

# ANÁLISE DOS EFEITOS DE 2° E 3° ORDEM DA IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GNSS E NO POSICIONAMENTO DE REDES GEODÉSICAS DE ALTA PRECISÃO

MARIA LÍGIA CHUERUBIM<sup>1</sup>  
 JOÃO CARLOS CHAVES<sup>2</sup>  
 JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
 Faculdade de Engenharia Civil – FECIV  
 marialigia@feciv.ufu.br

<sup>2,3</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP  
 Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT  
 Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP  
 {chaves, galera}@fct.unesp.br

**RESUMO** – Este artigo descreve os procedimentos de correção e análise dos erros inerentes aos efeitos de 1ª ordem, 2ª ordem e 3ª ordem da ionosfera nas observáveis GPS (*Global Positioning System*) fase e pseudodistância, bem como nas coordenadas das estações. Como estudo de caso foram utilizados os dados das estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Brasília (BRAZ), Bom Jesus (BOMJ), Cuiabá (CUIB), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Presidente Prudente (PPTE) e Viçosa (VICO) pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e dados das estações Ilha Solteira (ILHA), Lins (LINS), Ourinhos (OURI), Rosana (ROSA) e São José do Rio Preto (SJR) da Rede GNSS SP, aplicando-se a técnica de posicionamento relativo e o procedimento de combinação de equações normais com o *software* Bernese, objetivando evidenciar a relevância da correção destes efeitos no processamento de redes geodésicas de alta precisão.

**Palavras chave:** redes geodésicas, GPS, ionosfera.

**ABSTRACT** - This article describes the procedures of correction and analysis of errors inherent to the effects of 1st order, 2nd order and 3rd order of the ionosphere in the observables GPS (*Global Positioning System*) phase and pseudorange, as well as in the coordinates of the stations. As case study had been used the data of stations GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Brasilia (BRAZ), Bom Jesus (BOMJ), Cuiabá (CUIB), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Presidente Prudente (PPTE) and Viçosa (VICO) pertaining to the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring) and data from stations Ilha Solteira (ILHA), Lins (LINS), Ourinhos (OURI), Rosana (ROSA) and data of the stations São José do Rio Preto (SJR) of Network GNSS SP, applying the technique of relative positioning and the procedure of combining of normal equations with Bernese software, objectifying to evidence the relevance of the correction of these effects correction in the processing of geodetic network of high precision.

**Key words:** geodetic networks, GPS, ionosphere.

## 1 INTRODUÇÃO

O erro devido à ionosfera para a fase ( $I_r^s$ ) e código ( $I_{gr}^s$ ) ao longo da direção do satélite (s) e da antena receptora (r) é dado em função do TEC e da frequência do sinal (f):

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC \quad (1)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (2)$$

Nas Equações 1 e 2 verifica-se que os erros devidos à refração ionosférica para a fase e código são de mesma magnitude, porém de sinais contrários, sendo proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. A unidade do TEC é expressa em elétrons por metro quadrado ( $el/m^2$ ).

Em virtude da aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada por meio das Equações 1 e 2, expressa apenas o efeito de 1ª ordem da ionosfera, que pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência e eliminados por meio da

combinação linear *Ion-Free*. A combinação linear *Ion-Free* para a fase, em ciclos, para as portadoras L1 e L2, respectivamente, considerando-se apenas os efeitos de 1ª ordem, é determinada utilizando-se os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$ , dada pela seguinte relação (GOAD, 1996):

$$\phi_{IF} = m_1 \phi_{rL1}^s + m_2 \phi_{rL2}^s \quad (3)$$

em que  $\phi_{rL1}^s$  e  $\phi_{rL2}^s$  são determinadas com base nas seguintes Equações:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} (\rho_r^s - I_{rL1}^s + T_r^s) + f_{L1}(dt_r - dt^s) + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (4)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} (\rho_r^s - I_{rL2}^s + T_r^s) + f_{L2}(dt_r - dt^s) + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (5)$$

Agrupando-se os termos em comum, nas Equações 4 e 5, e denotando-os por  $\rho'$ , tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{f_{L1}}{c} I_{rL1}^s + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (6)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{f_{L2}}{c} I_{rL2}^s + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (7)$$

