de dados selecionados para este trabalho, ocorrida entre os dias 9 e 10 de dezembro de 1996. Os períodos de equinócio (março), e solstícios de inverno ou verão não apresentaram eventos significativos.

Os efeitos desta tempestade, que se propaga na direção do equador magnético, podem ser observados na Figura 6.11: após o início da tempestade, em torno das 20:00 horas do dia 09/12/96, houve um aumento no valor do CET vertical para as estações de O'Higgins, La Plata, Santiago e Fortaleza, seguido por um decréscimo pouco antes do início da fase de recuperação. Estas variações são relativas à média do CET vertical para alguns dias calmos, de acordo com a Tabela 5.3. A estação de Kourou apresentou um aumento do CET vertical, no início do dia 10 de dezembro, que pode estar associado à ocorrência da tempestade. As estações de Arequipa, e Bogotá, no entanto, não apresentaram efeitos durante as fases inicial e principal desta tempestade. Não houve uma recuperação da tempestade propriamente dita mas, provavelmente, um conjunto de sucessivas e pequenas perturbações que provocaram um aumento do conteúdo eletrônico para todas as estações, com exceção de O'Higgins, a partir das 09:00 horas do dia 10 de dezembro. Este resultado demonstra a potencialidade do estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre os valores do conteúdo eletrônico total, a partir de dados do GPS.

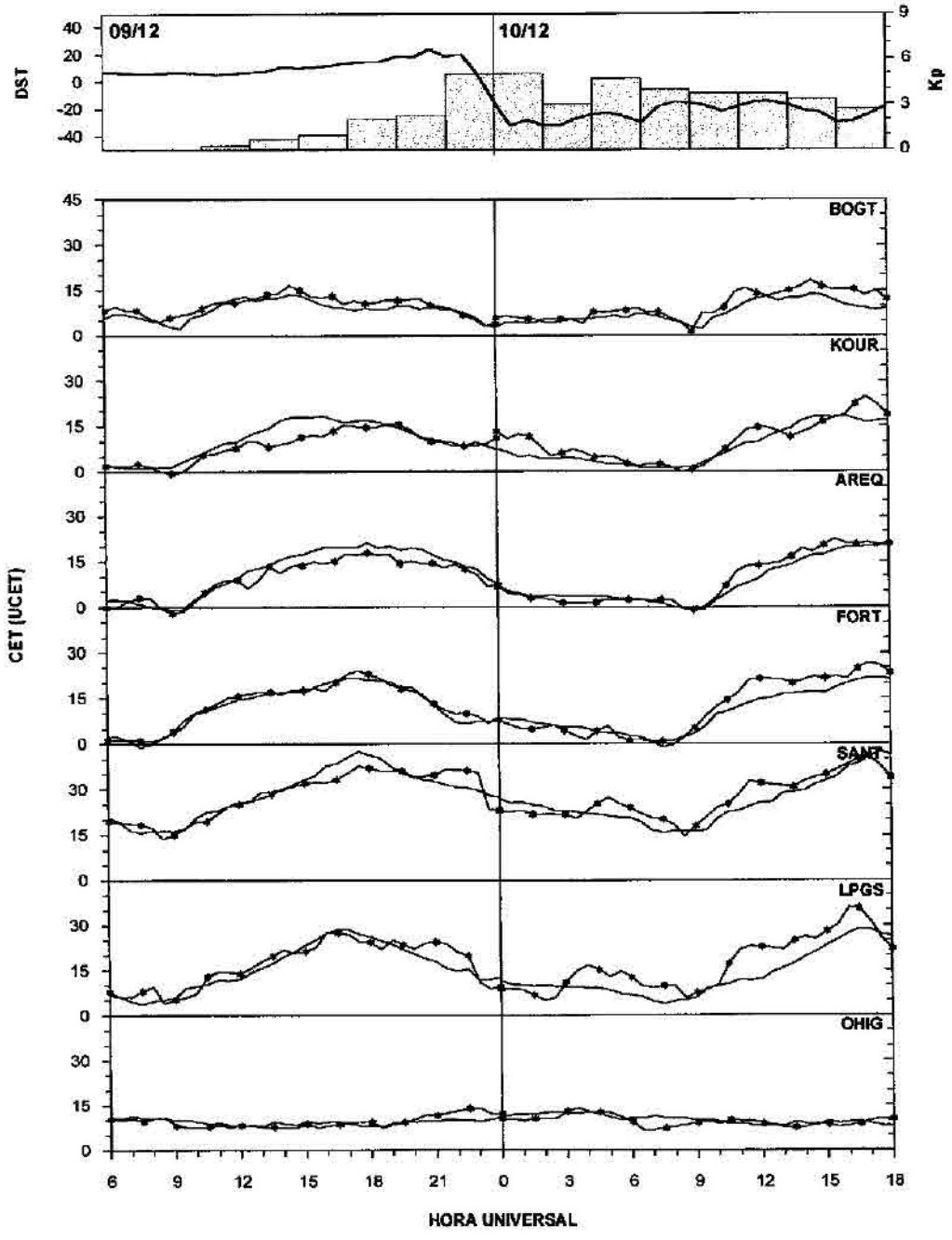


Fig. 6.11 - Variação diurna do CET vertical para a média dos dias calmos (——) e para os dias perturbados (-♦-♦-), em dezembro de 1996.

6.9 Comparação dos Resultados com os Modelos IRI-95 e Plasmasférico

6.9.1 Modelo IRI-95

O "International Reference Ionosphere" (IRI) é um modelo empírico que descreve valores médios de parâmetros ionosféricos, tais como a densidade eletrônica, temperaturas eletrônica e iônica e composição iônica, de acordo com a localização geográfica ou geomagnética, hora local ou universal, estação do ano, altitude e atividade solar. O desenvolvimento deste modelo teve o seu início no final dos anos 60, através de pesquisadores do "Committee on Space Research" (COSPAR) e do "International Union of Radio Science" (URSI), com o objetivo de estabelecer uma série de tabelas contendo dados empíricos de constituintes ionizados da atmosfera, que seriam utilizadas como padrão de referência na realização de experimentos, investigação de teorias, etc. (Bilitza, 1990). Este modelo teve sua primeira versão publicada em 1978, seguida por edições aprimoradas em 1986, 1990 e 1995.

Os resultados obtidos no modelo IRI são baseados em dados provenientes de uma rede mundial de ionossondas, radares de espalhamento incoerente, "topside sounders", foguetes e satélites. Entretanto, apesar desta considerável quantidade de informações, ainda não é possível descrever a ionosfera polar e auroral e considerar os efeitos das tempestades magnéticas, pois o IRI fornece valores apenas para condições magneticamente calmas e latitudes não-aurorais situadas, aproximadamente, entre 100 e 1000 km de altitude (Bilitza, 1990).

No presente trabalho, a versão IRI-95 está sendo utilizada pois, além dos parâmetros descritos anteriormente, possibilita a determinação do conteúdo eletrônico total ionosférico. O programa IRI-95 foi obtido, via ftp, em NASA (1998) e está disponível nas linguagens de programação C e FORTRAN. Todavia, não existe um programa principal propriamente dito, mas um conjunto de várias subrotinas, funções e arquivos de dados contendo os índices, coeficientes e parâmetros necessários à execução do modelo. O modelo IRI-95 inclui uma subrotina específica para a determinação do

conteúdo eletrônico total e duas subrotinas para o cálculo dos parâmetros Ne, Te, Ti e Ni, além de funções e subrotinas adicionais que utilizam o "COSPAR International Reference Atmosphere" (CIRA-86), arquivos contendo os coeficientes CCIR e URSI e os índices solares e ionosféricos. O programa principal foi criado de acordo com os objetivos específicos do trabalho proposto, adequando os parâmetros de entrada e saída do programa principal às subrotinas existentes.

6.9.2 Modelo Plasmasférico

A comparação entre os resultados obtidos através do GPS e um determinado modelo, exige que o modelo considere os valores de conteúdo eletrônico total medidos desde a superfície terrestre até a altura do satélite, em 20.200 km. O modelo IRI-95 fornece valores do conteúdo somente até 1.000 km de altura e, portanto, foi necessário utilizar um modelo para a determinação do conteúdo eletrônico plasmasférico a partir da altura máxima considerada pelo IRI até a altitude orbital do satélites GPS.

