

EFEITOS DE SEGUNDA E TERCEIRA ORDEM DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO GNSS NO BRASIL

Haroldo Antonio Marques¹, João Francisco Galera Monico²,
Marcio Aquino³ e Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa¹

Recebido em 24 janeiro, 2008 / Aceito em 11 fevereiro, 2009
Received on January 24, 2008 / Accepted on February 11, 2009

ABSTRACT. The Global Positioning System (GPS) transmits signals in two frequencies which allow to correct for the first order ionospheric effects through the ionosphere free combination. However, the second and third order ionospheric effects which cause error of the order of centimeters in the GPS measurements, still remain. These effects are, generally, neglected in the GPS data processing. The first, second and third order ionospheric effects are directly proportional to the TEC (Total Electron Content) in the ionosphere, but, in the case of the second and third order effects the Earth magnetic field and the maximum electron density respectively, also make a contribution. This paper investigates these two higher order ionospheric effects which were taken into account in the GPS data processing in the Brazilian region. The mathematical model associated with these effects will be presented, as well as the transformations involving the Earth magnetic field and the use of the TEC from Global Ionospheric Maps or calculated from GPS pseudorange measurements. The GPS data was processed in static and kinematic relative mode and in a precise point positioning (PPP) approach. The second and third order effects were analyzed considering periods with low and high ionospheric activities. The results have shown that neglecting these effects in the precise point positioning and in the relative positioning for long baselines can cause variation of the order of few millimeters in the stations coordinates, besides diurnal variations in altitude of the order of centimeters.

Keywords: Geodesy, GPS positioning, second and third order ionospheric effects.

RESUMO. O Sistema de Posicionamento Global (GPS) transmite seus sinais em duas frequências, o que permite eliminar matematicamente os efeitos de primeira ordem da ionosfera através da combinação linear *ionosphere free*. Porém, restam os efeitos de segunda e terceira ordem, os quais podem provocar erros da ordem de centímetros nas medidas GPS. Esses efeitos, geralmente, são negligenciados no processamento dos dados GPS. Os efeitos ionosféricos de primeira, segunda e terceira ordem são diretamente proporcionais ao TEC presente na ionosfera, porém, no caso dos efeitos de segunda e terceira ordem, compõem também o campo magnético da Terra e a máxima densidade de elétrons, respectivamente. Nesse artigo, os efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera são investigados, sendo que foram levados em consideração no processamento de dados GPS na região brasileira para fins de posicionamento. Serão apresentados os modelos matemáticos associados a esses efeitos, as transformações envolvendo o campo magnético da Terra e a utilização do TEC advindo dos Mapas Globais da Ionosfera ou calculados a partir das observações GPS de pseudodistância. O processamento dos dados GPS foi realizado considerando o método relativo estático e cinemático e o posicionamento por ponto preciso (PPP). Os efeitos de segunda e terceira ordem foram analisados considerando períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Os resultados mostraram que a não consideração desses efeitos no posicionamento por ponto preciso e no posicionamento relativo para linhas de base longas pode introduzir variações da ordem de poucos milímetros nas coordenadas das estações, além de variações diurnas em altitude da ordem de centímetros.

Palavras-chave: Geodésia, posicionamento GPS, efeitos ionosféricos de segunda e terceira ordem.

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – PPGCC, Rua Roberto Simonsen, 305, Cx. Postal 957, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil. Tel.: (18) 3229-5388 – E-mails: haroldoh2@gmail.com; gpoleszuk@gmail.com

²Departamento de Cartografia, FCT/UNESP, Rua Roberto Simonsen, 305, Cx. Postal 957, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil. Tel.: (18) 3229-5388 – E-mail: galera@fct.unesp.br

³University of Nottingham, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy – IESSG, University Park Nottingham NG7 2RD, United Kingdom – E-mail: marcio.aquino@nottingham.ac.uk

INTRODUÇÃO

O uso de GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em especial o GPS (*Global Positioning System*), representa uma das tecnologias mais avançadas na área de geociências que surgiu recentemente para fins de posicionamento. Esse sistema tem sido muito utilizado, quer seja para fins de posicionamento ou para fins de pesquisas científicas. No último caso, pode-se citar: o monitoramento do vapor d'água atmosférico, do TEC (*Total Electron Content – Conteúdo Total de Elétrons*) presente na ionosfera, do movimento de placas tectônicas e das deformações da superfície terrestre, entre outras (Seeber, 2003; Monico, 2008).

Tanto o posicionamento quanto as pesquisas científicas demandam a determinação cada vez mais precisa das coordenadas das estações. Após a desativação da SA (*Selective Availability*), os efeitos da ionosfera passaram a ser um dos principais fatores que limitam a acurácia do posicionamento com receptores de simples frequência, além de prejudicar a resolução das ambigüidades no posicionamento relativo de linhas de base médias e longas (Matsuoka, 2007).

Quando se têm disponíveis receptores de dupla frequência é possível realizar a combinação linear *ionosphere free* a partir dos sinais L1 e L2, os quais experimentam diferentes atrasos ao passar através da ionosfera. Nesse caso, os efeitos de primeira (1ª) ordem da ionosfera são eliminados, porém, restam os de segunda (2ª) e terceira (3ª) ordem, os quais, geralmente, são negligenciados no processamento de dados GPS. Os efeitos de 2ª e 3ª ordem, além de serem proporcionais ao TEC, são também proporcionais ao campo magnético da Terra e a máxima densidade de elétrons.

Dessa forma, apresenta-se nesse artigo a análise dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, os quais foram levados em consideração no processamento de dados GPS na região brasileira. Foram investigados os modelos matemáticos associados a esses efeitos, as transformações envolvendo o campo magnético da Terra e análises relacionadas à utilização do TEC advindo dos Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Maps*) ou calculados a partir das observações GPS de pseudodistâncias.

As correções dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera foram aplicadas nos arquivos de dados no formato RINEX e os processamentos GPS foram realizados no modo relativo (estático e cinemático) e no posicionamento por ponto preciso (PPP) (Monico, 2000). Para a aplicação das correções ionosféricas nos dados GPS foi desenvolvido um aplicativo denominado "RINEX_HO", o qual é capaz de ler um arquivo RINEX, aplicar as correções nas medidas GPS e gerar um arquivo RINEX corrigido.

As análises dos efeitos de 2ª e 3ª ordem foram realizadas

considerando períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Os resultados do posicionamento foram analisados com base nas discrepâncias entre a solução obtida a partir dos dados corrigidos e a solução advinda dos dados sem as correções.

EFEITOS IONOSFÉRICOS DE 1ª, 2ª E 3ª ORDEM

O desenvolvimento das equações para incluir os efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera nas observáveis GNSS, bem como outras discussões sobre o assunto, pode ser encontrado em Bassiri & Hajj (1993); Odijk (2002); Kedar et al. (2003); Hernández-Pajares et al. (2005); Kim & Tinin (2006); Hoque & Jakowski (2006); dentre outros.

As equações das observáveis de fase (ϕ_{Li}) e de pseudo-distância (PD_{Li}) na banda Li ($i = 1, 2$) incorporadas com os efeitos da ionosfera podem ser escritas como:

$$\phi_{Li} = \rho' - I_{gLi}^{(1)} - \frac{1}{2} I_{gLi}^{(2)} - \frac{1}{3} I_{gLi}^{(3)} + N_{Li} + \nu_{\phi_{Li}} \quad (1)$$

$$PD_{Li} = \rho' + I_{gLi}^{(1)} + I_{gLi}^{(2)} + I_{gLi}^{(3)} + \nu_{PD_{Li}}$$

onde ρ' representa a distância geométrica satélite-receptor adicionada dos efeitos de troposfera, relógios e outros efeitos comuns as duas frequências. Os termos $I_{gLi}^{(1)}$, $I_{gLi}^{(2)}$ e $I_{gLi}^{(3)}$ representam os efeitos ionosféricos do grupo de 1ª, 2ª e 3ª ordem, respectivamente. A ambigüidade da fase é representada por N_{Li} e os termos $\nu_{\phi_{Li}}$ e $\nu_{PD_{Li}}$ representam os efeitos aleatórios e não modelados nas equações da fase e da pseudodistância, respectivamente.

A partir da Equação (1) nota-se que o efeito ionosférico de 1ª ordem da fase é igual ao do grupo, porém com sinais opostos. O mesmo ocorre para os efeitos de 2ª e 3ª ordem, porém, para a fase esses efeitos representam respectivamente, a metade e a terça parte dos efeitos do grupo (Odijk, 2002).

Os efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera na frequência f_{Li} ($i = 1, 2$) são dados por (Bassiri & Hajj, 1993; Odijk, 2002):

$$\begin{aligned} I_{gLi}^{(1)} &= \frac{A}{2f_{Li}^2} \int N_e d\rho \\ I_{gLi}^{(2)} &= \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \|B\| \cos \theta |N_e d\rho \\ I_{gLi}^{(3)} &= \frac{3A}{8f_{Li}^4} \int N_e^2 d\rho \end{aligned} \quad (2)$$

onde, $A = \frac{e^2}{4\pi m_e \epsilon_0}$, N_e é a densidade de elétrons livres em m^{-3} , $e = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ *Coulomb* para a carga do elétron, $m_e = 9,10939 \cdot 10^{-31}$ kg para a massa do elétron e $\epsilon_0 =$

8, $85419 \cdot 10^{-12}$ Farad/metro para a permissividade do espaço livre. O termo B representa o vetor de indução geomagnética.