Considerando-se os efeitos de 1ª ordem para a fase (Equação 1), para as portadoras L1 e L2, e substituindo-a nas Equações 6 e 7, tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{f_{L1}}{c} \frac{40,3}{f_{L1}^2} TEC + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (8)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{f_{L2}}{c} \frac{40,3}{f_{L2}^2} TEC + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (9)$$

Representando  $40,3 TEC/c$  por  $I^{(1)}$ , nas Equações 8 e 9, tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{I^{(1)}}{f_{L1}} + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (10)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{I^{(1)}}{f_{L2}} + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (11)$$

A frequência ( $f_{IF}$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda_{IF}$ ) da combinação linear *Ion-Free*:

$$f_{IF} = m_1 f_1 + m_2 f_2 \quad (12)$$

$$\lambda_{IF} = \frac{c}{m_1 f_1 + m_2 f_2} \quad (13)$$

A ambiguidade da  $\phi_{IF}$ , por sua vez, é dada pela Equação:

$$N_{IF} = N_1 m_1 + N_2 m_2 \quad (14)$$

que será um número inteiro se os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$  também o forem.

O efeito de 1ª ordem para a fase  $\left(\frac{I_{\phi}^{(1)s}}{f}\right)$  se anula somente se a seguinte condição se satisfaz:

$$\frac{m_1}{f_1} + \frac{m_2}{f_2} = 0 \quad (15)$$

Outra condição pode ser imposta desconsiderando-se o termo ionosférico, de forma que a combinação resultante entre as frequências L1 e L2 seja igual à frequência L1:

$$m_1 f_1 + m_2 f_2 = f_1 \quad (16)$$

Isolando-se os coeficientes  $m_1$  na Equação 44, obtém-se o coeficiente  $m_2$ :

$$m_2 = -\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (17)$$

e, por conseguinte, substituindo a Equação 17 na Equação 15, obtém-se  $m_1$  dado por:

$$m_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (18)$$

Substituindo-se os valores de  $m_1$  e  $m_2$  encontrados, respectivamente, nas Equações 18 e 17, a combinação *Ion-Free* (Equação 3) entre as portadoras L1 e L2 poderá ser expressa por:

$$\phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{rL1}^s - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{rL2}^s \quad (19)$$

e, substituindo-se as Equações 10 e 11 na Equação 19, tem-se:

$$\phi_{IF} = \frac{f_1}{c} \rho' + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s}) - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s}) \quad (20)$$

Substituindo  $\rho'$  na Equação 20 tem-se que:

$$\begin{aligned} \phi_{IF} = & \frac{f_1}{c} (\rho_r^s + T_r^s) + f_1 (dt_r - dt^s) + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{rL1}^s - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{rL2}^s + \\ & + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \end{aligned} \quad (21)$$

Verifica-se, na Equação 21, que os efeitos de 1ª ordem são eliminados na *Ion-Free*. A combinação *Ion-Free* para a pseudodistância, considerando-se apenas o efeito de 1ª ordem para P1 e P2 é dada pela Equação 22:

$$PD_{IF} = \frac{f_2}{f_1} (\rho_r^s) + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} - \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (22)$$

A incerteza da combinação linear *Ion-Free* ( $\sigma_{\phi_{IF}}$ ) pode ser obtida a partir da aplicação da lei de propagação de variância e covariância na Equação 23, tanto para a fase quanto para a pseudodistância, é dada por:

$$\sigma_{\phi_{IF}} = \sqrt{m_1^2 \sigma_{\phi_1}^2 + m_2^2 \sigma_{\phi_2}^2}, \quad (23)$$

onde  $\sigma_{\phi_1}$  e  $\sigma_{\phi_2}$  são, neste caso, as incertezas das medidas originais de fase.

## 2 FUNDAMENTOS E CONCEITOS ENVOLVIDOS NO TRABALHO

Os fundamentos básicos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa são apresentados nesta seção.

### 2.1 Modelagem dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera

A combinação linear das observáveis GPS, coletadas com receptores de dupla frequência, permite a eliminação dos efeitos de 1ª ordem da ionosfera na combinação *Ion-Free*. Todavia, os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera não são eliminados nesta combinação, o que acarreta variações nas coordenadas das estações da ordem de centímetros.

