

CAPÍTULO 4

OBTENÇÃO DE INFORMAÇÃO IONOSFÉRICA DO GPS

4.1 Introdução

A propagação das ondas eletromagnéticas pode realizar-se através de meios diferentes: pela atmosfera neutra ou troposfera, onde vai depender da pressão, temperatura e vapor de água; e pela ionosfera, onde vai depender do número de elétrons livres ao longo do caminho da onda.

É uma propriedade bem conhecida da ionosfera, que a estrutura e densidade de elétrons varia fortemente com o tempo, localização geográfica, atividade solar e distúrbios geomagnéticos. As variações do conteúdo de elétrons, considerando sua unidade (10^{16} elétrons/m² = 1TECU) podem ser da ordem de várias centenas.

A maior parte das informações adquiridas da ionosfera, foram obtidas por sensoriamento remoto com ondas de rádio. Foram usadas técnicas de frequência simples para medição de tempo de vôo, amplitude, fase, polarização, ângulos de recepção que incluem a reflexão. Desenvolveram-se também técnicas de varredura em frequência para determinar a estrutura vertical da ionosfera; transmissores e receptores móveis em satélites foram usados para pesquisar a estrutura horizontal da ionosfera.

Inicialmente a sondagem da ionosfera foi com propósito científico, mas a grande expansão de estações de trabalho foi durante a Segunda Guerra Mundial com a finalidade de prever condições de propagação das ondas de rádio. Em 1958 o número de estações era de 150, e foram estabelecidos procedimentos uniformes para interpretação, intercâmbio e uso de dados dos ionogramas.

A partir de 1976 radares pulsados faziam varredura de frequência, os quais foram chamados de Ionossondas. Estes operavam entre 0,1 a 30 MHz, a duração da varredura variava entre segundos a minutos, potências entre 1 a 10 KW e com resolução em altura até de 1 km.

Posteriormente aparecem outros equipamentos com maiores capacidades como: ionossondas digitais (*digisonde*, 1986), o sondador australiano *Ionospheric Prediction Service* (IPS-42 *sounder*) e o *chirp sounder* (Davies, 1990)

Embora as ionossondas modernas possam medir vários parâmetros e ser um instrumento ideal, estas apresentam as seguintes limitações:

- 1) Em distúrbios ionosféricos os ecos podem perder-se pela alta absorção da região D,
- 2) O traço da camada F_2 pode perder-se quando f_oF_2 cai a baixo da f_oF_1 e f_oE (Condição G),
- 3) Quando a máxima frequência de traçado excede a frequência mais alta do sondador,
- 4) Quando a frequência mais alta ou mais baixa do eco cai abaixo da frequência mínima do sondador,
- 5) O sondador não provê informação direta dos vales entre camadas e acima da máxima densidade de elétrons,
- 6) Em geral a operação é só intermitente e
- 7) É caro manter ligado um sondador para simples medições.

Depois de declarado a Capacidade Operacional Total (*Full Operational capability* – FOC) do sistema GPS a partir de 17 de Julho de 1995, este passou a ser uma ferramenta fundamental para o estudo da ionosfera. Com dois sinais L_1 e L_2 , viajando dos satélites a um receptor (localizado em qualquer lugar da Terra ou perto dela) é possível determinar o avanço de fase e o atraso do grupo, que são de igual magnitude mas de sinal contrário. Uma excelente aproximação de primeira ordem é: o erro ionosférico é proporcional à integração da densidade de elétrons ao longo do caminho (TEC) e inversamente

proporcional ao quadrado da frequência da portadora de fase. Posteriormente aparecem trabalhos que mapeam o conteúdo global de elétrons (Schaer et al, 1995; Komjathy, 1997, Fedrizzi, 1999) a partir dos sinais L_1 e L_2 de GPS.