O modelo utilizado foi desenvolvido por Gallagher at al. (1988), baseado em dados derivados das medidas de um espectrômetro de massa ("Retarding Ion Mass Spectrometer") instalado a bordo do satélite "Dynamics Explorer 1". Este modelo empírico consiste de uma expressão analítica que reproduz a densidade do hidrogênio para um determinado valor de L (distância medida em raios terrestres, a partir do centro da Terra), latitude e hora local magnéticas. Neste caso, a densidade do hidrogênio equivale à densidade eletrônica, de acordo com a condição de neutralidade macroscópica do plasma, pois o íon H^+ é dominante nesta região da atmosfera. O modelo utiliza as seguintes equações empíricas:

$$LOG_{10}(N) = a_1\ F(L)\ G(L)\ H(L) \tag{6.1}$$

onde

$$F(L) = a_2 - e^{a_3\ \left(1 - a_4 e^{-h(L,\varphi)/a_5}\right)}, \tag{6.2}$$

$$G(L) = a_6\ L + a_7\,, \tag{6.3}$$

e

$$H(L) = \left[1 + \left(\frac{L}{a_8}\right)^2 \left(a_9 - 1\right)\right]^{-\left(\frac{a_9}{a_9 - 1}\right)}. \tag{6.4}$$

O termo $F(L)$ corresponde à camada de Chapman modificada, $G(L)$ é um modelo linear de "L-shell", e $H(L)$ representa a localização e a forma da plasmapausa. As constantes a_i, $(i = 1 \text{ a } 9)$ são parâmetros utilizados para ajustar a equação (6.1) ao logaritmo da densidade eletrônica N, $h(L,\varphi)$ corresponde à altura em relação à superfície terrestre, onde $h(L,\varphi) = R\,L\cos^2\varphi - 6.371$, L é o parâmetro "L-shell" medido em raios terrestres, R é o raio da Terra e a latitude geomagnética é representada por φ. Os parâmetros de ajuste têm os seguintes valores: $a_1 = 1{,}4$, $a_2 = 1{,}53$, $a_3 = -0{,}036$, $a_4 = 30{,}76$, $a_5 = 159{,}9$, $a_6 = -0{,}87 + 0{,}12\ e^{-(x^2/\,9)}$, $a_7 = 6{,}27$, $a_8 = 0{,}7\cos\left(2\pi\dfrac{MLT - 21}{24}\right) + 4{,}4$ e $a_9 = 15{,}3\cos\left(2\pi\dfrac{MLT}{24}\right) + 19{,}7$, onde MLT corresponde à hora local magnética e $-12 \le x \le 12$ MLT, em horas. O parâmetro a_6 controla o gradiente da densidade eletrônica na plasmasfera interna, enquanto a_8 e a_9 determinam, respectivamente, a localização e a inclinação da plasmasfera.

O modelo não considera as características dinâmicas e de pequena escala da plasmasfera, mas apenas as características globais. Além disso, não inclui variações diurnas, sazonais e relativas ao ciclo solar do conteúdo eletrônico plamasférico. Um modelo computacional que considera tais variações encontra-se atualmente em desenvolvimento, de acordo com Gallagher (1988).

6.9.3. Resultados

Os resultados obtidos através dos modelos IRI-95 e plasmasférico, para três diferentes situações, são apresentados nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14. Deve-se observar, porém, que a variação latitudinal gerada pelos modelos engloba uma quantidade maior de dados, em relação aos resultados obtidos a partir do GPS. As Figuras 6.12a,b e c referem-se à estação de Fortaleza que, no período de dezembro/1996, estava situada no vale da anomalia equatorial. A Figura 6.12a apresenta o resultado do CET vertical obtido através do modelo IRI-95, onde é possível observar a variação diurna do conteúdo eletrônico e a anomalia equatorial, cujo vale não coincide exatamente com a latitude geomagnética daquele onde o CET vertical foi calculado com dados do GPS (Figura 6.4), por uma diferença de aproximadamente 5° de latitude. A Figura 6.12b apresenta o resultado obtido a partir do modelo da plasmasfera. Observa-se que a influência da plasmasfera é mais importante à noite, quando o valor do CET vertical calculado a partir do IRI-95 é menor. Finalmente, a Figura 6.12c apresenta a soma dos modelos ionosférico e plasmasférico, onde o vale da anomalia equatorial continua localizado um pouco ao Norte do observado com o GPS (Figura 6.4).

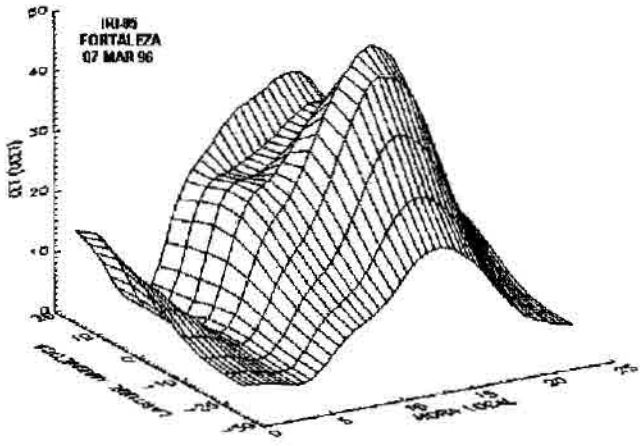


Fig. 6.12a - CET vertical obtido através do IRI-95, para a estação de Fortaleza.

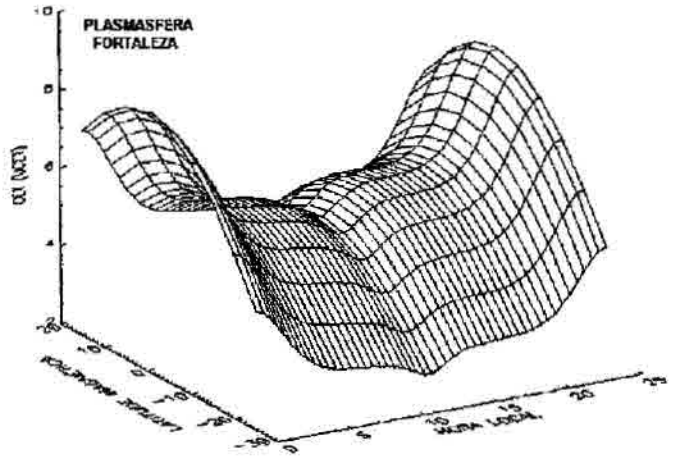


Fig. 6.12b - CET vertical obtido a partir do modelo de plasmasfera.

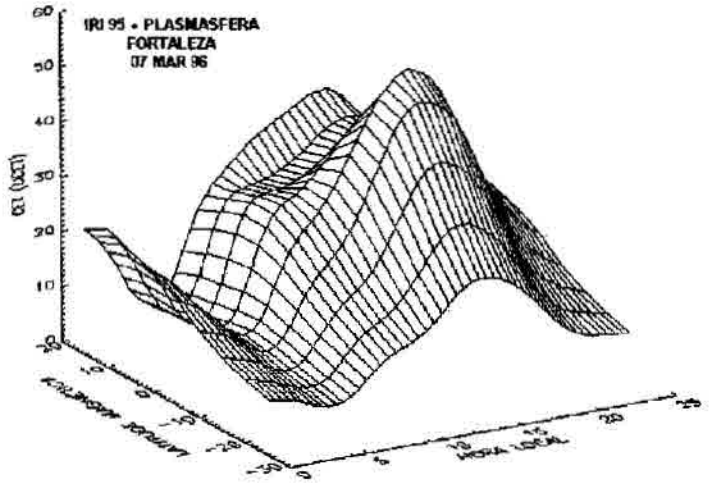


Fig. 6.12c - CET vertical obtido através da soma dos modelos.

O valor absoluto do conteúdo eletrônico total vertical obtido através da soma dos modelos é maior, provavelmente devido ao atraso instrumental diferencial no receptor, que gerou a existência de valores negativos para o CET vertical observado, e ao fato dos modelos serem gerados a partir de dados empíricos coletados, em sua maioria, no hemisfério Norte.

As Figuras 6.13a, b e c apresentam, respectivamente, os resultados gerados pelos modelos IRI-95, plasmasférico e pela soma destes modelos para a estação de Kourou, onde foi observada a presença da anomalia equatorial (Figura 6.5). O resultado dos modelos superestima o CET vertical obtido através do GPS e o pico observado da anomalia apresenta um deslocamento de, aproximadamente, 5° para o Sul em relação ao pico determinado a partir dos modelos. As Figuras 6.14a e b apresentam, respectivamente, os resultados gerados pelos modelos de ionosfera e plasmasfera, para a estação de Santiago. Nesta região, não houve diferença de latitude entre o pico gerado a partir do modelo (Figura 6.14c) e o observado (Figura 6.6). Contudo, os valores do CET vertical calculados pelo método do GPS superestimou os valores encontrados nos modelos, provavelmente devido ao atraso instrumental diferencial presente no receptor de Santiago.

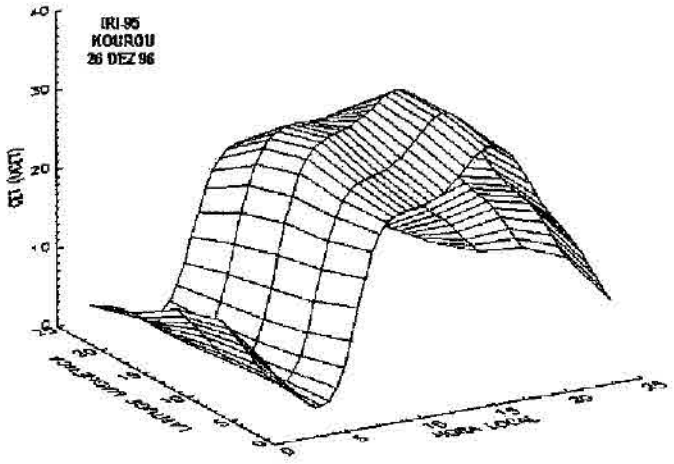


Fig. 6.13a - CET obtido através do IRI-95, para Kourou.

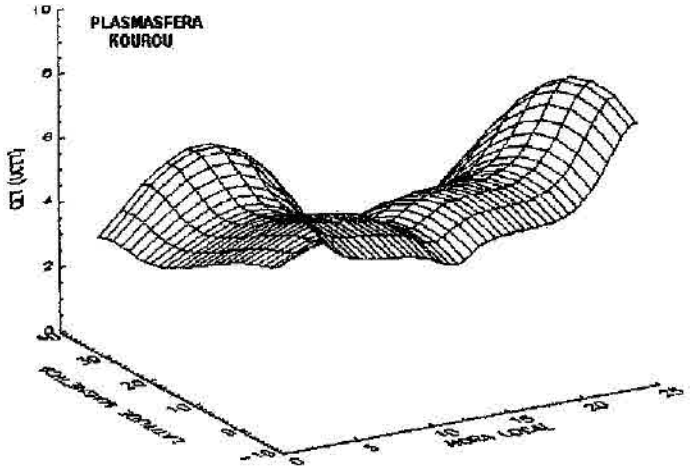


Fig. 6.13b - CET plasmasférico, para a estação de Kourou.