O comprimento do caminho óptico entre o satélite e o receptor é determinado em função do índice de refração para a fase  $\eta_{\phi}^{iono} = \frac{c}{v_{\phi}}$  e para o grupo  $\eta_g^{iono} = \frac{c}{v_g}$ , definido pela razão entre a velocidade da luz ( $c$ ) e da velocidade da fase ( $v_{\phi} = dl_{\phi}/dt_{\phi}$ ) e do grupo ( $v_g$ ), dado por:

$$\begin{aligned} \ell_{\phi} &= ct_{\phi} = c \int dt_{\phi} = \int \frac{c}{v_{\phi}} dl_{\phi} = \int n_{\phi} dl_{\phi} \\ &= \rho + \underbrace{\int (n_{\phi} - 1) d\rho}_{\mathcal{G}_{\phi}} + \underbrace{\left( \int n_{\phi} dl_{\phi} - \int n_{\phi} d\rho \right)}_{k_{\phi}} \end{aligned} \quad (24)$$

onde,  $\rho$  denota a distância geométrica entre o satélite e o receptor (ODIJK, 2002). A curvatura entre a trajetória efetivamente percorrida pelo sinal e a distância geométrica deve-se a dois efeitos: o efeito de propagação, denotado por  $\mathcal{G}_{\phi}$  e o efeito de curvatura, denotado por  $k_{\phi}$  (ODIJK, 2002). Assim, o efeito da propagação do sinal para a fase e para o grupo ( $\mathcal{G}_{\phi}^{iono}, \mathcal{G}_g^{iono}$ ) é expresso por:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\phi}^{iono} &= -\frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho - \frac{1}{2f^3} \int f_p^2 f_g \cos\theta d\rho - \frac{1}{8f^4} \int f_p^4 d\rho \\ &= \underbrace{-\frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho}_{I_{\phi}^{(1)}} - \underbrace{\frac{1}{2f^3} \int f_p^2 f_g \cos\theta d\rho}_{I_{\phi}^{(2)}} - \underbrace{\frac{1}{8f^4} \int f_p^4 d\rho}_{I_{\phi}^{(3)}} \\ \mathcal{G}_g^{iono} &= \frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho + \frac{1}{f^3} \int f_p^2 f_g \cos\theta d\rho + \frac{3}{8f^4} \int f_p^4 d\rho \\ &= \underbrace{\frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho}_{I_g^{(1)}} + \underbrace{\frac{1}{f^3} \int f_p^2 f_g \cos\theta d\rho}_{I_g^{(2)}} + \underbrace{\frac{3}{8f^4} \int f_p^4 d\rho}_{I_g^{(3)}} \end{aligned} \quad (25)$$

A Equação 25 mostra, respectivamente, que o avanço da fase e o atraso do grupo são funções dependentes dos efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera. Para o caso do grupo estes efeitos são denotados por  $I_g^{(1)}$ ,

$I_g^{(2)}$  e  $I_g^{(3)}$ . Assim, inserindo-se na Equação 25, a frequência de plasma do elétron (Equação 26) e a frequência de giro (Equação 27):

$$f_p = \sqrt{AN_e} \text{ com } A \cong 80,6 \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad (26)$$

$$f_g = \frac{e}{2\pi m_e} \|\vec{B}\| \quad (27)$$

os efeitos da refração ionosférica para o grupo podem ser descritos por (ODIJK, 2002):

$$\begin{aligned} I_g^{(1)} &= \frac{A}{2f^2} \int N_e d\rho \\ I_g^{(2)} &= \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \int \|\vec{B}\| \cos\theta N_e d\rho \\ I_g^{(3)} &= \frac{3A}{8f^4} \int N_e^2 d\rho \end{aligned} \quad (28)$$

onde:

$N_e$  - densidade de elétrons livres em  $\text{m}^{-3}$ ;  
 $e$  - carga do elétron igual a, aproximadamente,  $1,60218 \cdot 10^{-19}$ ;  
 $m_e$  - massa do elétron correspondente a  $9,10939 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  
 $\|\vec{B}\|$  - comprimento do vetor de indução geomagnética  $B$  em unidades de Tesla (volts-segundos/metros<sup>2</sup>);  
 $\theta$  - ângulo formado entre  $B$  e a direção da propagação do sinal entre o satélite e a antena receptora.