Em maio de 1998, a IGS estabeleceu um grupo de estudo ionosférico para acompanhar e coordenar as atividades ionosféricas. Este grupo está constituído por representantes de cada centro de análise (AC), associação ionosférica de centros de validação, instituições da comunidade ionosférica, representante da comunidade de pesquisa ionosférica, centro coordenador de análise (ACC) e um representante da central de administração da IGS.

O grupo de estudo ionosférico da IGS começou a produzir regularmente mapas globais ionosféricos como um subproduto da determinação do TEC, e do *differential code biases* entre satélite-receptor. Para este propósito foi recomendado centralizar os trabalhos em dois produtos ionosféricos:

- Mapas ionosféricos Globais (*Global Ionosphere Maps*, GIM) a cada duas horas em forma de grade de duas dimensões (latitude e longitude) e
- Parâmetros diários de *Differential Code Biases* (DCBs) para satélites.

Desde 1 de Junho de 1998 a CODE, EMR, ESA e UPC (Universidade Politécnic de Catalunya, Barcelona-Espanha) enviam diariamente arquivos *IONospheric EXchange* (IONEX) format para a *Crustal Dynamics Data Information System*, (CDDIS) da NASA (USA). Três meses depois o JPL iniciou também o envio de arquivos IONEX para o CDDIS, os quais pode-se acessar facilmente pela Internet.

Para o trabalho usamos o formato IONEX do CODE, devido ao fácil acesso de informação e parâmetros da representação global do TEC, por parte do Dr. Schaer. Os formatos de outras instituições vão ser apresentados como parâmetros de comparação.

4.2 Técnicas de Modelagem Ionosférico Global

Os modelos ionosféricos podem ser divididos em dois grupos: modelos empíricos, baseados na coleção de dados sobre um longo período de tempo e os modelos teóricos construídos usando princípios físicos, aplicado às condições geofísicas.

4.2.1 Integrando a Densidade de Elétrons

O estado da ionosfera é descrito pela densidade de elétrons N_e em unidades por metro cúbico, mas para a propagação das ondas através da ionosfera é usada a densidade de elétrons integrada ao longo do caminho do raio (TEC), como a mais importante quantidade ionosférica. Usualmente é expressada em TEC *units* (TECU), onde 1 TECU corresponde a 10^{16} elétrons contidos em uma coluna vertical alinhada ao longo da linha de mira com uma seção de interseção de um metro quadrado. A linha de mira ou visada ou *slant* TEC E , é dado pela integral:

$$E = \int N_e(\rho) d\rho \quad (4.1)$$

onde $N_e(\rho)$ denota a densidade de elétrons ao longo do caminho. E pode ser dado em TECU. O termo TEC é usualmente usado para designar o TEC vertical (VTEC), isto é, o TEC projetado na vertical, o qual é menor que o *slant* TEC (TEC inclinado).

4.2.2 Modelo de Camada Única e Função de Mapeamento

Para um mapeamento do TEC absoluto usando uma base de dados GPS na Terra, o VTEC é o mais interessante, pois é uma medida independente da posição do satélite em relação ao receptor. O VTEC pode ser calculado a partir do TEC inclinado usando uma função de mapeamento dependente da elevação é:

$$F(z) = E(z) / E_v \quad \text{com } E_v = E(0) \quad (4.2)$$

onde z é o ângulo zenital e $F(z)$ descreve a relação entre o TEC inclinado $E(z)$ e o TEC vertical (E_v).

Ao referirmos ao resultado vertical do TEC para determinadas coordenadas solares geomagnéticas, nos baseamos no modelo chamado de camada única (*single-layer or thin shell*) e é usualmente adotado para a ionosfera (Figura 4.1). Neste modelo assume-se que todos os elétrons livres estão contidos em uma camada de espessura infinitesimal a uma altura H . A altura é idealizada entre 350, 400 ou 450 km, que corresponde ao baricentro do perfil da ionosfera, aproximadamente à máxima densidade de elétrons.