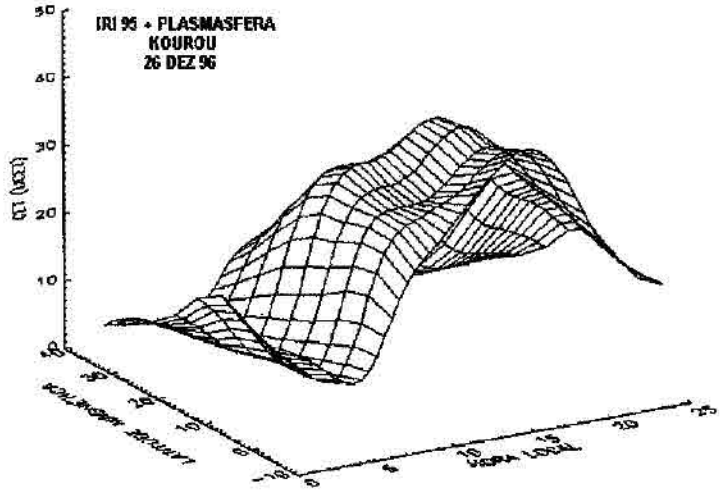


Fig. 6.13c - CET vertical para Kourou, calculado a partir da soma dos valores dos modelos.

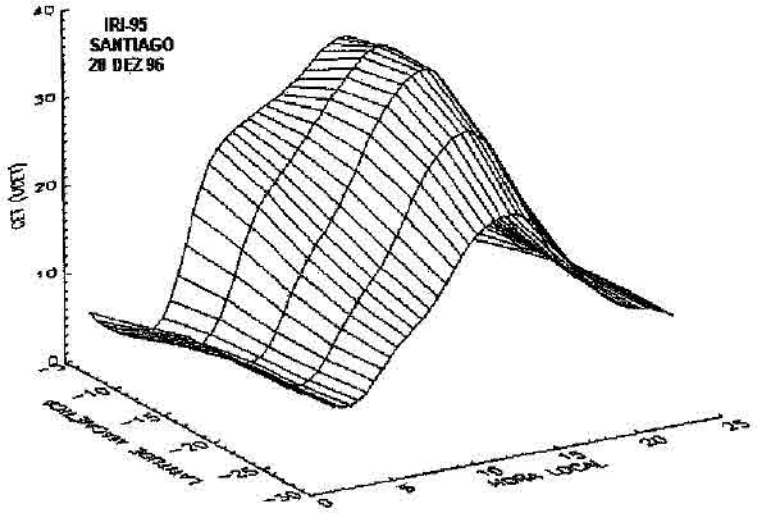


Fig. 6.14a - CET obtido através do IRI-95, para a estação de Santiago.

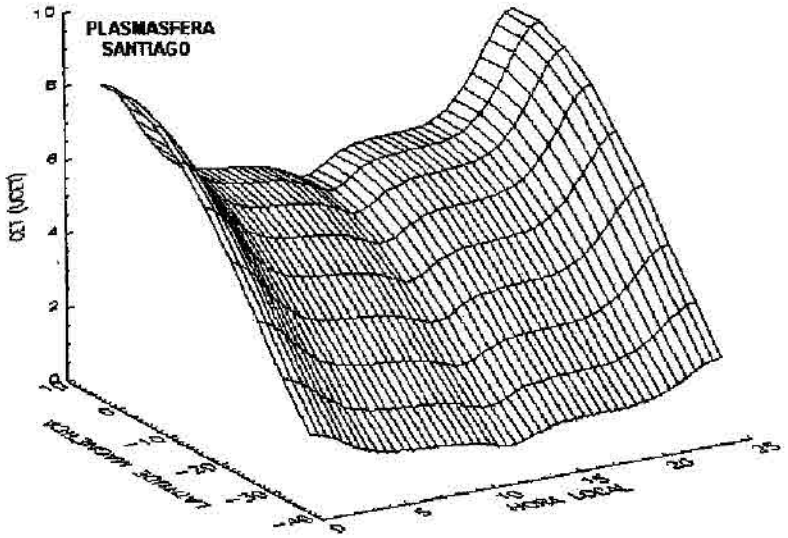


Fig. 6.14b - CET plasmasférico para Santiago.

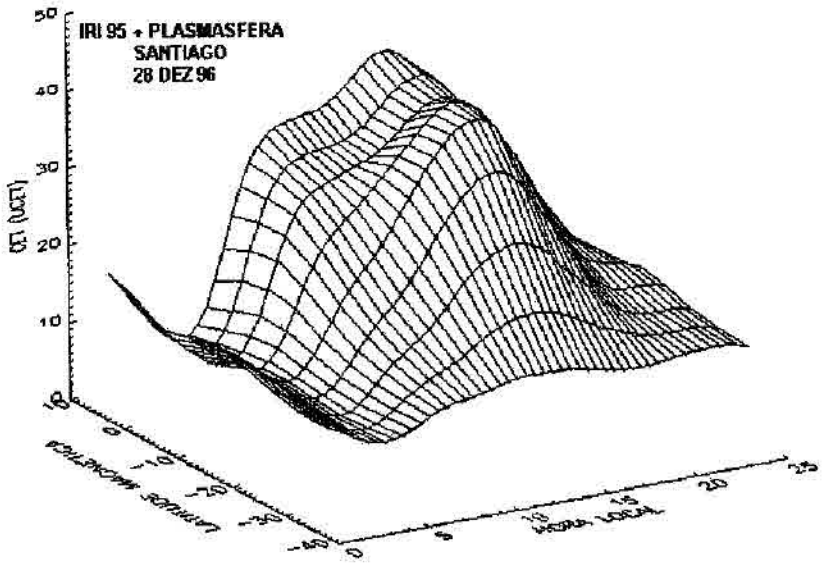


Fig. 6.14c - CET vertical determinado a partir da soma dos valores obtidos nos modelos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Este trabalho marca o início da determinação do CET vertical a partir de dados do GPS, no INPE. Entretanto, já existem vários estudos relacionados à este assunto e um número crescente de trabalhos vem surgindo. Este fato deve-se à um aumento na utilização do GPS, principalmente no hemisfério Norte, onde a quantidade de estações receptoras é consideravelmente maior do que no hemisfério Sul. Assim, por ser um estudo inicial, este trabalho pode apresentar falhas, as quais serão detectadas e corrigidas futuramente.

Uma análise dos resultados obtidos demonstrou que o comportamento diurno e sazonal do conteúdo eletrônico, para um período de baixa atividade solar concorda, aproximadamente, com os valores de CET vertical encontrados, através do método de rotação Faraday, por Souza (1992) e Titheridge (1973). As diferenças observadas nos valores do conteúdo eletrônico estão, provavelmente, relacionadas à contribuição do conteúdo eletrônico plasmasférico nas medidas obtidas a partir das observáveis do GPS, à influência do atraso instrumental diferencial dos satélites e receptores do GPS e às diferenças nas latitudes magnéticas das estações analisadas. Para determinadas estações e passagens de satélite, o número de dados existentes ao longo de uma determinada longitude não é suficiente para uma boa representação da variação latitudinal do conteúdo eletrônico. Entretanto, apesar do método utilizado na suavização de superfícies não representar corretamente algumas áreas onde não existem dados, foi possível observar a presença dos picos da anomalia equatorial.

Os valores de CET vertical obtidos para as várias passagens de satélites, apresentaram algumas flutuações. Tais fenômenos foram observados principalmente à noite, no solstício de verão e, provavelmente, estão relacionados à presença de bolhas ionosféricas, demonstrando a potencialidade do estudo de irregularidades ionosféricas a partir de dados do GPS. Estes dados também permitiram estudar as variações do CET durante as tempestades magnéticas. Neste trabalho, as variações do conteúdo eletrônico

foram estudadas apenas para uma tempestade que, apesar de não ter sido suficientemente forte, apresentou resultados coerentes. Todavia, um estudo mais aprofundado neste assunto exige que uma quantidade maior de dados seja analisada.

O CET vertical fornecido pelos modelos, para um período de baixa atividade solar, superestimou, em geral, os resultados obtidos para as estações analisadas. Porém, os valores de conteúdo eletrônico total obtidos através do modelo IRI-90, no estudo efetuado por Souza (1992), também superestimaram os valores observados.

Em resumo, o método utilizado na determinação do CET vertical a partir das observáveis do GPS, apresentou resultados coerentes. Vários estudos poderão ser desenvolvidos a partir desta metodologia, sejam relacionados ao estudo da ionosfera ou ao posicionamento geodésico, onde é necessária a correção dos efeitos da ionosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen Osborne Associates (AOA). **SNR-8000**. [online]. <http://www.aoa-gps.com/snr8000.htm>. 19 Oct. 1998.

Banks, P. M.; Kockarts, G. **Aeronomy**: Part B. New York: Academic, 1973. 355 p.

Beard, E. D. **A background report on total electron content measurements**. Illinois: Hq Air Force Weather Service (MAC), 1975. 23 p. (AWS-TR-75-260).

Bilitza, D. **International Reference Ionosphere 1990**. Greenbelt: NSSDC, Nov. 1990. (NSSDC/WDC-A-R&S 90-22). 156 p.

Bishop, G. J.; Klobuchar, J. A.; Doherty, P. H. Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals. **Radio Science**, v. 20, n. 3, p. 388-396, May-June 1985.