Adicionando os efeitos de propagação do sinal (Equações 25 e 28) e na Equação 24, o avanço ionosférico da fase e o atraso do grupo, podem ser escritos como (ODIJK, 2002):

$$\begin{aligned} \ell_{\phi} &= -I_{\phi}^{(1)} - \frac{1}{2} I_{\phi}^{(2)} - \frac{1}{3} I_{\phi}^{(3)} + k_{\phi}^{iono} \\ \ell_g &= I_g^{(1)} + I_g^{(2)} + I_g^{(3)} + k_g^{iono} \end{aligned} \quad (29)$$

onde  $k$ , como dito anteriormente, é o efeito de curvatura.

A Tabela 1 apresenta o erro máximo na direção vertical para as portadoras L1, L2 e para a combinação *Ion-Free* (L0), considerando os efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera:

Tabela 1 – Erro máximo devido à ionosfera, em metros, para as medidas obtidas na vertical.

Frequência	1ª ordem ( $1/f^2$ )	2ª ordem ( $1/f^3$ )	3ª ordem ( $1/f^4$ )
L <sub>1</sub>	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L <sub>2</sub>	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L <sub>0</sub>	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Seeber (2003).

#### a) Efeitos de 1ª ordem

O efeito de 1ª ordem da ionosfera depende, exclusivamente, da densidade do TEC presentes ao longo da trajetória geométrica percorrida pelo sinal entre o satélite e a antena receptora, ou seja, STEC (*Slant TEC*),

dada em função do termo  $\int N_e d\rho$  e que é projetada na direção vertical (VTEC - Vertical TEC):

$$I_g^{(1)} = \frac{A}{2f^2} TEC = \frac{40,3}{f^2} STEC$$

$$I_\phi^{(1)} = -\frac{A}{2f^2} TEC = -\frac{40,3}{f^2} STEC \quad (30)$$

**b) Efeitos de 2ª ordem**

Os termos de 2º e 3ª ordem da ionosfera dependem não apenas do STEC, mas, também do campo magnético da Terra na direção satélite receptor. O efeito de 2ª ordem (Equação 28) para o caso do grupo pode ser expresso por:

$$I_g^{(2)} = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \int \|\vec{B}\| \cos\theta |N_e d\rho \quad (31)$$

Segundo Odijk (2002), com base em uma simples camada infinitesimal da ionosfera, pode-se assumir que o produto vetorial  $\|\vec{B}\| \cos\theta$  é uma constante ao longo do caminho percorrido pelo sinal e que  $\int N_e d\rho$  corresponde ao STEC. Nesta perspectiva, tem-se que o atraso ionosférico para o grupo é calculado por:

$$I_g^{(2)} = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \|\vec{B}\| \cos\theta STEC \quad (32)$$

**c) Efeitos de 3ª ordem**

De acordo com Odijk (2002), o atraso ionosférico de 3ª ordem para o grupo Equação 28 é denotado por:

$$I_g^{(3)} = \frac{3A}{8f^4} \int N_e^2 d\rho \quad (33)$$

Para a resolução da integral que compõem a Equação 33, em geral, utiliza-se uma aproximação dada por:

$$\int N_e^2 d\rho = \eta N_e TEC \quad (34)$$

o que implica que o atraso ionosférico de 3ª ordem possa ser denotado por:

$$I_g^{(3)} = \frac{3A^2}{8f^4} \eta N_e STEC \quad (35)$$

**3 METODOLOGIA**

Neste trabalho, foram utilizados, para um período mínimo de 3 anos de dados (2006 a 2008), os arquivos de observação GPS no formato RINEX das estações Brasília (BRAZ), Bom Jesus (BOMJ), Cuiabá (CUIB), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Presidente Prudente (PPTE) e Viçosa (VICO) da RBMC, disponibilizados em <http://geofitp.ibge.gov.br/RBMC/dados>, e os dados da Rede GNSS SP das estações Ilha Solteira (ILHA), Lins (LINS), Ourinhos (OURI), Rosana (ROSA) e São José do Rio Preto (SJRP), disponibilizados em <http://gege.prudente.unesp.br>. Na etapa de correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem foram utilizadas as efemérides transmitidas do IGS (<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>) e os mapas do

CODE, disponibilizados diariamente no endereço <ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyyy>.