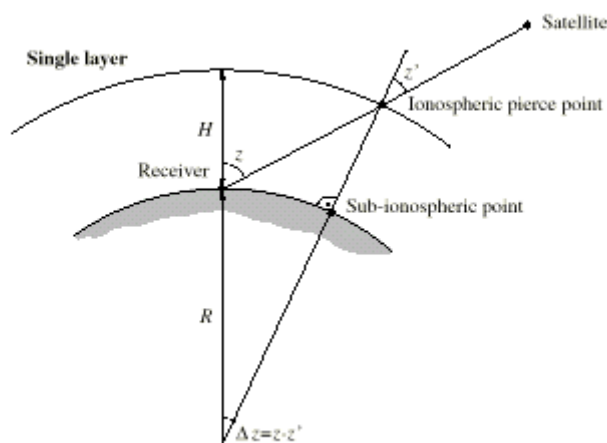


FIGURA 4.1 - Modelo ionosférico de camada única.

FONTE: Schaer (1998, p. 55).

Da Figura 4.1 pode-se concluir que:

$$\text{sen } z' = \frac{R}{R + H} \text{sen } z \quad (4.3)$$

Onde $R \approx 6371$ km é a média do raio terrestre e H é a altura da camada única.

4.3 Métodos de Parametrização Global do TEC

Existem vários métodos usados pelo grupo ionosférico do IGS, entre estes temos: JPL, ESA, EMR, UPC, UNB e CODE. A seguir vamos descrever brevemente o método desenvolvido pelo CODE usado para nosso trabalho.

4.3.1 Representação Global do TEC

A representação global de parâmetros TEC da Terra proposta por Schaer et al (1995) é uma expansão em harmônicos esféricos (Spherical Harmonic – SH):

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin\beta) [\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms)] \quad (4.4)$$

Onde:

β é a latitude geomagnética ou geográfica do ponto de interseção da linha de visada com a camada única.

$S = \lambda - \lambda_o$ é a longitude fixa do Sol no ponto ionosférico de penetração (*pierce point*)

λ é a longitude do ponto de penetração ionosférico.

λ_o é a longitude do Sol.

n_{\max} é o máximo grau da expansão em harmônicas esféricas.

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

N_{nm} é a função normalizada.

P_{nm} é a função clássica de Legendre não normalizada.

$\tilde{C}_{nm}, \tilde{S}_{nm}$ são coeficientes SH e parâmetros GIM proporcionados pelo CODE para cada duas horas.

A função normalizada N_{nm} pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{om})}{(n+m)!}} \quad (4.5)$$

Onde δ é o delta de Kronecker ($\delta = 1$ para $m=0$ ou $\delta = 0$ para $m \neq 0$).

Pode-se mostrar que a média do VTEC \bar{E}_v da distribuição global do TEC é geralmente representada pelo coeficiente SH de grau zero \tilde{C}_{00} :

$$\bar{E}_v = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} E_v(\beta,s) \cos\beta \, d\beta \, ds = N_{00} \tilde{C}_{00} \text{ com } N_{00} = 1 \quad (4.6)$$

Consequentemente é possível deduzir o número global de elétrons a partir do coeficiente \tilde{C}_{00} usando a seguinte relação:

$$\eta_e = 4\pi R'^2 \bar{E}_v \quad (4.7)$$

Onde $R' = R + H$ é o raio dado em metros. η_e é obtido em unidades de 10^{16} .

O número de parâmetros GIM \tilde{C}_{nm} e \tilde{S}_{nm} na expansão SH é dada pela expressão:

$$u_E = (n_{\max} + 1)^2 \quad (4.8)$$

Inicialmente o CODE trabalhou com grau 8, atualmente trabalha com grau 15, ou seja usa 256 coeficientes.

4.4 O Formato de Intercâmbio de Mapas Ionosféricos

O formato *IONosphere map EXchange Format* (IONEX), foi desenvolvido pelo grupo de trabalho ionosférico da IGS (Schaer et al, 1998), seguindo características similares ao formato RINEX, e permite o intercâmbio de mapas ionosféricos de duas ou três dimensões.