Bittencourt, J. A. **Fundamental of plasma physics**. 2. ed. São Paulo: Abaeté, 1995. 676 p.

Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data. **Geophysical Research Letters**, v. 17, n. 3, p. 199-202, Mar. 1990.

Coco, D. S.; Coker, C.; Dahlke, S. R.; Clynch, J. R. Variability of GPS satellite differential group delay biases. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 27, n. 6, p. 931-938, Nov. 1991.

Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS). **CDDIS Bulletin**, v. 11, n. 2, Dec. 1995.

Davies, K. **Ionospheric radio propagation**. New York: Dover Publications, 1966. 470 p.

Davies, K. **Ionospheric radio**. London: Peter Peregrinus, 1990. 580 p.

Dottori, M.; Negraes, R. **GPS**: Global Positioning System. São Paulo: Fittipaldi, 1997. 64 p.

Feltens, J. 1998. jfeltens@mail-gw.esoc.esa.de. **Satellite and receiver biases**...Kantor, I. J. kantor@dae.inpe.br. 27 Oct. 1998.

Fraile, J. M. Ionospheric total electron content determination from dual frequency GPS measurements for real-time applications in satellite navigation. **Journal for Satellite-based Positioning, Navigation and Communication**, n. 3, Sept., 1995.

Gail, W. B.; Prag, B.; Coco, D. S.; Cooker, C. A statistical characterization of local mid-latitude total electron content. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A9, p. 15.717-15.727, 1993.

Gallagher, D. L.; Craven, P. D.; Comfort, R. H. An empirical model of the earth's plasmasphere. **Advances in Space Research**, v. 8, n. 8, p. (8)15-(8)24, 1988.

Garriott, O. K.; Rosa, A. V.; Ross, W. J. Electron content obtained from Faraday rotation and phase path length variations. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 32, p. 705-727, 1970.

Gurtner, W. **RINEX: The receiver independent exchange format version 2**. [online]. <ftp:// igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex2.txt>. 25 Mar. 1997.

Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. **Global Positioning System**: theory and practice. 3. ed. Wien: Springer-Verlag, 1994. 355 p.

IBM. **Geographic Information Systems**. [online]. <http://giswww.pok.ibm.com/gps/satellit.html>. 28 Sept. 1998.

Iijima, B. BAI@logos.jpl.nasa.gov. **P1 and P2 data**. Paula, E. R. eurico@dae.inpe.br. 26 Aug. 1997.

Jakowski, N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In: Kohl, H. et al. ed. **Modern ionospheric science**. Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, 1996. p. 371-390.

Johnson, F. S. **Satellite environment handbook**. Stanford University Press, 1961. 155 p.

Kantor, I. J. **Conteúdo eletrônico da ionosfera e a utilização de satélites geoestacionários**. 1v. (Relatório interno do INPE.) Não publicado.

Kantor, I. J.; Fedrizzi, M.; Paula, E. R. Total electron content from GPS measurements over the brazilian region. **Geofisica Internacional**. (Aceito para publicação em junho/99).

Klobuchar, J. A. Ionospheric total electron content (TEC). In: Jursa, A.S. ed. **Handbook of geophysics and space evironment.** Springfield: Air Force Geophysics Laboratory, 1985. Cap. 10, section 10.9, p. 10-89 – 10-96.

Klobuchar, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System:** theory and applications. Washington: AIAA, 1996. Cap. 12, p. 485-515. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Komjathy, A.; Langley, R. B. **An assessment of predicted and measured ionospheric total electron content using a regional GPS network.** [online]. In: ION National Technical Meeting, Santa Monica, CA. 22-24 Jan. 1996. <http://gauss.gge.unb.ca/grads/attila/papers/papers.htm>. 17 Sept. 1998.

Komjathy, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System**. New Brunswick. 248 p. (Technical Report No. 188). Ph. D. dissertation. University of New Brunswick, Sept., 1997.

Lanyi, G. E.; Roth, T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations. **Radio Science**, v. 23, p. 483-492, 1988.

Leick, A. **GPS satellite surveying**. 2. ed. New York: John Wiley, 1995. 559 p.

Mannucci, A. J.; Wilson, B. D.; Edwards, C. D. A new method for monitoring the earth's ionospheric total electron content using GPS global network. **Institute of Navigation**, v. 2, p. 1323-1332, 1993. Proceedings of ION GPS-93. Salt Lake City, Sept. 22-24, 1993.

McNamara, L. F. **The ionosphere**: communications, surveilance and direction finding. Malabar: Krieger, 1991. 237 p.

Monico, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações: notas de aula dadas na UNESP, Presidente Prudente, 1996. 93 p.

Monico, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações. Presidente Prudente: UNESP.FCT, 1998. 182 p.

Musman, S. steven@ulf.grdl.noaa.gov. **RINEX file**. Kantor, I. J. kantor@dae.inpe.br. 29 Aug. 1997.

NASA. **IRI-95 Software**. [online]. <ftp://nssdc.gsfc.nasa.gov/pub/models/ionospheric/iri/iri95>. 6 May 1998.

NASA. **About the IGS**. [online]. <http://igscb.jpl.nasa.gov/overview/viewindex.html>. 18 Jan. 1999a.

NASA. **International GPS service**. [online]. <http://igscb.jpl.nasa.gov>. 18 Jan. 1999b.

NASA. **Standards for IGS stations and operational centers**. [online]. <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/guide_igs.html>. 19 Jan. 1999c.

Parkinson, B. W. Introduction and heritage of NAVSTAR, the Global Positioning System. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System:** theory and applications. Washington: AIAA, 1996. Cap. 1, p. 3-28. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Ratcliffe, J. A. **The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere**. 2. ed. London: Bradford & Dickens, 1962. 206 p.

Rich, F. J. Structure of the ionosphere. In: Jursa, A.S. ed. **Handbooks of geophysics and space evironment.** Springfield: Air Force Geophysics Laboratory, 1985. Cap. 9, section 9.1, p. 9-1 – 9-4.

Rishbeth, H.; Garriott, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331 p.

Sardón, E.; Rius, A.; Zarraoa, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations. **Radio Science**, v. 29, p. 577-586, 1994.

Sardón, E.; Zarraoa, N. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases? **Radio Science**, v. 32, n. 5, p. 1899-1910, Sept-Oct. 1997.

Seeber, G. **Satellite geodesy**: foundations, methods and applications. Berlim: Walter de Gruyter, 1993. 531 p.

Skolnik, M. I. **Radar Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1970. 1505 p..

Souza, J. R. **Estudo do conteúdo eletrônico total ionosférico**. São José dos Campos. 70 p. (INPE-5417-TDI/481). Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.

Spilker Jr., J. J. GPS navigation data. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications.** Washington: AIAA, 1996. Cap. 4, p. 121-176. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Spilker Jr., J. J.; Parkinson, B.W. Overview of GPS operation and design. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System:** theory and applications. Washington: AIAA, 1996. Cap. 2, p. 29-55. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Spofford, P. R.; Remondi, B. W. **The national geodetic survey standard format SP3**. [online]. <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3_docu.txt>. 1 July 1997.

Standards on wave propagation: definition of terms. **Proceedings of the IRE**, v. 38, n. 11, p. 1264-1268, Nov. 1950.

Tascione, T. F. **Introduction to the space environment**. Malabar: Orbit Book Company, 1988. 116 p.

Titheridge, J.E. Determination of ionospheric electron content from the Faraday rotation of geostationary satellite signals. **Planetary and Space Science**, v. 20, p. 353-369, 1972.

Titheridge, J. E. The electron content of the southern mid-latitude ionosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 35, p. 981-1002, 1973.

U. S. Naval Observatory (USNO). **Block II satellite information**. [online]. <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt >. 18 Mar. 1999a.

U. S. Naval Observatory (USNO). **Leap seconds**. [online]. <http://tycho.usno.navy.mil/leapsec.html>. 18 Jan. 1999b.

Wanninger, L. Monitoring total ionospheric electron content and ionospheric irregularities with GPS. **Geodesy**, n. 36, 1992. Paper presented at Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy. Hague, 19-22 May, 1992.

Wilson, B. D.; Mannucci, A. J. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data. **Institute of Navigation**, v. 2, p. 1343-1351, 1993. Proceedings of ION GPS-93. Salt Lake City, September 22-24, 1993.

Wrenn, G. L.; Rodger, A. S.; Rishbeth, H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region: I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 49, n. 9, p. 901-913, 1987.

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DOS FORMATOS RINEX E SP3

A descrição dos arquivos de dados nos formatos RINEX e SP3 é apresentada neste Apêndice, com o objetivo de otimizar a consulta de tais dados aos usuários. Informações adicionais sobre os formatos RINEX e SP3 podem ser obtidas, respectivamente, em Gurtner (1997) e Spofford e Remondi (1997).

A.1 - DESCRIÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS NO FORMATO RINEX

O formato RINEX consiste de três arquivos do tipo ASCII: dados de observação, mensagem de navegação e dados meteorológicos. Estes arquivos contêm um cabeçalho, com informações gerais sobre o arquivo, e uma seção de dados. Os arquivos de observação e meteorológicos contêm dados para uma determinada estação e sessão, enquanto que os arquivos de navegação fornecem parâmetros orbitais, coeficientes para a correção ionosférica, informações sobre os satélites e sinais por estes transmitidos.