Efeitos de 1ª ordem

No conjunto de Equações (2), pode ser visto que o atraso ionosférico de 1ª ordem é uma função do termo $\int N_e d\rho$, que representa o TEC ao longo da linha de visada entre o receptor e o satélite. Dessa forma, o atraso de 1ª ordem do grupo, com o auxílio de $A \approx 80,6 \text{ m}^3/\text{s}^2$, pode ser escrito como:

$$I_{GLi}^{(1)} = \frac{A}{2f_{Li}^2} TEC = \frac{40,3}{f_{Li}^2} TEC. \quad (3)$$

Efeitos de 2ª ordem

Com relação aos efeitos de 2ª ordem pode-se ver no conjunto de Equações (2) que para o caso do grupo tem-se:

$$I_{GLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \|B\| \cos \theta |N_e d\rho. \quad (4)$$

Usando uma representação de simples camada infinitesimal da ionosfera, pode-se assumir que o produto $\|B\| \cos \theta$ é uma constante ao longo do caminho do sinal e devido a isso, pode-se retirar essa constante da integral e lembrando que $\int N_e d\rho$ é o TEC, tem-se que o atraso ionosférico de 2ª ordem para o grupo é dado por (Odiijk, 2002):

$$I_{GLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \|B\| \cos \theta |TEC. \quad (5)$$

Para o cálculo do atraso de 2ª ordem da ionosfera é necessário calcular o produto $\|B\| \cos \theta$. Para este propósito é necessário identificar o produto interno do vetor B de indução geomagnética com o vetor unitário J na direção de propagação do sinal, na altura da camada ionosférica (Fig. 1):

$$\|B\| \cos \theta | = \|B\| \|J\| \cos \theta | = B^t J. \quad (6)$$

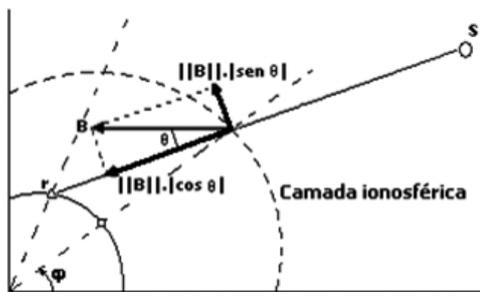


Figura 1 – Camada da ionosfera e vetor de indução geomagnética B. Fonte: adaptado de Odiijk (2002).

O produto interno $B^t J$ é obtido mais facilmente no sistema de referência geomagnético. Para isso, uma aproximação do campo geomagnético por um dipolo pode ser utilizada ou o campo magnético mais próximo do real, o qual é obtido a partir de uma expansão em harmônicos esféricos. Em geral, a aproximação por um dipolo apresenta uma acurácia em torno de 75% (Bassiri & Hajj, 1993).

Dessa forma, as coordenadas cartesianas do receptor no sistema geodésico (X, Y e Z) devem ser transformadas para coordenadas no sistema geomagnético (x_m, y_m e z_m). Depois de transformadas as coordenadas do receptor para o sistema geomagnético, o produto interno $B^t J$ é realizado no sistema local geomagnético (E_m, N_m e U_m) com origem no receptor (Fig. 2).

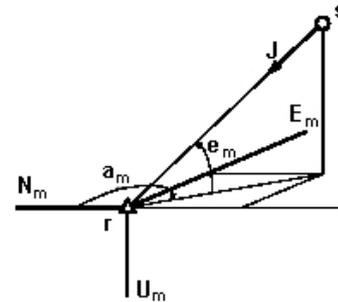


Figura 2 – Sistema local geomagnético com origem no receptor. Fonte: adaptado de Odiijk (2002).

Os componentes do vetor J no sistema local geomagnético são dados por:

$$J = \begin{bmatrix} -\text{sen}(z_m) \cos(a_m) \\ -\text{sen}(z_m) \text{sen}(a_m) \\ \cos(z_m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde, a_m e z_m representam, respectivamente, o azimute e o ângulo zenital geomagnético do satélite no sistema de referência local geomagnético. O ângulo zenital geomagnético (z_m) pode ser obtido a partir do ângulo de elevação geomagnético do satélite (e_m), o qual é calculado da mesma forma que o ângulo de elevação no sistema geodésico local (SGL).

O vetor de indução geomagnético B na altura da camada ionosférica (h_{ion}) representado no sistema local geomagnético é dado por (Giraud & Petit, 1978 *apud* Odiijk, 2002):

$$B = \begin{bmatrix} \cos(\varphi'_m) \\ 0 \\ 2 \text{sen}(\varphi'_m) \end{bmatrix} \left(\frac{R_e}{R_e + h_{ion}} \right)^3 B_{eq}, \quad (8)$$

onde, φ'_m é a latitude geomagnética do ponto ionosférico, R_e é o raio equatorial da Terra e B_{eq} é a magnitude da indução geomagnética no equador geomagnético.

Adotando uma altura para a camada ionosférica de $h_{ion} = 350$ km e a magnitude da indução geomagnética no equador de $B_{eq} = 3,12 \cdot 10^{-5}$ T (Tesla), a magnitude do vetor de indução geomagnética tem um valor mínimo de $2,6 \cdot 10^{-5}$ T e um máximo de $5,2 \cdot 10^{-5}$ T, para os pontos ionosféricos sobre o equador e sobre o pólo norte, respectivamente (Odijk, 2002).

Considerando que as coordenadas do sistema geomagnético devem ser rotacionadas para o sistema local geomagnético utilizando as coordenadas do receptor, o produto interno dos vetores (Eqs. (7) e (8)) pode ser calculado como uma função das posições do satélite e do receptor:

$$B^t J = |\cos(\varphi'_m) \sin(z_m) \cos(a_m) - 2 \sin(\varphi'_m) \cos(z_m)| \left(\frac{R_e}{R_e + h_{ion}}\right)^3 B_{eq} \cdot \quad (9)$$

Efeitos de 3ª ordem

O atraso ionosférico de 3ª ordem para o grupo apresentado no conjunto de Equações (2) é dado por:

$$I_{GLi}^{(3)} = \frac{3A}{8f_{Li}^4} \int N_e^2 d\rho \cdot \quad (10)$$

Devido ao termo quadrático na Equação (10), a integral é difícil de ser calculada. Porém, uma aproximação para essa integral é dada por (Hatmann & Leitinger, 1984 *apud* Odijk, 2002):

$$\int N_e^2 d\rho = \eta N_{e,max} TEC \cdot \quad (11)$$

Dessa forma, o atraso ionosférico de 3ª ordem é dado por:

$$I_{GLi}^{(3)} = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \eta N_{e,max} TEC \cdot \quad (12)$$

O cálculo do efeito de 3ª ordem da ionosfera é similar aos de 1ª e de 2ª ordens, considerando que é escrito em função do TEC. Porém, o efeito de 3ª ordem é uma função da densidade máxima de elétrons $N_{e,max}$ e um certo fator de forma η , cujo valor constante igual a 0,66 foi obtido por Hartmann & Leitinger (1984) *apud* Odijk (2002).

OBTENÇÃO DO TEC

O TEC na direção receptor-satélite pode ser calculado usando as medidas de pseudodistâncias GPS (Matsuoka & Camargo, 2004):

$$TEC = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} \times [PD_{L1} - PD_{L2} - c(DCB_r + DCB^s) + \varepsilon_{L1L2}], \quad (13)$$

onde, DCB_r e DCB^s (em unidades de segundos) são denominados de *Differential Code Bias* e representam as diferenças dos atrasos de *hardware* entre as duas frequências, que ocorrem respectivamente no receptor e no satélite. A velocidade da luz no vácuo é representada por c e ε_{L1L2} representa os efeitos não modelados e aleatórios das pseudodistâncias. Os outros termos já foram definidos anteriormente.

Considerando que seja conhecido o desvio-padrão da pseudodistância PD_{L1} ($\sigma_{PD_{L1}}$) e da PD_{L2} ($\sigma_{PD_{L2}}$), bem como dos DCBs para a estação (σ_{DCB_r}) e para o satélite (σ_{DCB^s}) (em unidades de metros), é possível por propagação de covariância obter uma estimativa da variância do TEC:

$$\sigma_{TEC}^2 = \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)}\right)^2 \times (\sigma_{PD_{L1}}^2 + \sigma_{PD_{L2}}^2 + \sigma_{DCB_r}^2 + \sigma_{DCB^s}^2) \cdot \quad (14)$$

O TEC também pode ser calculado a partir da medida GPS de pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora (Matsuoka & Camargo, 2004), o que proporciona valor mais preciso quando comparado com o TEC calculado usando somente a pseudodistância.

Uma alternativa para obtenção de valores do TEC é a partir de um Mapa Global da Ionosfera, os quais são disponibilizados via internet pela agência CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*). Atualmente, esses mapas contêm estimativas do TEC na direção vertical em um *grid* com dimensões de dois graus de latitude por cinco de longitude, com resolução temporal de duas horas. Além disso, os mapas também possuem uma estimativa diária para os valores dos DCBs dos satélites e de vários receptores que fazem parte da rede de estações ativas do IGS (*International GNSS Service*).

O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

O campo magnético da Terra pode ser comparado com uma barra magnética inclinada em relação ao eixo geográfico (norte-sul) de rotação da Terra (Fig. 3). Os pontos onde o eixo do campo magnético intercepta a superfície da Terra, no norte e no sul, são denominados de pólo norte e pólo sul geomagnéticos, respectivamente. O pólo sul geomagnético está localizado aproximadamente nas coordenadas geográficas 79°S e 110°L, enquanto que o pólo norte geomagnético se encontra a aproximadamente 79°N e 70°O (McNamara, 1991).

O equador geomagnético é semelhante ao equador geográfico como pode ser visto na Figura 3, porém, o eixo do geomagnético é inclinado de aproximadamente 11° (90°-79°) com relação ao

eixo do geográfico. As latitude e longitude geomagnéticas são medidas de forma semelhante às latitude e longitude geográficas, porém com referência ao equador e pólos geomagnéticos.