Cada arquivo IONEX consiste de uma seção de cabeçalho (*header section*) e uma seção de dados (*data section*). A seção de cabeçalho é colocada no início do arquivo e contém informação descritiva válida para todo o arquivo (Figura 4.2). Esta seção contém também etiquetas de cabeçalho nas colunas 61-80 de cada linha. A seção de dados contém a informação TEC atualizada como um mapa TEC gradeado, e geralmente os valores são dados em 0,1 TECU. Na Figura 4.3 se mostra só um trecho da seção de dados (um arquivo completo contém mais de 100 páginas).

O formato IONEX diário está formado por 12 medições feitas a cada duas horas, os mapas são dados num sistema de referência terrestre (Latitude e Longitude). Em adição ao TEC o *Root Mean Square* (RMS) do erro do mapa pode ser fornecido. Nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados 4 arquivos IONEX já processados como gráficos tridimensionais de superfície pertencentes a CODE, NRCAN, ESA e JPL para o dia 14 de fevereiro de 2002 a 01:00 UT.


```

1.0          IONOSPHERE MAPS      GPS          IONEX VERSION / TYPE
GIM V3.0     JPL - GNISD        18-feb-2002 07:12 PGM / RUN BY / DATE
JPL'S GLOBAL IONOSPHERE MAPS YEAR 2002 DAY 045 COMMENT
Global Ionospheric Maps (GIM) are generated on an hourly DESCRIPTION
and daily basis at JPL using data from up to 100 GPS sites DESCRIPTION
of the IGS and others institutions. DESCRIPTION
The vertical TEC is modeled in a solar-geomagnetic DESCRIPTION
reference frame using bi-cubic splines on a spherical grid. DESCRIPTION
A Kalman filter is used to solve simultaneously for DESCRIPTION
instrumental biases and VTEC on the grid (as stochastic DESCRIPTION
parameters). DESCRIPTION
Contact Address:  gpsono@cobra.jpl.nasa.gov . DESCRIPTION
2002 2 14 1 0 0 EPOCH OF FIRST MAP
2002 2 14 23 0 0 EPOCH OF LAST MAP
7200 INTERVAL
12 # OF MAPS IN FILE
NONE MAPPIN FUNCTION
10.0 ELEVATION CUTOFF
One-way carrier phase leveled to code OBSERVABLES USED
91 # OF STATIONS
28 # OF SATELLITES
6371.0 BASE RADIUS
2 MAP DIMENSION
450.0 450.0 .0 HGT1 / HGT2 / DHGT
87.5 -87.5 -2.5 LAT1 / LAT2 / DLAT
-180.0 180.0 5.0 LON1 / LON2 / DLON
-1 EXPONENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available COMMENT
DIFFERENTIAL CODE BIASES START OF AUX DATA
01 -1.418 0.011 PRN / BIAS / RMS
02 -2.400 0.011 PRN / BIAS / RMS
03 -0.541 0.011 PRN / BIAS / RMS
04 0.372 0.011 PRN / BIAS / RMS
05 -0.611 0.011 PRN / BIAS / RMS
06 -0.155 0.011 PRN / BIAS / RMS
07 -2.049 0.011 PRN / BIAS / RMS
08 -0.927 0.011 PRN / BIAS / RMS
09 -0.049 0.011 PRN / BIAS / RMS
10 -2.014 0.011 PRN / BIAS / RMS
11 4.196 0.011 PRN / BIAS / RMS
13 3.705 0.011 PRN / BIAS / RMS
14 2.968 0.011 PRN / BIAS / RMS
.
.
.
31 0.512 0.011 PRN / BIAS / RMS
DIFFERENTIAL CODE BIASES END OF AUX DATA
END OF HEADER

```

FIGURA 4.2 - Seção cabeçalho do formato IONEX processado pelo JPL.