TABLE A1
OBSERVATION DATA FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION

	HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT
	RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2) - File type ('O' for Observation Data) - Satellite System: blank or 'G': GPS 'R': GLONASS 'T': NNSS Transit 'M': Mixed	I6,14X, A1,19X, A1,19X
	PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file - Name of agency creating current file - Date of file creation	A20, A20, A20
*	COMMENT	Comment line(s)	A60
	MARKER NAME	Name of antenna marker	A60
*	MARKER NUMBER	Number of antenna marker	A20
	OBSERVER / AGENCY	Name of observer / agency	A20,A40
	REC # / TYPE / VERS	Receiver number, type, and version (Version: e.g. Internal Software Version)	3A20

ANT # / TYPE	Antenna number and type	2A20
APPROX POSITION XYZ	Approximate marker position (WGS84)	3F14.4
ANTENNA: DELTA H/E/N	- Antenna height: Height of bottom surface of antenna above marker - Eccentricities of antenna center relative to marker to the east and north (all units in meters)	3F14.4
WAVELENGTH FACT L1/2	- Wavelength factors for L1 and L2 1: Full cycle ambiguities 2: Half cycle ambiguities (squaring) 0 (in L2): Single frequency instrument - Number of satellites to follow in list for which these factors are valid. 0 or blank: Default wavelength factors for all satellites not contained in such a list. - List of PRNs (satellite numbers with system identifier) Repeat record if necessary	2I6, I6, 7(3X,A1,I2)
# / TYPES OF OBSERV	- Number of different observation types stored in the file - Observation types If more than 9 observation types: Use continuation line(s) The following observation types are defined in RINEX Version 2: L1, L2: Phase measurements on L1 and L2 C1 : Pseudorange using C/A-Code on L1 P1, P2: Pseudorange using P-Code on L1,L2 D1, D2: Doppler frequency on L1 and L2 T1, T2: Transit Integrated Doppler on 150 (T1) and 400 MHz (T2) Observations collected under Antispoofing are converted to "L2" or "P2" and flagged with bit 2 of loss of lock indicator (see Table A2). Units : Phase : full cycles Pseudorange : meters Doppler : Hz Transit : cycles The sequence of the types in this record has to correspond to the sequence of the observations in the observation records	I6, 9(4X,A2) 6X,9(4X,A2)
* INTERVAL	Observation interval in seconds	I6 *
TIME OF FIRST OBS	- Time of first observation record (4-digit-year, month,day,hour,min,sec) - Time system: GPS (=GPS time system) GLO (=UTC time system) Compulsory in mixed GPS/GLONASS files Defaults: GPS for pure GPS files GLO for pure GLONASS files	5I6,F12.6, 6X,A3
* TIME OF LAST OBS	- Time of last observation record (4-digit-year, month,day,hour,min,sec) - Time system: GPS (=GPS time system) GLO (=UTC time system) Compulsory in mixed GPS/GLONASS files	5I6,F12.6, * 6X,A3

	Defaults: GPS for pure GPS files GLO for pure GLONASS files		
*|LEAP SECONDS	Number of leap seconds since 6-Jan-1980 Recommended for mixed GPS/GLONASS files	I6	*
*|# OF SATELLITES	Number of satellites, for which observations are stored in the file	I6	*
*|PRN / # OF OBS	PRN (sat.number), number of observations for each observation type indicated in the "# / TYPES OF OBSERV" - record. If more than 9 observation types: Use continuation line(s) This record is (these records are) repeated for each satellite present in the data file	3X,A1,I2,9I6 6X,9I6	*
|END OF HEADER	Last record in the header section.	60X	

Records marked with * are optional

TABLE A2

OBSERVATION DATA FILE - DATA RECORD DESCRIPTION

OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
EPOCH/SAT or EVENT FLAG	- Epoch : year (2 digits), month,day,hour,min,sec - Epoch flag 0: OK 1: power failure between previous and current epoch >1: Event flag - Number of satellites in current epoch - List of PRNs (sat.numbers with system identifier, see 5.1) in current epoch - receiver clock offset (seconds, optional) If more than 12 satellites: Use continuation line(s) If EVENT FLAG record (epoch flag > 1): - Event flag: 2: start moving antenna 3: new site occupation (end of kinem. data) (at least MARKER NAME record follows) 4: header information follows 5: external event (epoch is significant, same time frame as observation time tags) 6: cycle slip records follow to optionally report detected and repaired cycle slips (same format as OBSERVATIONS records; slip instead of observation; LLI and signal strength blank) - "Number of satellites" contains number of records to follow (0 for event flags 2,5)	5I3,F11.7, I3, I3, 12(A1,I2), F12.9 32X, 12(A1,I2)
OBSERVATIONS	- Observation | rep. within record for - LLI | each obs.type (same seq - Signal strength | as given in header) If more than 5 observation types (=80 char): continue observations in next record. This record is (these records are) repeated for	m(F14.3, I1, I1)

	each satellite given in EPOCH/SAT - record. Observations: Phase : Units in whole cycles of carrier Code : Units in meters Missing observations are written as 0.0 or blanks. Loss of lock indicator (LLI). Range: 0-7 0 or blank: OK or not known Bit 0 set : Lost lock between previous and current observation: cycle slip possible Bit 1 set : Opposite wavelength factor to the one defined for the satellite by a previous WAVELENGTH FACT L1/2 line. Valid for the current epoch only. Bit 2 set : Observation under Antispoofing (may suffer from increased noise) Bits 0 and 1 for phase only. Signal strength projected into interval 1-9: 1: minimum possible signal strength 5: threshold for good S/N ratio 9: maximum possible signal strength 0 or blank: not known, don't care		

TABLE A3
NAVIGATION MESSAGE FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION

	HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT
	RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2) - File type ('N' for Navigation data)	I6,14X, A1,19X
	PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file - Name of agency creating current file - Date of file creation	A20, A20, A20
*	COMMENT	Comment line(s)	A60
*	ION ALPHA	Ionosphere parameters A0-A3 of almanac (page 18 of subframe 4)	2X,4D12.4
*	ION BETA	Ionosphere parameters B0-B3 of almanac	2X,4D12.4
*	DELTA-UTC: A0,A1,T,W	Almanac parameters to compute time in UTC (page 18 of subframe 4) A0,A1: terms of polynomial T : reference time for UTC data W : UTC reference week number. Continuous number, not mod(1024)	3X,2D19.12, 2I9
*	LEAP SECONDS	Delta time due to leap seconds	I6
	END OF HEADER	Last record in the header section.	60X

Records marked with * are optional

TABLE A4
NAVIGATION MESSAGE FILE - DATA RECORD DESCRIPTION

OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT

PRN / EPOCH / SV CLK	- Satellite PRN number	I2,
	- Epoch: Toc - Time of Clock	
	year (2 digits)	5I3,
	month	
	day	
	hour	
	minute	
	second	F5.1,
	- SV clock bias (seconds)	3D19.12
	- SV clock drift (sec/sec)	
	- SV clock drift rate (sec/sec2)	
BROADCAST ORBIT - 1	- IODE Issue of Data, Ephemeris	3X,4D19.12
	- Crs (meters)	
	- Delta n (radians/sec)	
	- M0 (radians)	
BROADCAST ORBIT - 2	- Cuc (radians)	3X,4D19.12
	- e Eccentricity	
	- Cus (radians)	
	- sqrt(A) (sqrt(m))	
BROADCAST ORBIT - 3	- Toe Time of Ephemeris	3X,4D19.12
	(sec of GPS week)	
	- Cic (radians)	
	- OMEGA (radians)	
	- CIS (radians)	
BROADCAST ORBIT - 4	- i0 (radians)	3X,4D19.12
	- Crc (meters)	
	- omega (radians)	
	- OMEGA DOT (radians/sec)	
BROADCAST ORBIT - 5	- IDOT (radians/sec)	3X,4D19.12
	- Codes on L2 channel	
	- GPS Week # (to go with TOE)	
	Continuous number, not mod(1024)!	
	- L2 P data flag	
BROADCAST ORBIT - 6	- SV accuracy (meters)	3X,4D19.12
	- SV health (MSB only)	
	- TGD (seconds)	
	- IODC Issue of Data, Clock	
BROADCAST ORBIT - 7	- Transmission time of message	3X,4D19.12
	(sec of GPS week, derived e.g.	
	from Z-count in Hand Over Word (HOW)	
	- spare	
	- spare	
	- spare	

TABLE A5
METEOROLOCICAL DATA FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION

HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT
RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2)	I6,14X,
	- File type ('M' for Meteorological Data)	A1,39X
PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file	A20,
	- Name of agency creating current file	A20,
	- Date of file creation	A20
* COMMENT	Comment line(s)	A60 *

MARKER NAME	Station Name (preferably identical to MARKER NAME in the associated Observation File)	A60
* MARKER NUMBER	Station Number (preferably identical to MARKER NUMBER in the associated Observation File)	A20 *
# / TYPES OF OBSERV	- Number of different observation types stored in the file - Observation types The following meteorological observation types are defined in RINEX Version 2: PR : Pressure (mbar) TD : Dry temperature (deg Celsius) HR : Relative Humidity (percent) ZW : Wet zenith path delay (millimeters) (for WVR data) The sequence of the types in this record must correspond to the sequence of the measurements in the data records If more than 9 observation types are being used, use continuation lines with format (6X,9(4X,A2))	I6, 9(4X,A2)
SENSOR MOD/TYPE/ACC	Description of the met sensor - Model (manufacturer) - Type - Accuracy (same units as obs values) - Observation type Record is repeated for each observation type found in # / TYPES OF OBSERV record	A20, A20,6X, F7.1,4X, A2,1X
SENSOR POS XYZ/H	Approximate position of the met sensor - Geocentric coordinates X,Y,Z (ITRF - Ellipsoidal height H or WGS-84) - Observation type Set X,Y,Z to zero if not known. Make sure H refers to ITRF or WGS-84! Record required for barometer, recommended for other sensors.	3F14.4, 1F14.4, 1X,A2,1X
END OF HEADER	Last record in the header section.	60X