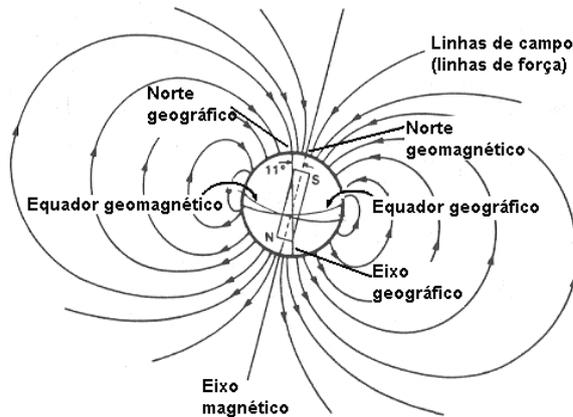


Figura 3 – Campo magnético da Terra. Fonte: adaptado de McNamara (1991).

Em uma primeira aproximação, a Terra é uma esfera uniformemente magnetizada na direção do eixo de um dipolo e, dessa forma, o campo geomagnético pode ser aproximado por um dipolo (Davies, 1990), o que é descrito na próxima subseção.

A aproximação por um dipolo

O efeito de vários processos externos que ocorrem na ionosfera é determinado, em uma grande parte, por processos de transporte de plasma, que são afetados pelo campo magnético intrínseco da Terra. Em altitudes ionosféricas, o campo magnético interno pode ser aproximado por um dipolo centrado na Terra (Schunk & Nagy, 2000).

O eixo do dipolo centrado na Terra corta a superfície terrestre em dois pontos (A e B) chamados de pólo sul (*austral*) e pólo norte (*boreal*) do dipolo, como mostrado na Figura 4. Os pontos A e B mudam devido a variações seculares do campo magnético da Terra (Davies, 1990).

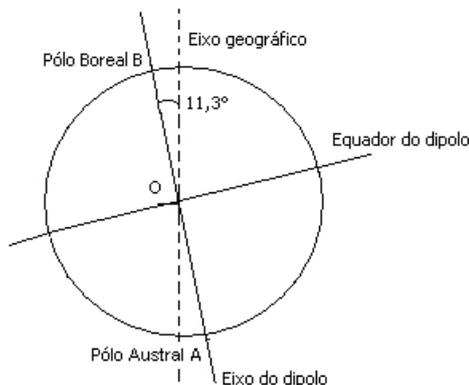


Figura 4 – Campo dipolo da Terra, com os polos norte (B), sul (A) e equador. Fonte: adaptado de Davies (1990).

O plano que passa pelo centro da Terra e corta perpendicularmente AB é o equador do dipolo. A latitude do dipolo Φ é contada com relação a esse equador e os semicírculos que passam por AB são os meridianos do dipolo. A relação entre as coordenadas (latitude e longitude) do dipolo (Φ, Λ) e as correspondentes coordenadas geográficas (ϕ, λ) em um ponto P é dada por Davies (1990):

$$\begin{aligned} \text{sen } \Phi &= \text{sen } \phi \text{ sen } \phi_0 + \text{cos } \phi \text{ cos } \phi_0 \text{ cos}(\lambda - \lambda_0) \\ \text{sen } \Lambda &= \frac{\text{cos } \phi \text{ sen}(\lambda - \lambda_0)}{\text{cos } \Phi}, \end{aligned} \tag{15}$$

onde, ϕ_0 e λ_0 são a latitude e a longitude geográfica do pólo norte do dipolo.

Uma expressão para a atualização das coordenadas (ϕ_0, λ_0) dos polos magnéticos do dipolo em função do MJD (*Modified Julian Date* – Data Juliana Modificada) é apresentada por Hapgood (1992):

$$\begin{aligned} \phi_0 &= 78,8 + 4,283 \cdot 10^{-2} \frac{MJD - 46066}{365,25} \\ \lambda_0 &= 289,1 - 1,413 \cdot 10^{-2} \frac{MJD - 46066}{365,25}. \end{aligned} \tag{16}$$

As coordenadas cartesianas (x_m, y_m e z_m) do sistema geomagnético aproximado por um dipolo, podem ser calculadas a partir das coordenadas cartesianas (X, Y e Z) do sistema geodésico geocêntrico, como visto esquematicamente na Figura 5.

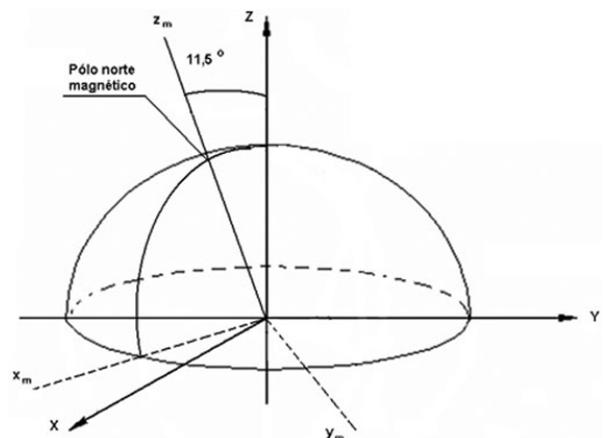


Figura 5 – Sistema geodésico e orientação do campo geomagnético (dipolo). Fonte: adaptado de Odijk (2002).

Considerando o sistema geomagnético interseccionando a Terra nas latitudes (ϕ_0, λ_0) para o pólo norte geomagnético, a

transformação das coordenadas cartesianas para o sistema geomagnético é obtida a partir de rotações entre os dois sistemas (Bassiri & Hajj, 1993; Odiij, 2002):

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (17)$$

onde,

$$R = \begin{bmatrix} \sin \varphi_0 \cos \lambda_0 & \sin \varphi_0 \sin \lambda_0 & -\cos \varphi_0 \\ -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix}.$$

Campo geomagnético considerado real

Uma representação mais acurada do campo magnético da Terra é obtida quando o potencial escalar magnético é expandido em séries de harmônicos esféricos, envolvendo um procedimento de ajuste dos coeficientes realizado em certos intervalos de tempo devido às mudanças intrínsecas do campo magnético (a variação secular). A responsabilidade dessa tarefa é do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) (Schunk & Nagy, 2000).

Desde o ano de 1945, o IGRF desenvolve um modelo para a representação do campo magnético da Terra, o qual é recomendado para trabalhos científicos pelo grupo IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). Outras informações podem ser encontradas em <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod>.

O modelo do IGRF consiste de um conjunto de coeficientes harmônicos esféricos globais, os quais são válidos para um período de 5 anos. Esses coeficientes são baseados em dados disponíveis a partir de fontes que incluem medidas do campo geomagnético, observações de satélites e outras. Atualmente, encontra-se disponível o modelo IGRF-10, o qual é válido até o ano de 2010. Outras informações relevantes sobre modelos do IGRF podem ser encontradas em <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.

Além dos coeficientes, está disponível via internet um conjunto de sub-rotinas que permitem calcular as componentes do campo geomagnético, além das transformações de coordenadas geodésicas para coordenadas geomagnéticas e vice-versa. Dentre os pacotes de sub-rotinas disponíveis pode-se citar o "GEO-PACK" (Tsyganenko, 2005). No caso desse trabalho, optou-se pela utilização do Modelo Geomagnético Corrigido (CGM – *Corrected Geomagnetic Model*), cujas sub-rotinas foram desenvolvidas em linguagem de programação Fortran pelo PIM (*Parameterized Ionospheric Model*) (PIM, 2001).

No modelo CGM foi gerada uma grade com coordenadas curvilíneas geomagnéticas obtidas a partir do modelo do IGRF. Dessa forma, é disponibilizada uma base de dados com coordenadas corrigidas, a partir da qual os aplicativos do PIM realizam a interpolação temporal e espacial para outras coordenadas dentro da grade.

MODELO IONOSFÉRICO PARA A DENSIDADE DE ELÉTRONS

Brunner & Gu (1991) desenvolveram um modelo ionosférico para representar a distribuição da densidade de elétrons na ionosfera. Esse modelo consiste de duas funções separadas do tipo Chapman para representar a parte inferior e a parte superior dos perfis da densidade de elétrons N_e . Os perfis de Chapman são muito utilizados para descrever a distribuição da densidade de elétrons $N_e(h)$ em função da altura h da ionosfera.

A distribuição $N_e(h)$ é expressa pela função de Chapman, como (Brunner & Gu, 1991):

$$N_e(h) = N_{e,\max} \exp [c_i(1 - z - e^{-z})], \quad (18)$$

$$z = \frac{h - h_m}{A_i}, \quad (19)$$

onde, $N_{e,\max}$ e h_m representam o pico da densidade de elétrons e a altura do pico, respectivamente. Acima da altura do pico $A_i = A_{up}$ e $c_i = c_{up}$, enquanto que abaixo do pico, $A_i = A_{10}$ e $c_i = c_{10}$. Os valores dos seis parâmetros $N_{e,\max}$, h_m , A_{up} , c_{up} , A_{10} e c_{10} foram calculados por Anderson et al. (1987) *apud* Brunner & Gu (1991). Alguns valores desses parâmetros foram selecionados por Brunner & Gu (1991) de forma a se adequarem a um grande número de situações:

$$h_m = 417 \text{ km};$$

$$A_{up} = 45 \text{ km};$$

$$A_{10} = 101 \text{ km};$$

$$c_{up} = 0,402;$$

$$c_{10} = 1,863.$$

A partir dos parâmetros descritos anteriormente dois valores diferentes para $N_{e,\max}$ foram selecionados (Brunner & Gu, 1991):

$$\text{Caso 1: } N_{e,\max} = 6, 0.10^{12} \text{ m}^{-3}, \\ \text{TEC} = 1, 38.10^{18} \text{ el/m}^2$$

$$\text{Caso 2: } N_{e,\max} = 20, 0.10^{12} \text{ m}^{-3}, \\ \text{TEC} = 4, 55.10^{18} \text{ el/m}^2$$

O caso 1 é típico para valores $N_{e,max}$ elevados e frequentemente observados, enquanto que o caso 2 corresponde às condições máximas do ciclo solar. A Figura 6 apresenta os perfis da densidade de elétrons em função da altura para os dois casos.