Posteriormente, estes dados foram depurados no software TEQC (*Translate, Edit, Quality Check*), disponível em <http://www.unavco.ucar.edu>, e utilizados como dados de entrada, juntamente com os mapas do CODE, no aplicativo RINEX\_HO desenvolvido por Marques (2008). Finalmente, foram feitas as análises dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento relativo com base nas soluções obtidas com o software Bernese para o ano de 2006, comparando-se os resultados obtidos sem as correções desses efeitos e os arquivos RINEX corrigidos pelo aplicativo RINEX\_HO, e as efemérides precisas do IGS, por meio da estratégia de processamento *shortest* e da combinação das equações normais pelo módulo ADDNEQ2 do Bernese.

**4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS**

Para a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera utilizou-se o software RINEX\_HO, que aplica as correções nas observáveis GPS, com base no TEC calculado a partir da pseudodistância, o qual é interpolado a partir dos Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Map*), disponibilizados via Internet (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) pelo CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*) e nas informações associadas ao campo geomagnético da Terra, possibilitando o cálculo dos efeitos de 2ª e 3ª ordem. Para tanto, este software utiliza como arquivos de entrada as efemérides transmitidas, disponíveis pelo CDDIS - *Crustal Dynamics Data Information System* (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/>), os GIMs e os arquivos de observação no formato RINEX.

Para tanto, elaborou-se um script em BAT que possibilita executar, de forma sequencial, o aplicativo TEQC e o software RINEX\_HO. Neste script, os arquivos RINEX das estações foram formatados no TEQC. Posteriormente, este script executou o software RINEX\_HO obtendo, para cada dia do ano e estação a magnitude dessas correções. A Tabela 1 apresenta a variação média anual calculada para o período de três anos de dados (2006 a 2008), dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, em metros, para o código C/A ou P1, para o código P2 e para a fase ( $\phi$ ), nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  indicadas, respectivamente, pelos subíndices 1 e 2:

Tabela 1 - Variação média anual dos efeitos de 2ª e 3ª ordem para a fase e para o código nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .

Estações	2ª ordem				3ª ordem			
	C/A (m)	P2(m)	$\phi_1$ (m)	$\phi_2$ (m)	C/A (m)	P2(m)	$\phi_1$ (m)	$\phi_2$ (m)
BRAZ	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
BOMJ	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
CUIB	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,001	-0,000	-0,000
ILHA	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
IMPZ	0,004	0,009	-0,002	-0,005	0,000	0,001	-0,000	-0,000
LINS	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
NAUS	0,006	0,008	-0,003	-0,004	0,000	0,001	-0,000	-0,000
OURI	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
PPTE	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
ROSA	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
SJRP	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
VICO	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000

Verifica-se, na Tabela 1, que a magnitude obtida para os efeitos de 2ª ordem é condizente com os valores mencionados na literatura. Em contrapartida, para os efeitos de 3ª ordem, verifica-se que estes não foram totalmente corrigidos para a maioria das estações, atingindo níveis submilimétricos. Como forma de exemplificar a variação média diária dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, respectivamente, nas portadoras L1 e L2 foram geradas as séries temporais para as estações PPTE e BRAZ como ilustram as Figuras de 1 a 8:

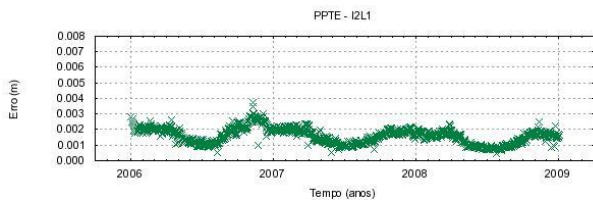


Figura 1 - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.

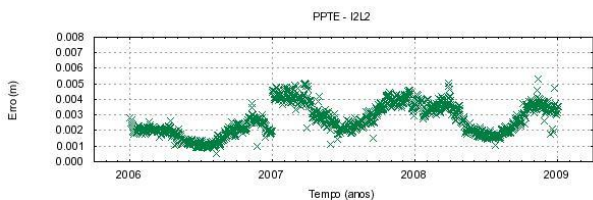


Figura 2 - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação PPTE.