TABLE A6
METEOROLOGICAL DATA FILE - DATA RECORD DESCRIPTION

OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
EPOCH / MET	- Epoch in GPS time (not local time!) year (2 digits), month,day,hour,min,sec	6I3,
	- Met data in the same sequence as given in the header	mF7.1
	More than 8 met data types: Use continuation lines	4X,10F7.1,3X

TABLE A7

```
|                          OBSERVATION DATA FILE - EXAMPLE                          |
+-------------------------------------------------------------------------------+

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2              OBSERVATION DATA    M (MIXED)           RINEX VERSION / TYPE
BLANK OR G = GPS,  R = GLONASS,  T = TRANSIT,  M = MIXED    COMMENT
XXRINEXO V9.9       AIUB                22-APR-93 12:43     PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE                               COMMENT
A 9080                                                      MARKER NAME
9080.1.34                                                   MARKER NUMBER
BILL SMITH          ABC INSTITUTE                           OBSERVER / AGENCY
X1234A123           XX                  ZZZ                 REC # / TYPE / VERS
234                 YY                                      ANT # / TYPE
  4375274.       587466.       4589095.                     APPROX POSITION XYZ
         .9030          .0000          .0000                ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     1     2     6   G14   G15   G16   G17   G18   G19      WAVELENGTH FACT L1/2
     4    P1    L1    L2    P2                              # / TYPES OF OBSERV
    18                                                      INTERVAL
  1990     3    24    13    10   36.000000                  TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER
 90  3 24 13 10 36.0000000  0  3G12G 9G 6                          -.123456789
  23629347.915            .300 8          -.353    23629364.158
  20891534.648           -.120 9          -.358    20891541.292
  20607600.189           -.430 9           .394    20607605.848
 90  3 24 13 10 50.0000000  4  4
     1     2     2   G 9   G12                                 WAVELENGTH FACT L1/2
  *** WAVELENGTH FACTOR CHANGED FOR 2 SATELLITES ***          COMMENT
      NOW 8 SATELLITES HAVE WL FACT 1 AND 2!                  COMMENT
                                                              COMMENT
 90  3 24 13 10 54.0000000  0  5G12G 9G 6R21R22                    -.123456789
  23619095.450      -53875.632 8     -41981.375    23619112.008
  20886075.667      -28688.027 9     -22354.535    20886082.101
  20611072.689       18247.789 9      14219.770    20611078.410
  21345678.576       12345.567 5
  22123456.789       23456.789 5
 90  3 24 13 11  0.0000000  2
                            4  1
           *** FROM NOW ON KINEMATIC DATA! ***                COMMENT
 90  3 24 13 11 48.0000000  0  4G16G12G 9G 6                       -.123456789
  21110991.756       16119.980 7      12560.510    21110998.441
  23588424.398     -215050.557 6    -167571.734    23588439.570
  20869878.790     -113803.187 8     -88677.926    20869884.938
  20621643.727       73797.462 7      57505.177    20621649.276
                            3  4
A 9080                                                      MARKER NAME
9080.1.34                                                   MARKER NUMBER
         .9030          .0000          .0000                ANTENNA: DELTA H/E/N
          --> THIS IS THE START OF A NEW SITE <--           COMMENT
 90  3 24 13 12  6.0000000  0  4G16G12G 6G 9                       -.123456987
  21112589.384       24515.877 6      19102.763 3  21112596.187
  23578228.338     -268624.234 7    -209317.284 4  23578244.398
  20625218.088       92581.207 7      72141.846 4  20625223.795
  20864539.693     -141858.836 8    -110539.435 5  20864545.943
 90  3 24 13 13  1.2345678  5  0
                            4  1
       (AN EVENT FLAG WITH SIGNIFICANT EPOCH)               COMMENT
 90  3 24 13 14 12.0000000  0  4G16G12G 9G 6                       -.123456012
  21124965.133       89551.30216      69779.62654  21124972.2754
  23507272.372     -212616.150 7    -165674.789 5  23507288.421
  20828010.354     -333820.093 6    -260119.395 5  20828017.129
  20650944.902      227775.130 7     177487.651 4  20650950.363
                            4  1
          *** ANTISPOOFING ON G 16 AND LOST LOCK             COMMENT
 90  3 24 13 14 12.0000000  6  2G16G 9
                 123456789.0       -9876543.5
                         0.0             -0.5
                            4  2
          ---> CYCLE SLIPS THAT HAVE BEEN APPLIED TO        COMMENT
```

```
              THE OBSERVATIONS                                    COMMENT
90  3 24 13 14 48.0000000  0  4G16G12G 9G 6                              -.123456234
 21128884.159      110143.144 7     85825.18545  21128890.7764
 23487131.045     -318463.297 7   -248152.72824  23487146.149
 20817844.743     -387242.571 6   -301747.22925  20817851.322
 20658519.895      267583.67817    208507.26234  20658525.869
                     4  4
        ***   SATELLITE G 9   THIS EPOCH ON WLFACT 1 (L2)  COMMENT
        *** G 6 LOST LOCK AND THIS EPOCH ON WLFACT 2 (L2)  COMMENT
             (OPPOSITE TO PREVIOUS SETTINGS)               COMMENT

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

TABLE A8
NAVIGATION MESSAGE FILE - EXAMPLE

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2              N: GPS NAV DATA                          RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V2.0       AIUB                 12-SEP-90 15:22     PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 2 FORMAT                                  COMMENT
     .1676D-07   .2235D-07  -.1192D-06  -.1192D-06           ION ALPHA
     .1208D+06   .1310D+06  -.1310D+06  -.1966D+06           ION BETA
     .133179128170D-06  .107469588780D-12   552960       39 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
     6                                                       LEAP SECONDS
                                                             END OF HEADER
 6 90  8  2 17 51 44.0 -.839701388031D-03 -.165982783074D-10  .000000000000D+00
     .910000000000D+02  .934062500000D+02  .116040547840D-08  .162092304801D+00
     .484101474285D-05  .626740418375D-02  .652112066746D-05  .515365489006D+04
     .409904000000D+06 -.242143869400D-07  .329237003460D+00 -.596046447754D-07
     .111541663136D+01  .326593750000D+03  .206958726335D+01 -.638312302555D-08
     .307155651409D-09  .000000000000D+00  .551000000000D+03  .000000000000D+00
     .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .910000000000D+02
     .406800000000D+06
13 90  8  2 19  0  0.0  .490025617182D-03  .204636307899D-11  .000000000000D+00
     .133000000000D+03 -.963125000000D+02  .146970407622D-08  .292961152146D+01
    -.498816370964D-05  .200239347760D-02  .928156077862D-05  .515328476143D+04
     .414000000000D+06 -.279396772385D-07  .243031939942D+01 -.558793544769D-07
     .110192796930D+01  .271187500000D+03 -.232757915425D+01 -.619632953057D-08
    -.785747015231D-11  .000000000000D+00  .551000000000D+03  .000000000000D+00
     .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .389000000000D+03
     .410400000000D+06

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

TABLE A9
METEOROLOGICAL DATA FILE - EXAMPLE

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2              METEOROLOGICAL DATA                      RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXM V9.9       AIUB                 3-APR-96 00:10      PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MET DATA FILE                                   COMMENT
A 9080                                                       MARKER NAME
     3    PR    TD    HR                                    # / TYPES OF OBSERV
PAROSCIENTIFIC      740-16B                  0.2    PR SENSOR MOD/TYPE/ACC
HAENNI                                       0.1    TD SENSOR MOD/TYPE/ACC
ROTRONIC            I-240W                   5.0    HR SENSOR MOD/TYPE/ACC
       0.0            0.0          0.0   1234.5678 PR SENSOR POS XYZ/H
                                                             END OF HEADER
 96  4  1  0  0 15  987.1   10.6   89.5
 96  4  1  0  0 30  987.2   10.9   90.0
 96  4  1  0  0 45  987.1   11.6   89.0
```

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

TABLE A10
GLONASS NAVIGATION MESSAGE FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION

	HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT	
	RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2.01) - File type ('G' = GLONASS nav mess data)	F9.2,11X, A1,39X	#
	PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file - Name of agency creating current file - Date of file creation (dd-mmm-yy hh:mm)	A20, A20, A20	
*	COMMENT	Comment line(s)	A60	*
*	CORR TO SYSTEM TIME	- Time of reference for system time corr (year, month, day) - Correction to system time scale (sec) to correct GLONASS system time to UTC(SU) (-TauC)	3I6, 3X,D19.12	*
*	LEAP SECONDS	Number of leap seconds since 6-Jan-1980	I6	*
	END OF HEADER	Last record in the header section.	60X	

Records marked with * are optional

TABLE A11
GLONASS NAVIGATION MESSAGE FILE - DATA RECORD DESCRIPTION

OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
PRN / EPOCH / SV CLK	- Satellite almanac number - Epoch of ephemerides (UTC) - year (2 digits) - month - day - hour - minute - second - SV clock bias (sec) (-TauN) - SV relative frequency bias (+GammaN) - message frame time (sec of day UTC)	I2, 5I3, F5.1, D19.12, D19.12, D19.12
BROADCAST ORBIT - 1	- Satellite position X (km) - velocity X dot (km/sec) - X acceleration (km/sec2) - health (0=OK) (Bn)	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 2	- Satellite position Y (km) - velocity Y dot (km/sec) - Y acceleration (km/sec2) - frequency number (1-24)	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 3	- Satellite position Z (km) - velocity Z dot (km/sec) - Z acceleration (km/sec2) - Age of oper. information (days) (E)	3X,4D19.12