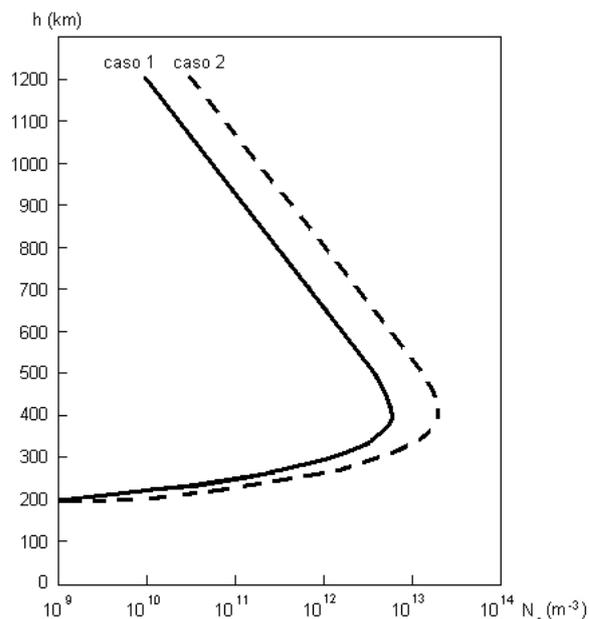


Figura 6 – Densidade de elétrons $N_e(h)$ em função da altura. Fonte: adaptado de Brunner & Gu (1991).

Com base nos coeficientes dos casos 1 e 2, Fritsche et al. (2005) apresentam uma interpolação linear para $N_{e,max}$ em função do TEC, a qual é dada por:

$$N_{e,max}(m^{-3}) = \frac{(20, 0 - 6, 0) \cdot 10^{12}}{(4, 55 - 1, 38) \cdot 10^{18}} TEC. \quad (20)$$

RESULTADOS

Para a consideração dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, foi desenvolvido um aplicativo, denominado "Rinex_HO", o qual permite aplicar as correções no arquivo de dados GPS no formato RINEX e gerar um novo arquivo RINEX corrigido desses efeitos. Nesse caso, foram utilizadas classes desenvolvidas em linguagens de programação C++ e disponibilizadas pelo NOAA (*National Geodetic Survey*), as quais podem ser encontradas em <http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/rinex.htm>. Essas classes permitem fazer a leitura de arquivos RINEX e salvar um novo arquivo. Foram então desenvolvidas outras classes em C++ que permitem calcular o TEC a partir da pseudodistância, interpolar o TEC a partir do GIM, calcular os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, aplicar nos dados GPS e posteriormente armazenar os dados corrigidos em um novo arquivo RINEX. Além disso, foram utilizadas em formas de DLLs (*Dynamic Link Libraries*), as sub-rotinas

em Fortran disponibilizadas pelo PIM, as quais permitem aplicar o Modelo Geomagnético Corrigido na transformação de coordenadas curvilíneas geocêntricas para o sistema geomagnético.

Incerteza dos efeitos ionosféricos de 2ª ordem em função do TEC

Com o objetivo de estimar o quanto a incerteza na determinação do TEC influencia no cálculo dos efeitos de 2ª ordem da ionosfera, foram obtidos os valores dos DCBs dos satélites GPS e de alguns receptores da rede IGS, os quais foram escolhidos aleatoriamente. A Figura 7 apresenta os valores (em metros) dos DCBs (P1-P2) das estações durante os dias 69 a 364 de 2002, considerando que esse foi um ano de alta do ciclo solar.

A partir da Figura 7, verifica-se que os valores dos DCBs dos receptores sofrem poucas variações durante o período considerado.

A Figura 8 mostra o desvio-padrão (DP) dos DCBs em TECU para cada estação. O DP nesse caso foi calculado considerando os dados de todo o período envolvendo o ano de 2002. A conversão de unidades de metros para TECU foi realizada com o auxílio da Equação (3).

Os valores máximos dos desvios-padrão dos DCBs referem-se às estações FORT e LPGS e numa média geral os valores dos desvios-padrão foram de 2,071 e 1,258 TECU para as frequências L1 e L2, respectivamente, o que corresponde a 0,336 m.

Da mesma forma que para os receptores, foram obtidos os DCBs dos satélites durante o mesmo período do ano de 2002. A Figura 9 apresenta esses valores para alguns satélites escolhidos aleatoriamente.

O DP dos DCBs de cada satélite GPS é apresentado na Figura 10. No caso, o cálculo do DP também foi efetuado considerando os dados de todo o período envolvendo o ano de 2002.

Utilizando a média geral dos desvios-padrão dos DCBs de todas as estações, 0,336 m, e o desvio-padrão dos DCBs para cada satélite, foi realizada a propagação desses efeitos no cálculo do TEC a partir da pseudodistância usando a Equação (14). Para tanto, além desses valores, adotou-se o desvio-padrão de 0,60 m e 0,80 m para as observações de pseudodistâncias advindas dos códigos P1 e P2, respectivamente. Dessa forma, a Figura 11 mostra o desvio-padrão do TEC (calculado a partir da pseudodistância) para cada satélite.

A média dos desvios-padrão do TEC para os satélites (Fig. 11) é de 10,053 TECU. Então, considerando o DP do TEC para cada satélite foi realizada a propagação para os efeitos de 2ª ordem a partir da Equação (5). Para a obtenção da equação de propagação considerou-se a componente relacionada ao campo geomagnético como constante.

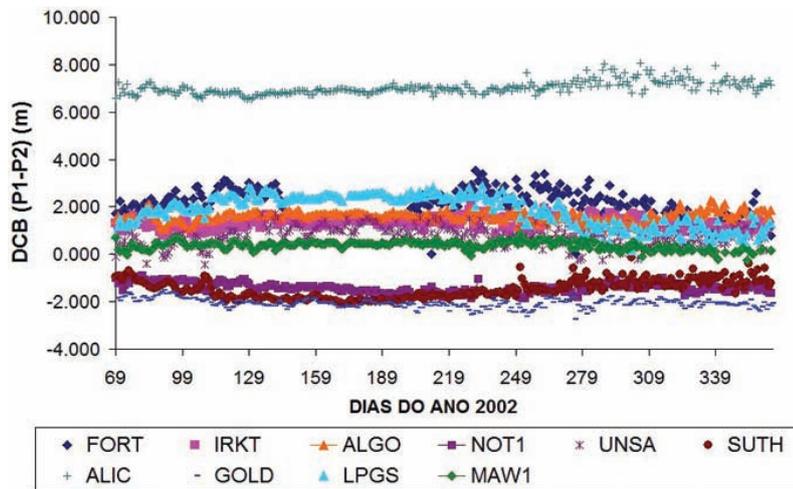


Figura 7 – DCBs para 10 estações IGS no ano de 2002.

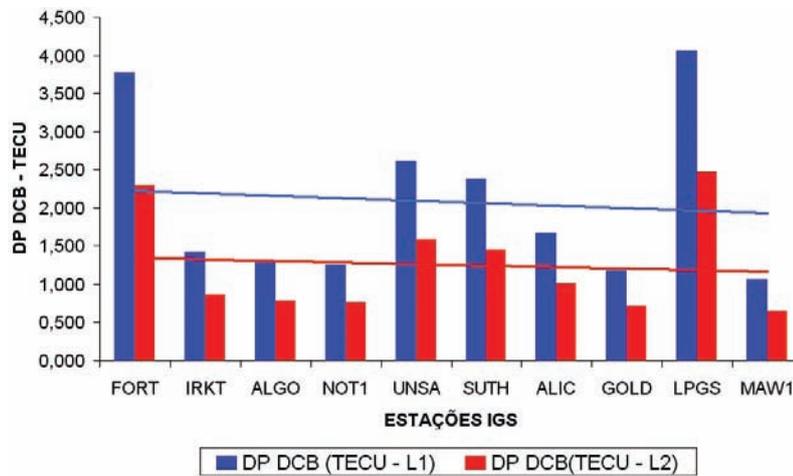


Figura 8 – Desvio-padrão para os DCBs de algumas estações IGS no ano de 2002.

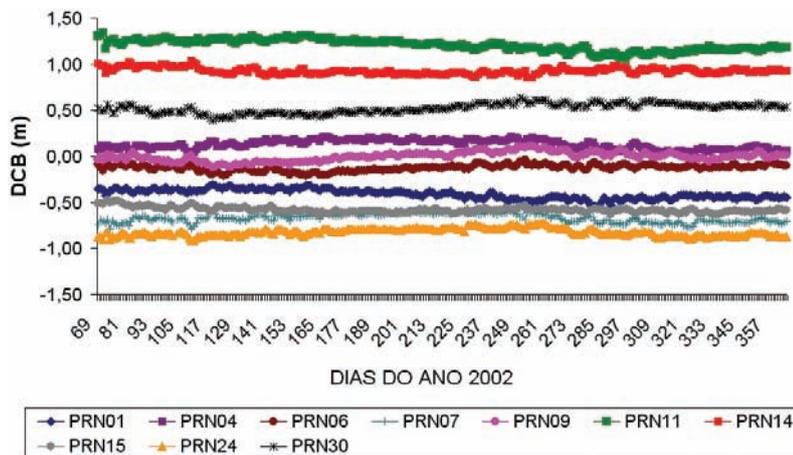


Figura 9 – DCBs para os satélites GPS no ano de 2002.