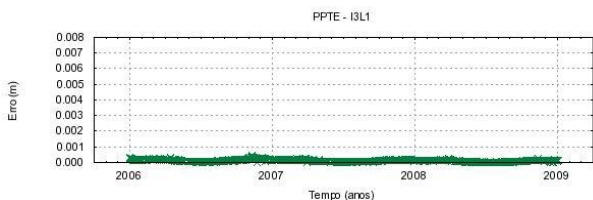


Figura 3 - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.

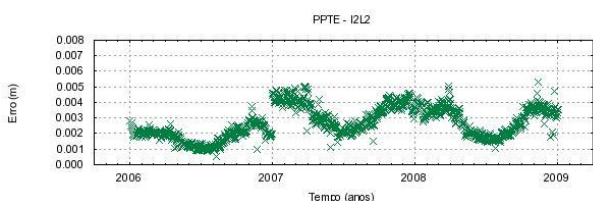


Figura 4 - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação PPTE.

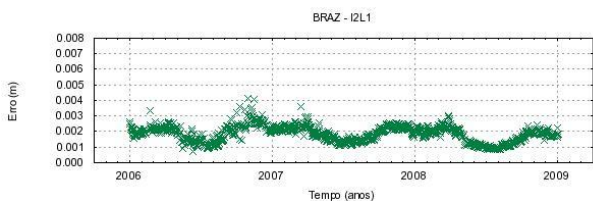


Figura 5 - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.

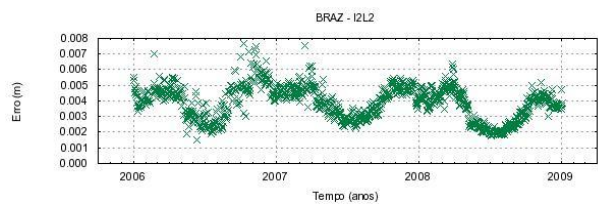


Figura 6 - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.

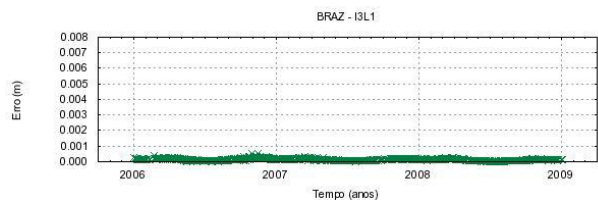


Figura 7 - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.

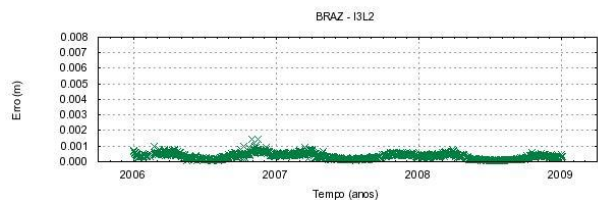


Figura 8 - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.

Ressalta-se que o período analisado refere-se a um período de mínima atividade solar, o que implica que os efeitos de 3ª ordem possam atingir valores de 0,001 metros, como evidenciado na Tabela 1 e nas Figuras 3 e 4 para a estação PPTE e nas Figuras 7 e 8 para a estação BRAZ. Posteriormente, foram feitas análises dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento relativo, comparando-se as séries temporais geradas com base nas soluções obtidas com o *software* Bernese para o ano de 2006, utilizando-se efemérides precisas IGS e a estratégia de processamento *shortest*. Como forma de exemplificar a discrepância para as componentes *e*, *n* e *u*, em metros, foram geradas as séries temporais com base nas discrepâncias das médias diárias, com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, para as estações BRAZ e PPTE, como ilustram as Figuras de 9 a 14:

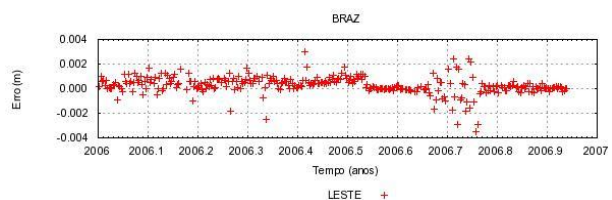


Figura 9 – Discrepância na componente Leste para a estação BRAZ.