FONTE: NASA(2002).

```

1
2002      2      14      1      0      0
87.5-180.0 180.0 5.0 450.0
245 245 244 243 243 242 241 239 238 236 235 233 231 229 228 226
224 222 220 218 216 215 213 212 210 209 208 208 207 207 207 207
207 207 208 209 209 210 212 213 214 215 217 218 220 221 223 224
226 227 228 230 231 233 234 235 236 238 239 240 241 242 242 243
244 244 245 245 245 245 245 245 245 245
85.0-180.0 180.0 5.0 450.0
266 266 266 265 264 263 261 259 257 254 250 247 243 239 235 230
226 221 217 213 209 205 202 199 196 194 192 191 190 189 189 190
190 192 193 195 197 199 201 204 206 209 212 214 217 219 222 224
.
.
.
-87.5-180.0 180.0 5.0 450.0
276 275 275 274 272 271 269 267 265 262 260 257 254 251 247 244
240 236 233 229 225 221 218 214 211 207 204 202 199 197 195 194
193 192 192 192 193 194 195 197 199 202 205 208 211 215 218 222
226 229 233 237 241 244 248 251 254 257 260 263 265 267 269 271
272 273 274 275 276 276 276 276 276
12
1
2002      2      14      1      0      0
87.5-180.0 180.0 5.0 450.0
LAT/LON1/LON2/DLON/H
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 8 8
85.0-180.0 180.0 5.0 450.0
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
7 7 7 7 7 7 7 6 6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 8 8 8
:
:
:
:
:
:

```

FIGURA 4.3 - Seção de dados do formato IONEX processado pelo CODE.

FONTE: NASA (2002).

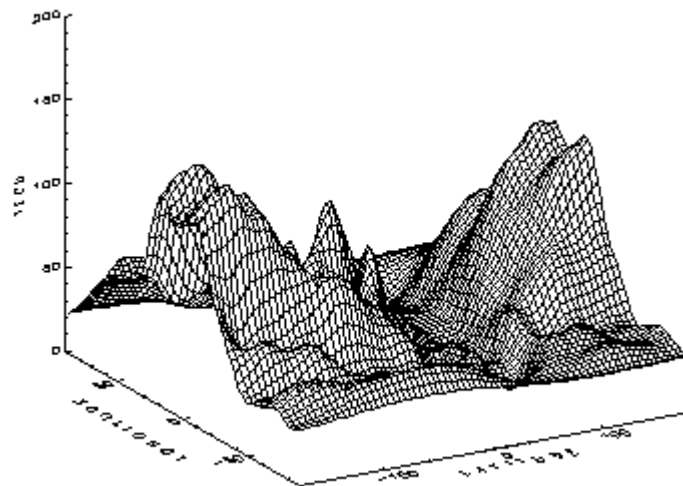


FIGURA 4.4 - Mapa TEC de dados CODE (01:00 UT do dia 14-02-2002).

FONTE: NASA (2002).

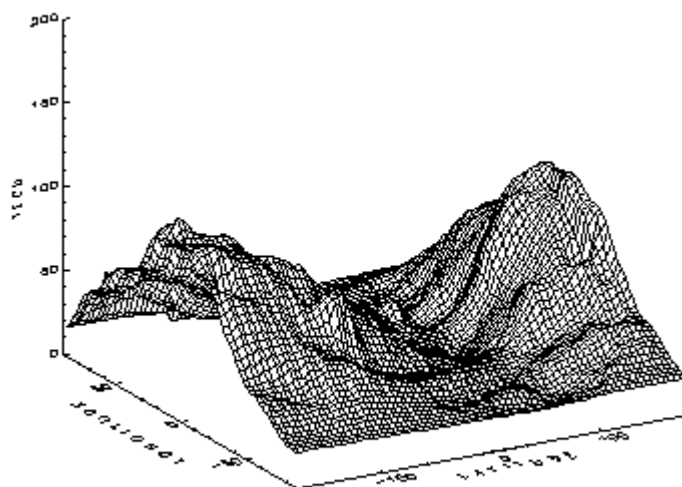


FIGURA 4.5 - Mapa TEC de dados NRCan (01:00 UT do dia 14-02-2002).