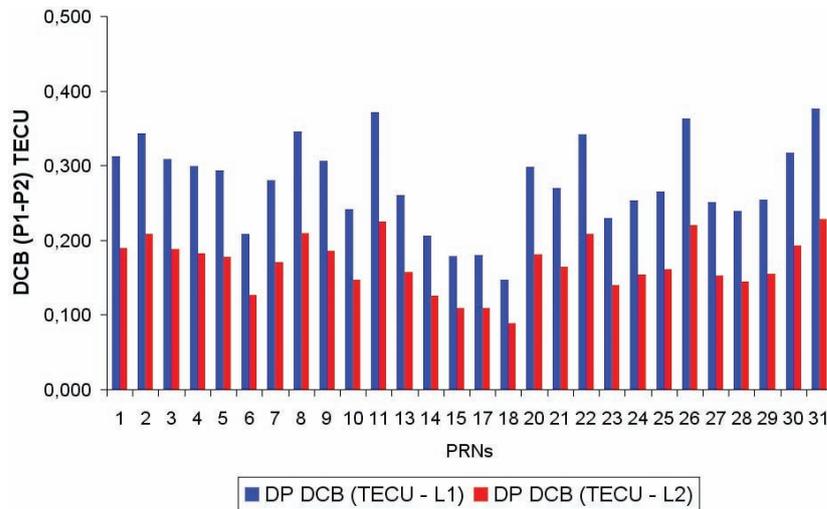


Figura 10 – Desvio-padrão para os DCBs de cada satélite GPS no ano de 2002.

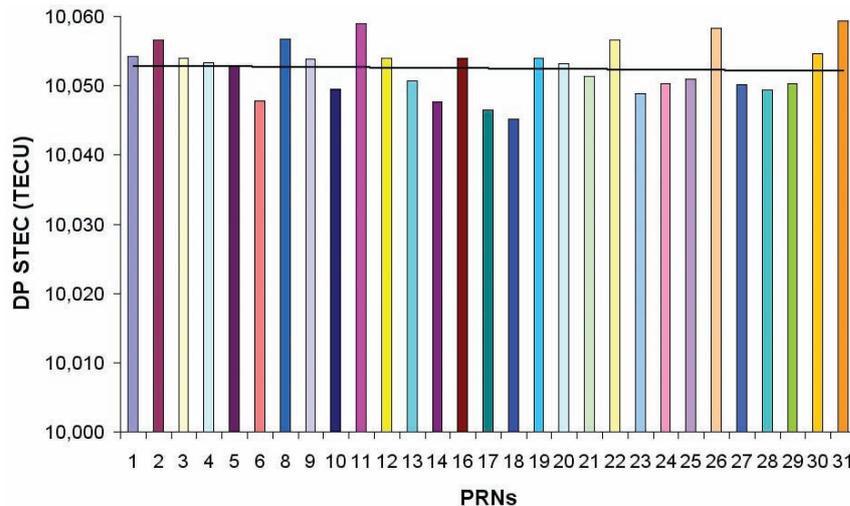


Figura 11 – Desvio-padrão do TEC propagado para cada satélite GPS.

A Figura 12 apresenta a precisão (DP) com que se calculam os efeitos de 2ª ordem nas frequências em L1 e L2 para o satélite PRN 31 em função da precisão (DP) de determinação do TEC. O PRN 31 apresenta um DP do TEC próximo da média geral e, portanto, pode ser considerado representativo do conjunto de satélites.

A partir da Figura 12, verifica-se que para o ângulo de elevação próximo de zero (pior caso), o desvio-padrão do efeito de 2ª ordem da ionosfera, propagado em função do desvio-padrão do TEC, atinge os valores próximos de 1 mm e 2 mm para as frequências em L1 e L2, respectivamente. Dessa forma, pode-se concluir que os efeitos de segunda ordem da ionosfera podem ser calculados utilizando valores de TEC advindos do cálculo com a pseudodistância.

Uma outra possibilidade seria a utilização do TEC advindo do GIM, o qual fornece os valores de TEC com uma incerteza em torno de 8 TECU (Ciraolo et al., 2007), ou seja, melhor do que a incerteza quando se usam as observações GPS de pseudo-distância (ver Fig. 12). Dessa forma, verifica-se que para a obtenção dos efeitos de 2ª ordem da ionosfera também é possível utilizar os dados advindos do GIM.

Transformação aproximada pelo dipolo *versus* CGM

A transformação das coordenadas terrestres geocêntricas para coordenadas geomagnéticas pode ser realizada a partir da aproximação do campo geomagnético por um dipolo ou a partir do campo geomagnético considerado real. Para o último caso,

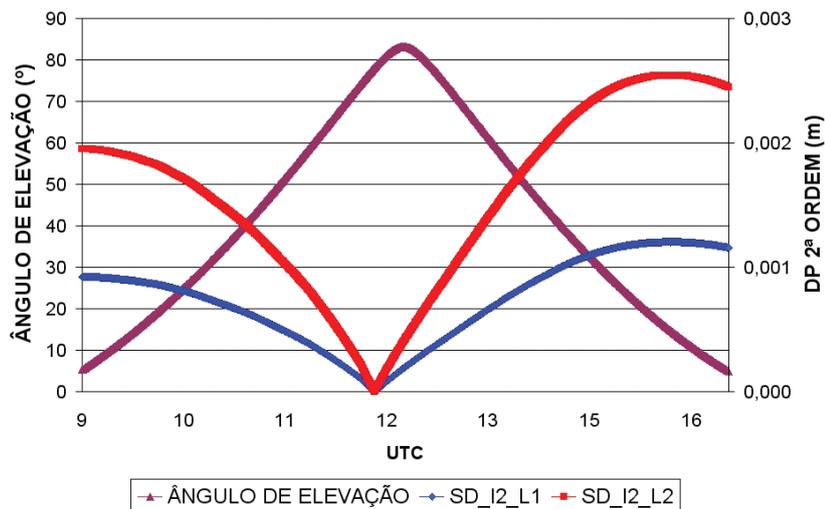


Figura 12 – Desvio-padrão do efeito de 2ª ordem para o satélite PRN 31.

optou-se por utilizar nesse trabalho o modelo geomagnético corrigido, CGM, o qual é baseado nos modelos do IGRF e desenvolvido pelo PIM (PIM, 2001).

A Figura 13 apresenta as latitudes geomagnéticas corrigidas, calculadas a partir das sub-rotinas CGM do PIM e as latitudes dipolares.

A Figura 13 mostra que ocorrem grandes diferenças nas latitudes geomagnéticas dipolares com relação às latitudes CGM, principalmente nas regiões equatoriais e tropicais. A Figura 14 mostra as isolinhas de discrepâncias entre as duas latitudes geomagnéticas, as quais foram calculadas em função das coordenadas geodésicas.

A partir da Figura 14, verifica-se que as discrepâncias nas latitudes geomagnéticas atingem até 18 graus nas regiões equatoriais e tropicais, como é o caso da região brasileira. Os efeitos de 2ª ordem da ionosfera foram calculados usando o modelo dipolar e o CGM para diversas estações globais da rede IGS no dia 48 (escolhido aleatoriamente) do ano de 2007. O STEC foi obtido a partir do GIM e a Figura 15 apresenta as isolinhas de discrepâncias (em metros) entre os efeitos de 2ª ordem calculados usando esses dois modelos. Nesse caso, as discrepâncias foram obtidas na frequência L1 e entre os valores máximos encontrados ao longo do dia.

As discrepâncias entre os efeitos de 2ª ordem, calculados usando o modelo CGM e o dipolar, ficaram em um intervalo de ± 4 mm como pode ser verificado na Figura 15. Considerando que a incerteza propagada (Fig. 12) é da ordem de 1 mm (no pior caso) para a frequência L1, torna-se evidente a importância da utilização do modelo geomagnético considerado próximo do real, como é o caso do CGM.

Efeitos ionosféricos de 2ª e 3ª ordem nos períodos de baixa e alta atividade ionosférica

Os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera foram calculados para o ano de 2001 e para o ano de 2007, os quais representam, respectivamente, períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Os valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócios) e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno e verão (Matsuoka, 2007). Dessa forma, foi escolhida a estação BRAZ (-15°S , -47°O) da RBMC, a qual também faz parte da rede IGS, no dia 70 do ano de 2001 e o mesmo dia para o ano de 2007.

As Figuras 16 e 17 apresentam os efeitos de 2ª ordem da ionosfera (direção receptor-satélite) para todos os satélites, considerando os dois períodos, respectivamente. Os efeitos foram obtidos para o caso do grupo e utilizando a portadora L1.

A partir da Figura 16, verifica-se que os efeitos de 2ª ordem atingem valores máximos próximos de 35 mm para o ano de 2001. Para o ano de 2007 os valores máximos foram da ordem de 15 mm como mostrado na Figura 17.

Esses efeitos foram calculados para o caso do grupo, porém para a obtenção dos efeitos de 2ª ordem na fase, basta dividir os valores pela metade e inverter o sinal. Dessa forma, para o período de baixa atividade ionosférica, o efeito na fase atinge valores da ordem de 7 mm. Então, levando-se em consideração que a incerteza na medida da fase do sinal GPS é da ordem de 2 ou 3 mm, a correção dos efeitos de 2ª ordem torna-se significativa e deve portanto ser aplicada no posicionamento GPS.

As Figuras 18 e 19 apresentam os efeitos de 3ª ordem da ionosfera (direção receptor-satélite) para todos os satélites, considerando os dois períodos. Da mesma forma que para os efeitos de 2ª ordem, os de 3ª foram obtidos para o caso do grupo e utilizando a portadora L1.

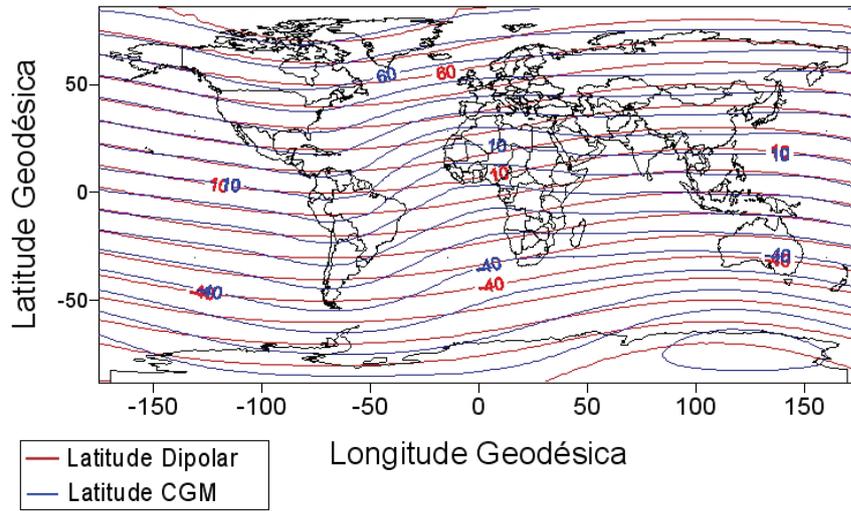


Figura 13 – Latitude geomagnética corrigida versus latitude dipolar.