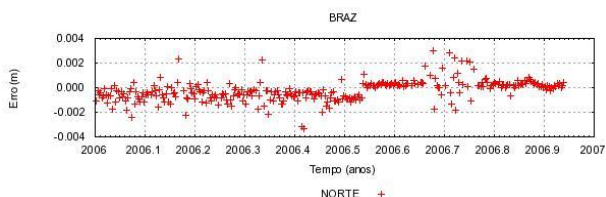


Figura 10 – Discrepância na componente Norte para a estação BRAZ.

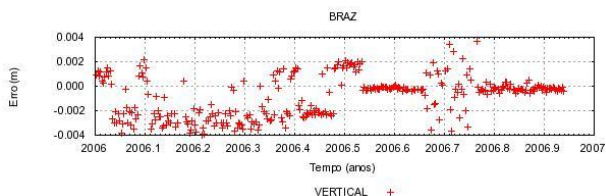


Figura 11 – Discrepância na componente Vertical para a estação BRAZ.

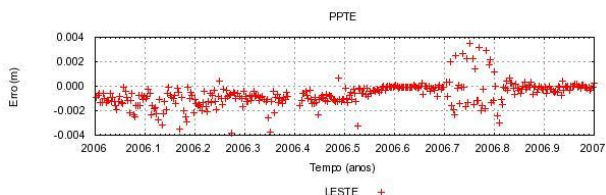


Figura 12 – Discrepância na componente Leste para a estação PPTE.

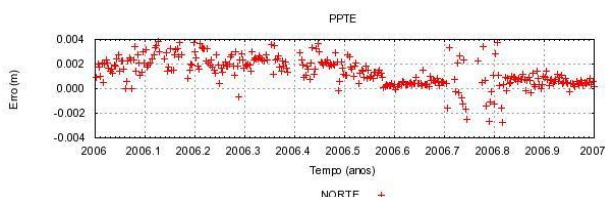


Figura 13 – Discrepância na componente Norte para a estação PPTE.

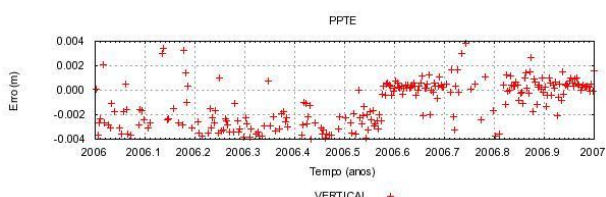


Figura 14 – Discrepância na componente Vertical para a estação PPTE.

Verifica-se, com base nas séries temporais representadas nas Figuras 9 a 14, que a discrepância varia de 1 a 4 mm, sendo maior para a componente vertical. Esses valores estão condizentes com os valores encontrados nos experimentos desenvolvidos por Fritsche et. al. (2005), em que se adota a mesma estratégia de processamento com o *software* Bernese.

## 5 CONCLUSÕES

Verifica-se que a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera não resulta em uma melhora significativa na obtenção das coordenadas ajustadas, ou seja, as correções atingem valores milimétricos. Contudo, no posicionamento de redes GNSS de alta precisão, tais correções são necessárias. Neste contexto, destaca-se a participação das estações da RBMC no processo de densificação da rede SIRGAS na América do Sul, cujas coordenadas apresentam precisões milimétricas, embora as correções dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera não tenham sido aplicadas, conduzindo conseqüentemente a efeitos sistemáticos na estimativa de suas coordenadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pelo apoio em forma de bolsa de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP/FCT e ao pesquisador Haroldo Antônio Marques por disponibilizar seu aplicativo para o desenvolvimento dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

FRITSCHÉ, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of higher-order ionospheric terms of GPS estimates, *Geophysical Research Letters*, v. 32, L23311, doi: 10.29/2005GL024342, dez. 2005.

GOAD, C. Surveying with the Global Positioning System. In PARKINSON, B. W.; SPILKER JR, J. J. *Global Positioning System: Theory and applications*. Washington: American Institute of Aeronautics, 1996. v. 1, Cap. 18.

MARQUES, F. A. **Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. 2002. 242 f. Phd dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin; New York: de Gruyter, 2003. 589p.