TABLE A12

GLONASS NAVIGATION MESSAGE FILE - EXAMPLE

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2.01           GLONASS NAV DATA                                RINEX VERSION / TYPE
ASRINEXG V1.1.0 VM  AIUB                 19-FEB-98 10:42     PGM / RUN BY / DATE
STATION ZIMMERWALD                                          COMMENT
  1998     2    16    0.379979610443D-06                    CORR TO SYSTEM TIME
                                                            END OF HEADER
 3 98  2 15  0 15  0.0 0.163525342941D-03 0.363797880709D-11 0.108000000000D+05
    0.106275903320D+05-0.348924636841D+00 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
   -0.944422070313D+04 0.288163375854D+01 0.931322574615D-09 0.210000000000D+02
    0.212257280273D+05 0.144599342346D+01-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
 4 98  2 15  0 15  0.0 0.179599039257D-03 0.636646291241D-11 0.122400000000D+05
    0.562136621094D+04-0.289074897766D+00-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
   -0.236819248047D+05 0.102263259888D+01 0.931322574615D-09 0.120000000000D+02
    0.762532910156D+04 0.339257907867D+01 0.000000000000D+00 0.300000000000D+01
11 98  2 15  0 15  0.0-0.559806686376D-04-0.272848410532D-11 0.108600000000D+05
   -0.350348437500D+04-0.255325126648D+01 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
    0.106803754883D+05-0.182923507690D+01 0.000000000000D+00 0.400000000000D+01
    0.228762856445D+05 0.447064399719D+00-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
12 98  2 15  0 15  0.0 0.199414789677D-04-0.181898940355D-11 0.108900000000D+05
    0.131731816406D+05-0.143945598602D+01 0.372529029846D-08 0.000000000000D+00
    0.171148715820D+05-0.118937969208D+01 0.931322574615D-09 0.220000000000D+02
    0.135737919922D+05 0.288976097107D+01-0.931322574615D-09 0.300000000000D+01

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

TABLE A13

GLONASS OBSERVATION FILE - EXAMPLE

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2              OBSERVATION DATA    R (GLONASS)         RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXO V1.1       AIUB                27-AUG-93 07:23     PGM / RUN BY / DATE
TST1                                                        MARKER NAME
VIEWEG              BRAUNSCHWEIG                            OBSERVER / AGENCY
100                 XX-RECEIVER         1.0                 REC # / TYPE / VERS
101                 XX-ANTENNA                              ANT # / TYPE
  3844808.114    715426.767   5021804.854                  APPROX POSITION XYZ
        1.2340         .0000         .0000                  ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     2    C1    L1                                         # / TYPES OF OBSERV
    10                                                      INTERVAL
  1993     8    23    14    24   40.049000      GLO         TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER

 93  8 23 14 24 40.0490000  0  3  2R01R21
  23986839.824       20520.565 5
  23707804.625       19937.231 5
  23834065.096       -9334.581 5
 93  8 23 14 24 50.0490000  0  3  2R01R21
  23992341.033       49856.525 5
  23713141.002       48479.290 5
  23831189.435      -24821.796 5
 93  8 23 14 25   .0490000  0  3  2R01R21
  23997824.854       79217.202 5
  23718494.110       77092.992 5
  23828329.946      -40219.918 5
 93  8 23 14 25 10.0490000  0  5  2R05R17R01R21
  24003328.910      108602.422 5
  24933965.449      -19202.780 5
  22203326.578       -2987.327 5
  23723851.686      105777.849 5
  23825485.526      -55529.205 5
 93  8 23 14 25 20.0490010  0  5  2R05R17R01R21
```

```
 24008828.023       138012.178 5
 24927995.616       -51188.500 5
 22202547.907        -7213.298 5
 23729236.758       134533.636 5
 23822662.277       -70749.590 5
93  8 23 14 25 30.0490000  0  5  2R05R17R01R21
 24014330.779       167446.477 5
 24922041.288       -83151.666 5
 22201767.457       -11388.909 5
 23734633.024       163360.131 5
 23819848.894       -85881.102 5

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

TABLE A14

MIXED GPS/GLONASS OBSERVATION FILE - EXAMPLE

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2              OBSERVATION DATA    M (MIXED)           RINEX VERSION / TYPE
YYRINEXO V2.8.1 VM  AIUB                19-FEB-97 13:59     PGM / RUN BY / DATE
TST2                                                        MARKER NAME
001-02-A                                                    MARKER NUMBER
JIM                 Y-COMPANY                               OBSERVER / AGENCY
1                   YY-RECEIVER         2.0.1               REC # / TYPE / VERS
1                   GEODETIC L1                             ANT # / TYPE
  3851178.1849   -80151.4072  5066671.1013                  APPROX POSITION XYZ
        1.2340        0.0000        0.0000                  ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     0                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     2    C1    L1                                         # / TYPES OF OBSERV
    10                                                      INTERVAL
    11                                                      LEAP SECONDS
  1997     2     6    11    53    0.000000      GPS         TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER
 97  2  6 11 53  0.0000000  0 14G23G07G02G05G26G09G21R20R19R12R02R11
                               R10R03
  22576523.586   -11256947.60212
  22360162.704   -16225110.75413
  24484865.974    14662682.882 2
  21950524.331   -13784707.24912
  22507304.252     9846064.848 2
  20148742.213   -20988953.712 4
  22800149.591   -16650822.70012
  19811403.273   -25116169.741 3
  23046997.513    -3264701.688 2
  22778170.622  -821857836.745 1
  22221283.991  -988088156.884 2
  19300913.475   -83282658.19013
  20309075.579  -672668843.84713
  23397403.484  -285457101.34211
 97  2  6 11 53 10.0000000  0 14G23G07G02G05G26G09G21R20R19R12R02R11
                               R10R03
  22578985.016   -11244012.910 2
  22359738.890   -16227337.841 2
  24490324.818    14691368.710 2
  21944376.706   -13817012.849 2
  22512598.731     9873887.580 2
  20147322.111   -20996416.338 4
  22798942.949   -16657163.594 2
  19812513.509   -25110234.795 3
  23053885.702    -3227854.397 2
  22770607.029  -821898566.774 1
  22222967.297  -988079145.989 2
  19297913.736   -83298710.38413
  20313087.618  -672647337.04113
  23392352.454  -285484291.40311
```

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

A.2 - PRINCIPAIS PARÂMETROS FORNECIDOS NO FORMATO SP3

Uma discussão do formato orbital SP3 para os satélites GPS, baseda em Spofford e Remondi (1997), será apresentada a seguir. Este formato é composto pelos registros de posição e do relógio, apresentando um segundo formato (opcional) que contém os registros de velocidade e taxa-de-variação do relógio. O tempo é referenciado em hora GPS, mesmo quando apresentados em dia Gregoriano ou dia Juliano Modificado. A informação para a conversão da hora GPS em hora universal coordenada não é fornecida no formato SP3.

```
SP3 Linha Um

Coluna  1-2        Símbolo Versão    #a
Coluna  3          Flag Pos ou Vel   P ou V
Colunas 4-7        Ano de Início     1994
Colunas 9-10       Mês de Início     12
Colunas 12-13      Dia do Mês Ini.   17
Colunas 15-16      Hora de Início    _0
Colunas 18-19      Min. de Início    _0
Colunas 21-31      Seg. De Início    _0.00000000
Colunas 33-39      Número de épocas  _____96
Colunas 41-45      Dado Utilizado    ____d
Colunas 47-51      Sist. Coord.      ITR92
Colunas 53-55      Tipo de Órbita    FIT
Colunas 57-60      Agencia           _NGS


SP3 Linha Dois

Colunas 4-7        Semana GPS        _779
Colunas 9-23       Segs. da Semana   518400.00000000
Colunas 25-38      Interv. da época  __900.00000000
Colunas 40-44      Ini.Dia Jul.Mod.  49703
Colunas 46-60      Dia Fracional     0.0000000000000


SP3 Linha Três

Colunas 5-6        Num. de Sats.     25
Colunas 10-12      Sat #1 Id         __1
Coluna  13-15      Sat #2 Id         __2
       *
       *
       *
Colunas 58-60      Sat #17 Id        _22
```

```
SP3 Linha Quatro

Colunas 10-12       Sat #18 Id       _23
Colunas 13-15       Sat #19 Id       _24
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #34 Id       __0


SP3 Linha Cinco

Colunas 10-12       Sat #35 Id       __0
Colunas 13-15       Sat #36 Id       __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #51 Id       __0


SP3 Linha Seis

Colunas 10-12       Sat #52 Id       __0
Colunas 13-15       Sat #53 Id       __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #68 Id       __0


SP3 Linha Sete

Colunas 10-12       Sat #69 Id       __0
Colunas 13-15       Sat #70 Id       __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #85 Id       __0


SP3 Linha Oito

Colunas 10-12       Sat #1 Precisão  __7
Colunas 13-15       Sat #2 Precisão  __6
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #17 Precisão __5


SP3 Linha Nove

Colunas 10-12       Sat #18 Precisão __5
Colunas 13-15       Sat #19 Precisão __5
       *
```

```
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #34 Precisão __0


SP3 Linha Dez

Colunas 10-12       Sat #35 Precisão __0
Colunas 13-15       Sat #36 Precisão __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #51 Precisão __0


SP3 Linha Onze

Colunas 10-12       Sat #52 Precisão __0
Colunas 13-15       Sat #53 Precisão __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #68 Precisão __0