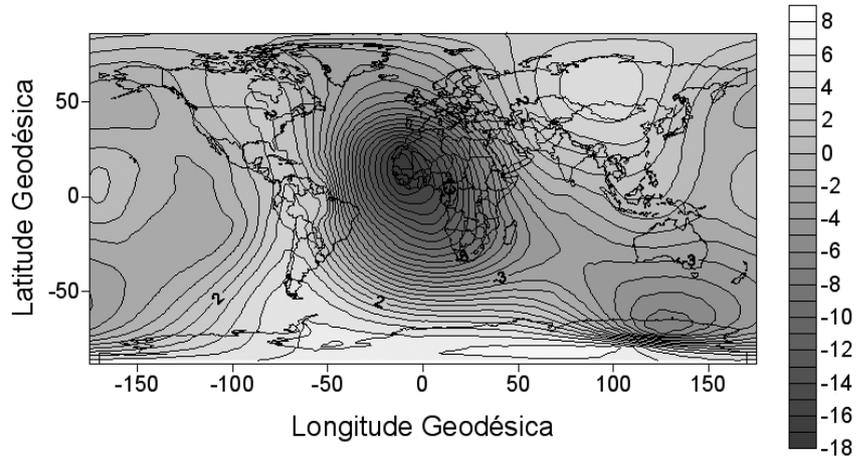


Figura 14 – Isolinhas das discrepâncias entre as latitudes geomagnéticas corrigidas e dipolares.

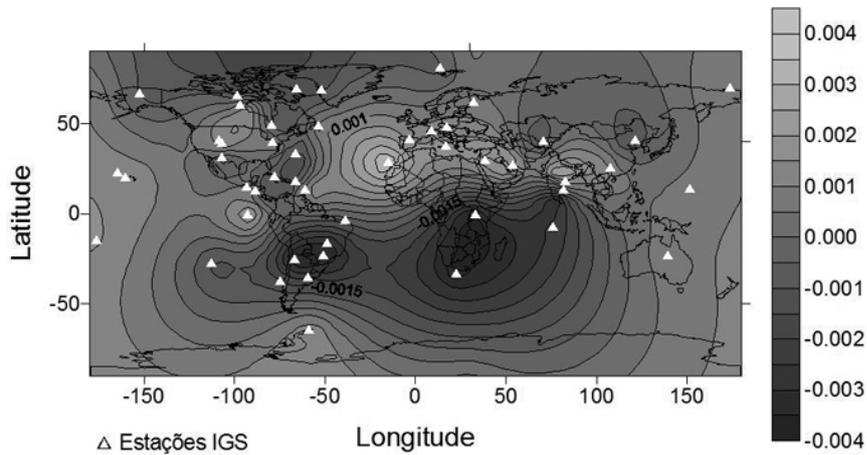


Figura 15 – Discrepâncias nos efeitos de 2ª ordem usando os modelos CGM e dipolar.

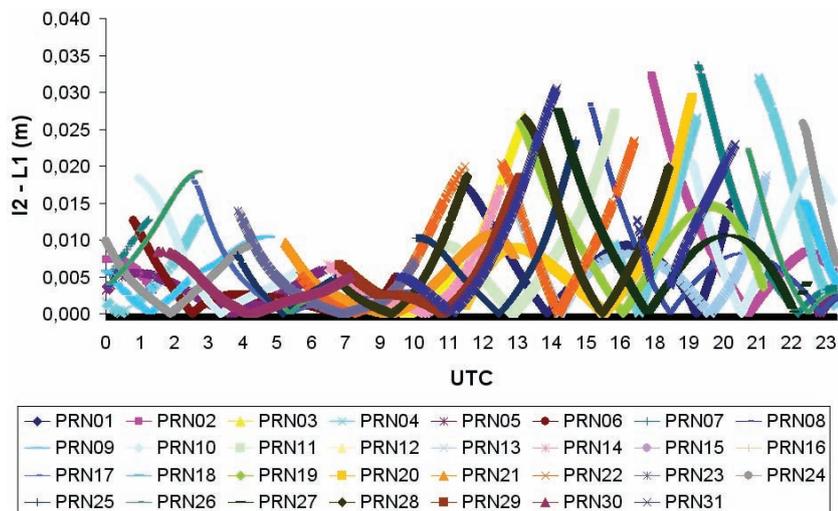


Figura 16 – Efeitos de 2ª ordem na estação BRAZ para o dia 70 do ano de 2001.

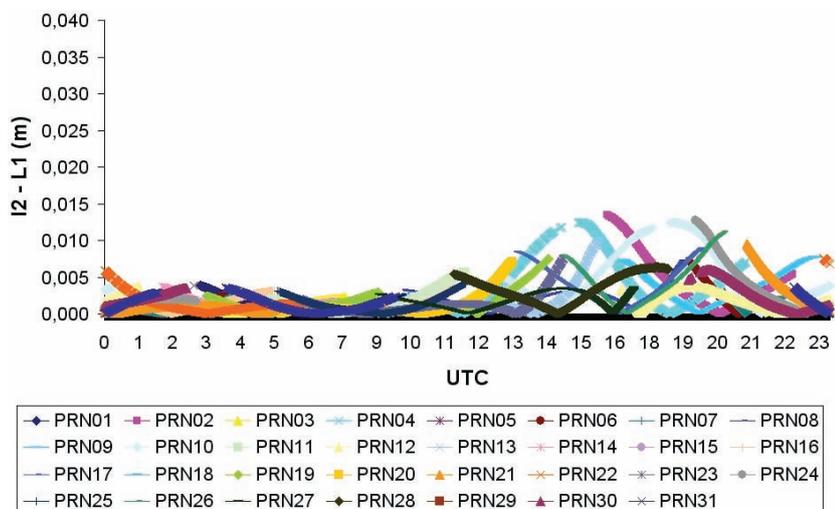


Figura 17 – Efeitos de 2ª ordem na estação BRAZ para o dia 70 do ano de 2007.

Para o período de baixa atividade ionosférica (ano 2007) os efeitos de 3ª ordem ficaram abaixo de 1 mm, porém para o ano de 2001 esses efeitos atingiram valores máximos na ordem de 8 mm, mostrando que em casos como esse, também se faz necessária a consideração dos efeitos ionosféricos de 3ª ordem no posicionamento GPS de alta acurácia.

Processamento de dados pelo método relativo com correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem

Com o objetivo de analisar a influência dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento GPS no modo relativo (Monico, 2008), foram escolhidas algumas estações da RBMC para o dia 60 (pertencente ao mês de março) do ano de 2005. O processamento

foi realizado com o *software* Bernese-5.0, utilizando efemérides reprocessadas (Fritsche et al., 2005). As estações envolvidas no processamento podem ser vistas na Figura 20.

As estações Cuiabá – CUIB (15°S, 56°O), Viçosa – VICO (20°S, 42°O), Paraná – PARA (25°S, 49°O), Santa Maria – SMAR (29°S, 53°O) tiveram suas coordenadas injuncionadas a valores fixos com o objetivo de estimar as coordenadas da estação UEPP (22°S, 51°O) em Presidente Prudente – SP. Foram realizados dois tipos de processamento: um considerando os dados sem as correções dos efeitos ionosféricos e o outro processamento considerando os arquivos RINEX de observações GPS corrigidos dos efeitos ionosféricos pelo aplicativo desenvolvido Rinex_HO.

Todos os resultados estão referidos ao sistema SIRGAS 2000.

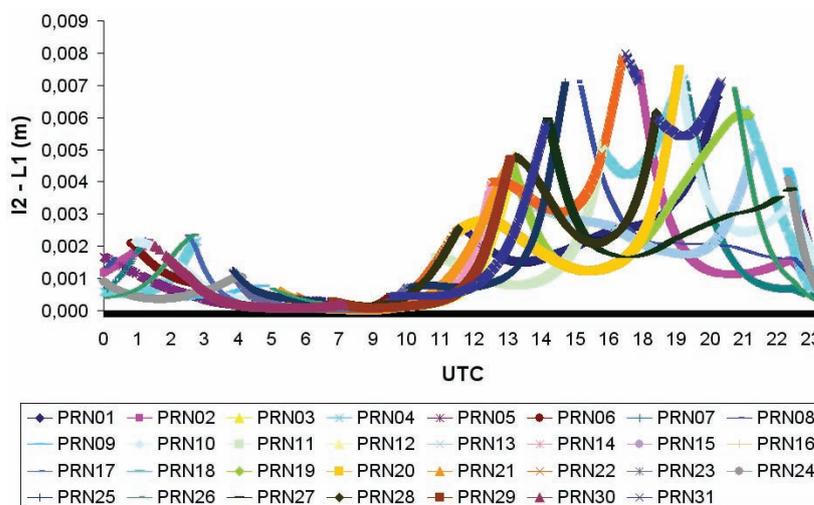


Figura 18 – Efeitos de 3ª ordem na estação BRAZ para o dia 70 do ano de 2001.