FONTE: NASA (2002).

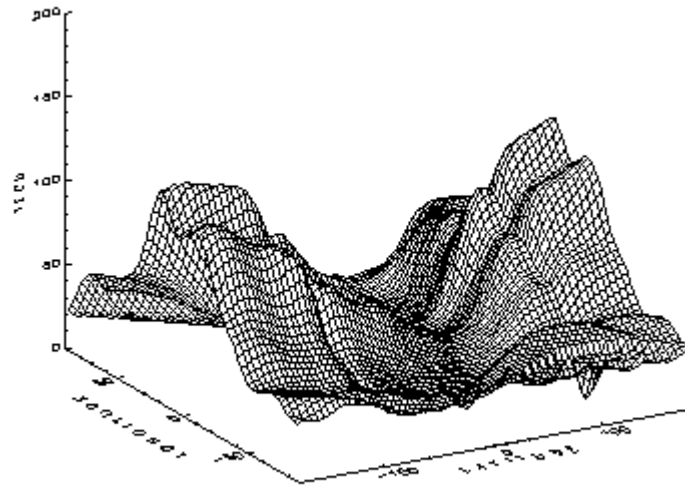


FIGURA 4.6 - Mapa TEC de dados ESA (01:00 UT do dia 14-02-2002).
 FONTE: NASA (2002).

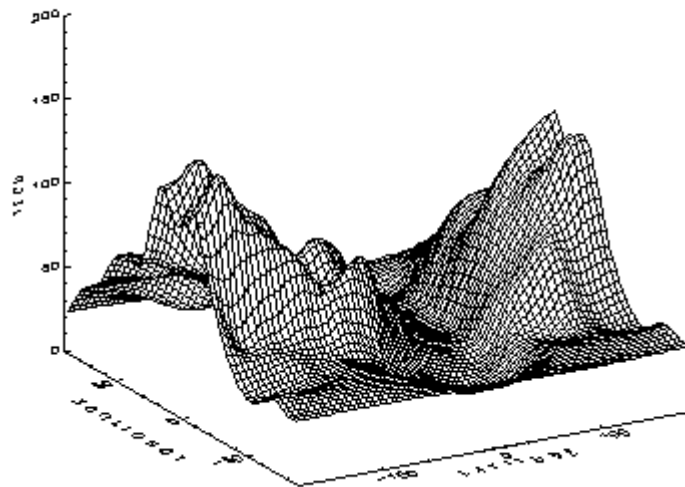


FIGURA 4.7 - Mapa TEC de dados JPL (01:00 UT do dia 14-02-2002).
 FONTE: NASA (2002).

4.4.1 Produtos Ionosféricos CODE

O CODE trabalha com três níveis diários de processamento. Em ordem cronológico temos:

- (1) rápido , o processo diário é iniciado via comando FTP, o qual é executado pouco depois de 00:00 UT, o computador vai baixar o arquivo RINEX de observação de três centros globais de dados do IGS.
- (2) final, este produto do CODE consiste de órbitas, ERPs, coordenadas de estações em formato SINEX, relógio de satélites, informação troposférica, mapas ionosféricos e DCBs de satélites em formato IONEX, são enviados semanalmente para o CDDIS e são processadas as informações de mais de 130 estações.
- (3) dados IGS Europeus processadas, em adição ao mapa ionosférico onde é derivada uma *ambiguity-fixed*.

O presente trabalho está baseado em dados CODE de tipo final, para o período compreendido entre o 14 de fevereiro ao 15 de março de 2002, mas para predições que precisem da informação dos últimos dias pode-se usar arquivos do tipo rápido. O programa desenvolvido é capaz de ler os três tipos do arquivos do CODE no formato IONEX e arquivos dos coeficientes, além de formatos IONEX de outras instituições.