SP3 Linha Doze

Colunas 10-12       Sat #69 Precisão __0
Colunas 13-15       Sat #70 Precisão __0
       *
       *
       *
Colunas 58-60       Sat #85 Precisão __0


SP3 Linha Vinte e Três (Época do Registro do Cabeçalho)

Colunas 4-7         Ano de Início     1994
Colunas 9-10        Mês de Início     12
Colunas 12-13       Dia do Mês Ini.   17
Colunas 15-16       Hora de Início    _0
Colunas 18-19       Minuto de Início  _0
Colunas 21-31       Seg. de Início    _0.00000000


SP3 Linha Vinte e Quatro (Registro da Posição e do relógio)
(Vide exemplo 1)

Coluna 1            Símbolo           P
Colunas 2-4         Id. Veículo       __1
Colunas 5-18        x-coordenada(km)  __16258.524750
Colunas 19-32       y-coordenada(km)  __-3529.015750
Colunas 33-46       z-coordenada(km)  _-20611.427050
Colunas 47-60       relógio(μseg)     ____-62.540600
     *
     *
```

```
     *

     SP3 Linha Vinte e Cinco
     (Vide exemplo 2)

     Coluna 1            Símbolo          V
     Colunas 2-4         Id. Veículo      __1
     Colunas 5-18        x-velocid.(dm/s) __16258.524750
     Colunas 19-32       y-velocid.(dm/s) __-3529.015750
     Colunas 33-46       z-velocid.(dm/s) _-20611.427050
     Colunas 47-60       taxa var. rel.   ____-62.540600
          *
          *
          *


     SP3 Linha 22+NUMEPS*(NUMSATS+1)+1 (i.e., Última Linha)

     Colunas 1-3         Símbolos         EOF
```

!Discussão do Formato SP3

Linha 1: o caractere dois identifica a versão do formato. A primeira versão publicada tem sido designada como versão 'a'. As versões subsequentes utilizarão letras minúsculas em ordem alfabética. A primeira linha contém a hora e dia Gregoriano da primeira época da órbita, o número de épocas no arquivo de efemérides (até 10 milhões), o descritor de dados utilizado, o descritor do tipo de órbita e o descritor da agência. A seguinte convenção para o descritor de dados é utilizada:

```
u   -- fase da portadora não-diferenciada
du  -- variação em u com o tempo
s   -- 2-receptor/1-satelite (fase da portadora)
ds  -- variação em s com o tempo
d   -- 2-receptor/2-satelite (fase da portadora)
dd  -- variação em d com o tempo
U   -- fase do código não-diferenciado
dU  -- variação em U com o tempo
S   -- 2-receptor/1-satelite (fase do código)
dS  -- variação em S com o tempo
D   -- 2-receptor/2-satelite (fase do código)
dD  -- variação em D com o tempo
 +  -- separador de tipo
```

O tipo de órbita é descrito por um descritor de três caracteres: FIT ("fitted" ou ajustado), EXT (extrapolado) e BCD (transmitido). O descritor da agência permite quatro caracteres (exemplo: _NGS).

Linha 2: contém a semana GPS (excederá 1000, no ano de 1999), os segundos da semana GPS transcorridos desde o início da órbita (0.0 <= segundos da semana < 604800.0), o intervalo da época (0.0 < intervalo < 100000.0) em segundos, o início do Dia Juliano Modificado (onde 44244 representa a zero hora GPS, em 06/01/1980) e a parte fracional do dia (0.0 < fracional < 1.0) no início da órbita.

Linhas 3-7: indicam o número de satélites, seguido pelos respectivos números identificadores.

Linhas 8-12 contêm os exponentes de precisão da órbita. O valor 0 (zero) é interpretado como precisão desconhecida.

Linhas 13-18: permitem a modificação do arquivo SP3 ASCII, para uma possível inclusão de parâmetros adicionais.

Linhas 19-22: livres para comentários.

Linha 23: data e hora da época do cabeçalho.

Linha 24: linha da posição e do relógio, onde o primeiro caractere é 'P', indicando uma linha de posição. Os valores de posição estão em quilômetros e têm uma precsião da ordem de 1 mm. Os valores dos relógios estão em microsegundos e contêm uma precisão da ordem de 1 picosegundo. Valores de posição e relógio ruins ou ausentes são designados, respectivamente, por 0.000000 e 999999.9999__. Quando o modo "Flag" posição/velocidade é designado por 'V', na linha um, cada registro de posição para um determinado satélite é seguido por um registro de velocidade para o mesmo satélite. O primeiro caractere no registro de velocidade é um "V". As componentes da velocidade são dadas em decímetros/segundo e têm uma precisão de 10^{-4} mm/seg. A última coluna de um registro de velocidade é a taxa de variação da correção do relógio, dado em unidades de 10^{-4} microseg/seg. A precisão deste parâmetro é 10^{-16} seg/seg.

```
!Exemplo 1

#aP1994 12 17  0  0  0.00000000      96     d ITR92 FIT  NGS
##  779 518400.00000000   900.00000000 49703 0.0000000000000
+   25     1  2  4  5  6  7  9 12 14 15 16 17 18 19 20 21 22
+         23 24 25 26 27 28 29 31  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         7  6  5  5  5  5  5  5  5  6  5  5  5  5  6  5  5
++         5  5  6  5  5  5  5  5  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%f  0.0000000  0.000000000  0.00000000000  0.000000000000000
%f  0.0000000  0.000000000  0.00000000000  0.000000000000000
%i    0    0    0    0       0       0       0       0           0
%i    0    0    0    0       0       0       0       0           0
/* cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
*  1994 12 17  0  0  0.00000000
P  1  16258.524750  -3529.015750 -20611.427050    -62.540600
P  2 -21998.652100  -8922.093550 -12229.824050   -131.326200
```

```
P  4 -26019.547600   4809.810900  -2508.578200      3.544600
P  5   7014.950200  21130.960300 -14387.334650     79.692800
   *
   *
   *
P 28  13204.937750 -20485.533400  10794.787000     55.200800
P 29  -1638.431050 -24391.479200  10455.312650      3.690300
P 31   6265.255800 -25687.986950   -753.359000     70.830800
*  1994 12 17  0 15  0.00000000
P  1  15716.820135  -1169.850490 -21281.578766    -62.542746
P  2 -22813.261065  -9927.616864  -9816.490189   -131.328686
   *
   *
   *
P 28  13416.746195 -22186.753441   6248.864499     55.385492
P 29  -2745.269113 -22169.709690  14469.340453      3.718873
P 31   5629.986510 -25241.323751  -5659.769347     71.118497
*  1994 12 17 23 45  0.00000000
P  1  16708.907949  -5150.972262 -19904.291167    -62.727331
P  2 -21321.617042  -8048.187511 -13856.581227   -131.555527
P  4 -26107.382526   5010.736034   -422.963345      3.672587
P  5   7932.078481  21838.230749 -12767.671968     79.888744
   *
   *
   *
P 28  13308.321924 -21306.183480   8935.290694     55.387446
P 29  -2059.774801 -23532.083663  12229.852140      3.719337
P 31   6034.395625 -25605.621951  -2843.783172     71.121661
EOF!

!Exemplo 2

#aV1994 12 17  0  0  0.00000000      96     d ITR92 FIT  NGS
##  779 518400.00000000   900.00000000 49703 0.0000000000000
+   25     1  2  4  5  6  7  9 12 14 15 16 17 18 19 20 21 22
+         23 24 25 26 27 28 29 31  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
+          0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         7  6  5  5  5  5  5  5  5  6  5  5  5  5  6  5  5
++         5  5  6  5  5  5  5  5  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
++         0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%f  0.0000000  0.000000000  0.00000000000  0.000000000000000
%f  0.0000000  0.000000000  0.00000000000  0.000000000000000
%i    0    0    0    0      0      0      0      0          0
%i    0    0    0    0      0      0      0      0          0
/* ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
/* ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
*  1994 12 17  0  0  0.00000000
P  1  16258.524750  -3529.015750 -20611.427050    -62.540600
```

```
V  1  -6560.373522  25605.954994  -9460.427179     -0.024236
P  2 -21998.652100  -8922.093550 -12229.824050   -131.326200
V  2  -9852.750736 -12435.176313  25738.634180     -0.029422
P  4 -26019.547600   4809.810900  -2508.578200      3.544600
V  4   2559.038002  -3340.527442 -31621.490838      0.016744
   *
   *
   *
P 29  -1638.431050 -24391.479200  10455.312650      3.690300
V 29   5754.005457 -12065.761570 -27707.056273      0.003537
P 31   6265.255800 -25687.986950   -753.359000     70.830800
V 31   3053.344058    -63.091750  31910.454757      0.033749
*  1994 12 17  0 15  0.00000000
P  1  15716.820135  -1169.850490 -21281.578766    -62.542746
V  1  -5439.955846  26738.341429  -5409.793390     -0.023226
P  2 -22813.261065  -9927.616864  -9816.490189   -131.328686
V  2  -8178.974330  -9924.329320  27813.754308     -0.025238
   *
   *
   *
P 31   5629.986510 -25241.323751  -5659.769347     71.118497
V 31   5213.646243  -5585.922919  30831.379942      0.040199
*  1994 12 17 23 45  0.00000000
P  1  16708.907949  -5150.972262 -19904.291167    -62.727331
V  1  -7218.304166  24494.550676 -12283.334526     -0.023824
   *
   *
   *
P 31   6034.395625 -25605.621951  -2843.783172     71.121661
V 31   3831.346050  -2469.229615  31655.436179      0.028935
EOF!
```