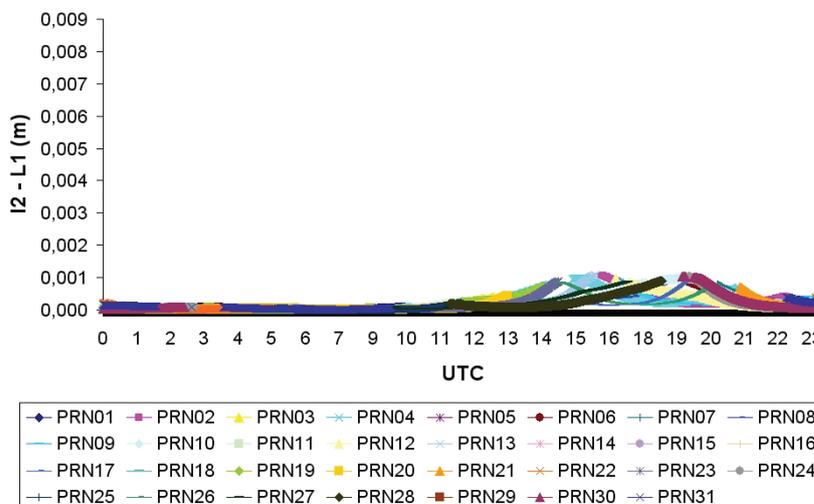


Figura 19 – Efeitos de 3ª ordem na estação BRAZ para o dia 70 do ano de 2007.

As coordenadas da estação UEPP advindas do processamento utilizando os arquivos RINEX corrigidos foram comparadas com as coordenadas advindas do processamento sem as correções. Estas diferenças foram referidas como os ‘erros’ devidos a não consideração dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera.

A Tabela 1 apresenta tais erros em coordenadas cartesianas (ERRO3D) e em altitude geométrica (ERRO H). Os valores são apresentados em unidades de mm.

Os erros máximos obtidos foram para a linha UEPP-CUIB, com valores de 2,8 e 2,4 mm para as componentes 3D e altimétrica, respectivamente. Os mínimos foram para a linha UEPP-VICO com valores de 0,30 e 0,20 mm para as componentes 3D e altimétrica, respectivamente.

Tabela 1 – Erro devido a não consideração dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no processamento relativo GPS.

Base	Rover	Erro 3D (mm)	Erro H (mm)
UEPP	VICO	0,300	0,200
UEPP	SMAR	1,700	-1,600
UEPP	PARA	1,500	-1,500
UEPP	CUIB	2,800	2,400

Uma observação importante se refere à linha de base UEPP-PARA, cujo comprimento é de 430,236 km e que apresentou maiores erros que a linha UEPP-VICO, cujo comprimento é de 897,011 km. Uma explicação para tal ocorrência se deve à orientação dessas linhas de base. Enquanto a linha UEPP-PARA

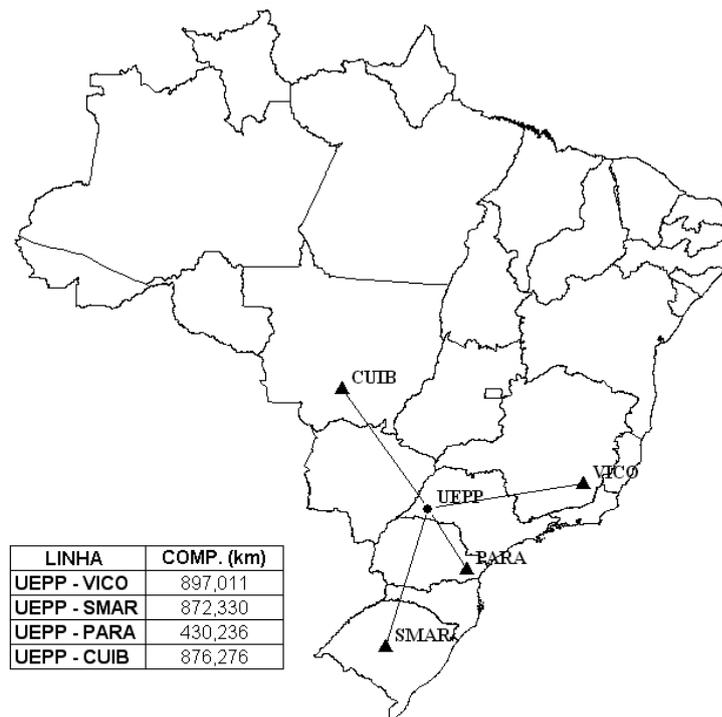


Figura 20 – Estações utilizadas no processamento relativo. Situação sem escala.

tem orientação aproximadamente Norte-Sul, a linha UEPP-VICO tem orientação aproximadamente Leste-Oeste, sendo que no primeiro caso, as variações do campo geomagnético são maiores (Bassiri & Hajj, 1993).

Processamento de dados pelo método relativo cinemático com correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem

A variação ao longo do dia causada pelos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento relativo pode ser vista quando se realiza o posicionamento no modo cinemático. Dessa forma, a linha de base UEPP-PARA no dia 60 de 2005 foi processada nesse modo a partir do *software* TGO da Trimble e os erros em latitude e longitude são mostrados na Figura 21.

Os erros em latitude e longitude causados pela não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera ficaram, no geral, em um intervalo de aproximadamente 4 mm com valores máximos de mais ou menos 7 mm.

Os erros ao longo do dia em altitude geométrica (H) são apresentados na Figura 22.

Os erros na componente H, provocados pela não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, atingiram valores máximos da ordem de mais ou menos 15 mm. Conclui-se assim que a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera deve ser aplicada em levan-

tamentos que utilizem o posicionamento cinemático e que requeiram precisão da ordem de poucos centímetros.

PPP com correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem

Para analisar os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera no modo PPP, foram processados os dados da estação Brasil Fortaleza BRFT (-3°S , -38°O) com soluções diárias envolvendo os anos de 2006 a 2008,5. O *software* utilizado foi o “GPSPPP” desenvolvido pelo NRCan (*Natural Resources Canada*).

Da mesma forma que no posicionamento relativo, no PPP foram realizados dois tipos de processamento, respectivamente com os arquivos RINEX corrigidos e sem as correções. Os resultados advindos dos dados corrigidos foram comparados com os não corrigidos e a Figura 23 mostra os erros nas componentes DE, DN e DU do SGL, bem como o erro total resultante (ERRO3D).

A partir da Figura 23 pode-se confirmar que os maiores erros encontrados foram na componente DU, atingindo valores máximos da ordem de 4 mm. No caso das componentes DE e DN, os valores ficaram em torno de 1 mm.

A Tabela 2 apresenta o erro médio, o desvio-padrão e o erro médio quadrático (EMQ) do resultado do PPP na estação BRFT para os anos envolvidos no processamento.

O valor do EMQ para a componente DU, foi de 2,653 mm,

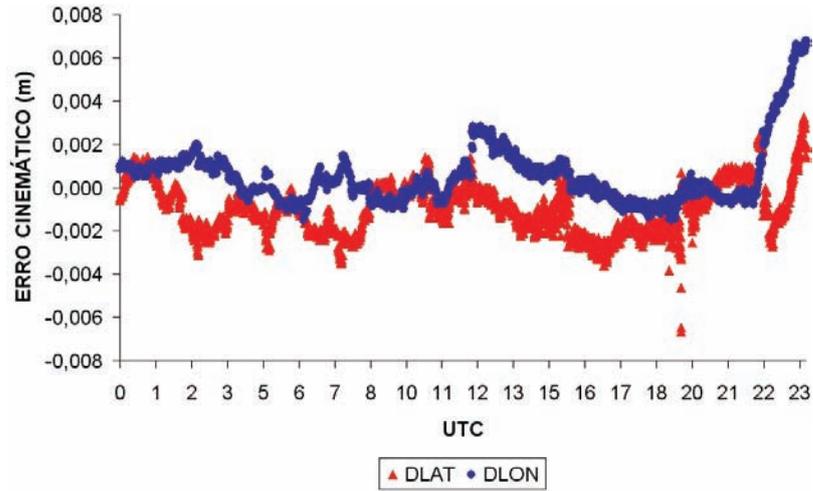


Figura 21 – Erros em latitude e longitude devido a não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento cinemático.

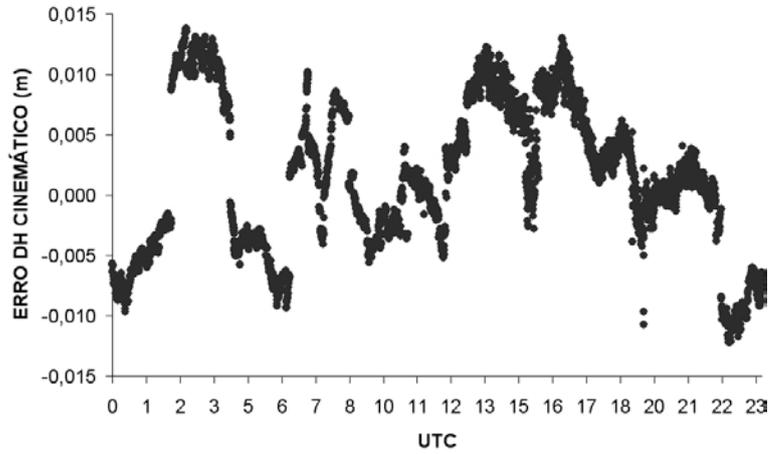


Figura 22 – Erros em H devido a não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento cinemático.

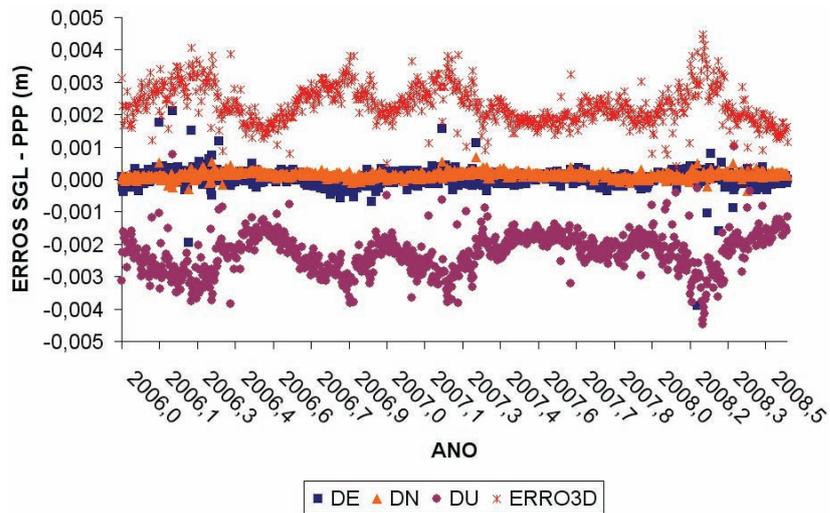


Figura 23 – Erro (SGL) no PPP devido a não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem.

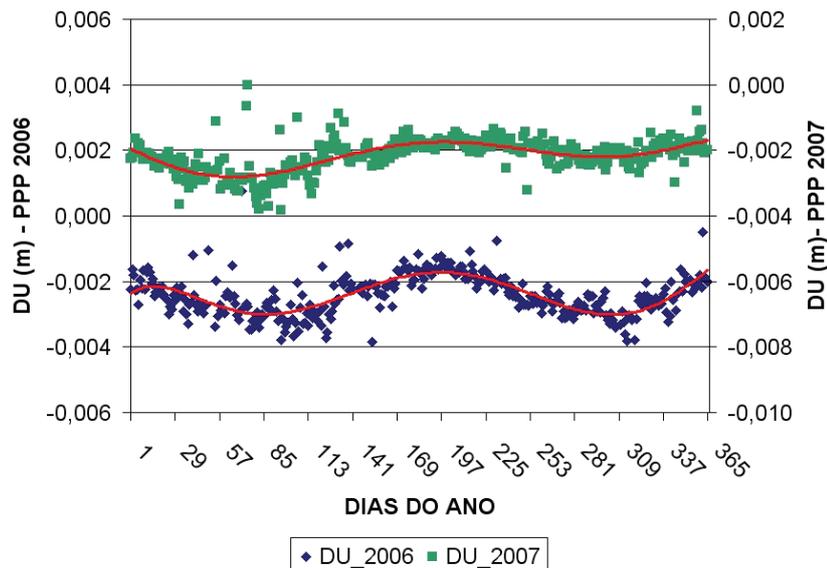


Figura 24 – Série temporal em altimetria (efeitos de 2ª e 3ª ordem) no PPP.

enquanto que para as componentes DE e DN, os valores foram, respectivamente, de 0,43 e 0,123 mm, como pode ser visto na Tabela 2. No caso do ERRO3D, o EMQ foi de 2,695 mm atingindo valor máximo de 4,1 mm e mínimo de 1,2 mm durante o período envolvido nos processamentos do PPP.

Tabela 2 – Estatística do PPP na estação BRFT.

	DE (mm)	DN (mm)	DU (mm)	Erro 3D (mm)
Erro médio	0,142	0,068	-2,576	2,645
Desvio-padrão	0,406	0,103	0,634	0,519
EMQ	0,430	0,123	2,653	2,695

A Figura 24 apresenta a série temporal do erro na componente altimétrica (DU) para os anos de 2006 e de 2007. Para cada ano foi gerado um polinômio de grau 6 com o objetivo de analisar o comportamento dos erros ao longo do ano.

A partir da Figura 24 confirma-se que os erros do PPP na componente altimétrica, devido a não correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, atingiram valores máximos da ordem de 3 a 4 mm e apresentam comportamento cíclico e muito semelhante ao longo dos anos 2006 e 2007.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram investigados os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera. Para tanto, foi desenvolvido um aplicativo que permite manipular o arquivo de dados GPS RINEX, gerando um

arquivo com observações corrigidas dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera. Isto proporciona realizar o processamento dos dados GPS em qualquer *software* de processamento que aceite o formato RINEX.

Os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera foram analisados para os períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Além disso, analisou-se a incerteza no cálculo desses efeitos em função da incerteza do TEC, podendo-se concluir que tanto a utilização do TEC advindo dos Mapas Globais da Ionosfera como a partir das pseudodistâncias produz resultados compatíveis em termos de precisão.

No caso das transformações das componentes terrestres para o sistema geomagnético, verifica-se que as diferenças na utilização do sistema dipolar *versus* o sistema geomagnético corrigido (CGM), o qual é baseado nos modelos do IGRF, atingiram valores da ordem de 4 mm. Esses valores são maiores que a incerteza do próprio efeito de 2ª ordem, os quais foram calculados em função da precisão (DP) de determinação do TEC. Dessa forma, recomenda-se o uso de modelos geomagnéticos considerados próximos do real, tais como os modelos fornecidos pelo IGRF.

Foram realizados processamentos no modo PPP e nos modos relativo estático e cinemático na região brasileira considerando linhas de base longas. O PPP foi realizado com solução diária envolvendo os anos de 2006 a 2008,5 e a aplicação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, provocou diferenças máximas da ordem de 4 mm nas coordenadas ajustadas. No caso do posicionamento GPS relativo estático, as diferenças em coor-

denadas devido à correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem atingiram até aproximadamente 3 mm. No posicionamento relativo cinemático, essas diferenças atingiram valores máximos da ordem de 7 mm em latitude e longitude e para a componente altimétrica as diferenças máximas foram da ordem de 15 mm. Logo, para o posicionamento que requer alta acurácia, tal como a determinação de redes geodésicas e outros, é necessário aplicar correção desses efeitos.

REFERÊNCIAS

- BASSIRI S & HAJJ GA. 1993. Higher-order ionospheric effects on the global positioning systems observables and means of modeling them. *Manuscr. Geod.*, 18: 280–289.
- BRUNNER F & GU M. 1991. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observation. *Manuscr. Geod.*, 16: 205–214.
- CIRAOLO L, AZPILICUETA F, BRUNINI C, MEZA A & RADICELLA SM. 2007. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, 81(2): 111–120.
- DAVIES K. 1990. *Ionospheric radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 580 p.
- FRITSCHÉ M, DIETRICH R, KNÖFEL C, RÜLKE A, VEY S, ROTACHER M & STEIGENBERGER P. 2005. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophysical Research Letters*, v. 32: L23311, doi:10.29/2005GL024342.
- HAPGOOD MA. 1992. Space physics coordinate transformations: A user guide. *Planetary Space Science*. Great Britain, 40(5): 711–717.
- HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN JM, SANZ J, ORÚS R & SALAZAR D. 2005. Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning (Summary). Barcelona, Spain. Research group of Astronomy and Geomatics – Technical University of Catalonia, 23 p.
- HOQUE MM & JAKOWSKI N. 2006. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. *J. Geodesy*, doi:10.1007/s00190-006-0106-0.
- KEDAR S, HAJJ GA, WILSON BD & HEFLIN MB. 2003. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, 30(16): 1829. 4p. doi:10.1029/2003GL017639.
- KIM BC & TININ MV. 2006. Contribution of ionospheric irregularities to the error of dual-frequency GNSS positioning. *J. Geodesy*, doi:10.1007/s00190-006-0099-8.
- MATSUOKA MT. 2007. Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região Brasileira. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 263 f.
- MATSUOKA MT & CAMARGO PO. 2004. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*. Rio de Janeiro, 56(1): 14–27.
- McNAMARA LF. 1991. *The ionosphere: Communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 237 p.
- MONICO JFG. 2000. Posicionamento por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma Solução para a Geodinâmica. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18(1): 39–48. ISSN 0102-261X. doi:10.1590/S0102-261X2000000100004.
- MONICO JFG. 2008. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. Editora UNESP, 2 ed. 476 p.
- ODIJK D. 2002. Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays. PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft. 242 f.
- PIM. 2001. Parametrized ionospheric model: User guide. 79p. Disponível em: <<http://www.cpi.com>>. Acesso em: 10 mar. 2009.
- SCHUNK RW & NAGY AF. 2000. *Ionosphere: Physics, plasma and chemistry*. New York: Cambridge University Press. 554 p.
- SEEBER G. 2003. *Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications*. 2nd. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589 p.
- TSYGANENKO NA. 2005. GEOPACK: A set of Fortran subroutines for computations of the geomagnetic field in the Earth's Magnetosphere. Universities Space Research Association, 19 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Haroldo Antonio Marques. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2005). Mestrado em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2006-2008). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geodésia, atuando principalmente nos seguintes temas: Posicionamento GPS, Ajustamento e Processamento de Dados GPS, Modelagem de efeitos atmosféricos no ajustamento de observações GPS, Determinação das Órbitas dos Satélites GPS, entre outros.

João Francisco Galera Monico. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1982), Mestrado em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (1988) e Doutorado em Engenharia de Levantamentos e Geodésia Espacial – IESSG University of Nottingham (1995). Atualmente é professor Livre Docente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e pesquisador PQ nível 1C do CNPq. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geodésia, atuando principalmente nos seguintes temas: Geodésia Celeste, GNSS para Geodésia e Meteorologia, Controle de Qualidade e Cartografia. Autor do livro Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS, publicado em 2000, com nova edição em 2008, com o título atualizado para Posicionamento pelo GNSS.

Marcio Aquino. Possui graduação em Engenharia de Geodésia pelo Instituto Militar de Engenharia (1976), Mestrado em Geodésia Espacial pela Universidade de Nottingham (1988) e Doutorado em Geodésia Espacial pela Universidade de Nottingham (1999). Atualmente, é pesquisador do Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, Universidade de Nottingham, com experiência em projetos de colaboração internacional nas áreas de GNSS, especificamente em Wide Area GNSS, arquitetura e análise de mercado para o sistema Galileo, interface civil-militar, certificação e padronização, modelagem de erros e efeitos da ionosfera, em particular cintilação ionosférica.

Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2005). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Posicionamento Geodésico. Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente (2008).