

Influência da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS

Paulo de Oliveira Camargo ¹
 João Francisco Galera Monico ¹
 Luiz Danilo Damasceno Ferreira ²

¹ FCT/Unesp / Departamento de Cartografia
 Rua Roberto Simonsen, 305 - CP 467
 19060-900 Presidente Prudente SP

² UFPR / Departamento de Geomática
 Centro Politécnico - CP 19011
 81531-990 Curitiba PR

✉ paulo@prudente.unesp.br
 ✉ galera@prudente.unesp.br
 ✉ danilo@geoc.ufpr.br

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Ionosfera
	3 Métodos para Correção da Refração Ionosférica
	4 Experimentos
	4.1 Posicionamento por Ponto
	4.2 Atraso Ionosférico Vertical
	5 Conclusões e Trabalhos Futuros
	6 Referências Bibliográficas

Resumo : A maior fonte de erro no posicionamento e navegação com GPS, na ausência da disponibilidade seletiva, é devida à refração ionosférica. Seu efeito causa atraso no código e avanço na fase, de uma mesma quantidade. A magnitude desse erro é afetada pelo movimento diurno do sol, estação do ano, ciclo solar, localização geográfica do receptor e campo magnético da Terra. Como é bem conhecido, esse efeito sistemático é o principal fator limitante no posicionamento de precisão quando se utiliza receptores de uma frequência, quer seja no posicionamento por ponto ou no posicionamento relativo de linhas bases médias e longas. Corrigindo as observáveis do efeito sistemático devido à ionosfera, através de um modelo representado pela série do tipo Fourier, foi possível obter uma redução média do erro da ordem de 80% para o posicionamento por ponto. Os parâmetros do modelo da ionosfera foram estimados a partir de dados coletados pelas estações GPS da RBMC. Neste trabalho são apresentados alguns experimentos realizados na FCT/UNESP, bem como uma análise detalhada dos resultados.

Palavras chave : Modelagem da ionosfera, TEC, refração ionosférica.

Abstract : The largest error source in the GPS positioning and navigation, in the absence of the selective availability, is due to the ionospheric refraction. Its effects cause a code delay and phase advance, of the same amount. The magnitude of this error is affected with time of day, season, solar cycle, geographical location of the receiver and magnetic field of the Earth. As it is well known, the ionosphere is the main drawback for high accuracy positioning when using single frequency receivers, either by point positioning or relative positioning of medium and long baselines. Correcting the observables of the systematic effects due to the ionosphere, through a model represented by a Fourier series type, a medium reduction of the error of the order of 80% was obtained for point positioning. The parameters of the model of the ionosphere were estimated from data collected by the active stations of RBMC. In this work some experiments accomplished in FCT/UNESP will be presented, as well as a detailed analysis of the results.

Keywords : ionosphere model, TEC, ionospheric refraction.

1 Introdução

As principais fontes de erros sistemáticos que afetam o posicionamento com GPS (*Global Positioning System*) estão associadas ao satélite (órbita, relógio, relatividade), a propagação do sinal (refração troposférica e ionosférica, interrupção do sinal, multicaminho), ao receptor/antena (relógio, canais, centro de fase da antena) e a estação (coordenadas, marés terrestres e oceânicas, movimento do polo.) (Monico, 1995). Parte destes erros podem ser modelados ou reduzidos se técnicas adequadas de rastreamento e processamento forem adotadas.

Na ausência da limitação imposta aos usuários civis pelo departamento de defesa (DoD) dos Estados Unidos, através da disponibilidade seletiva - SA (*Selective Availability*), desativada às 4 horas TU de 02 de maio de 2000, a ionosfera é a maior fonte de erro no posicionamento com GPS. O erro devido ao comportamento temporal da ionosfera, o qual depende de diversas variáveis, tais como: hora do dia, época do ano, ciclo solar, localização geográfica e atividade geomagnética, é difícil de ser corrigido. Por exemplo, durante a atividade solar máxima e para satélites próximos ao horizonte, ele pode ser maior que 100 metros (Newby et al., 1992), devido a redução na velocidade de grupo das frequências emitidas pelos satélites GPS.

Os receptores GPS de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato de que o efeito

depende da frequência do sinal. Esta estratégia permite obter resultados que são praticamente isentos desses efeitos, desde que realizada em épocas de atividade solar mínima. Entretanto, tais receptores são equipamentos caros, fazendo com que os de uma frequência, a maioria de uso civil, sejam amplamente empregados para determinação de linha de base, mesmo em condições não totalmente adequada. A desvantagem da utilização dos receptores GPS de uma frequência reside no fato de que os resultados do levantamento, para bases médias e longas, são afetados pelo efeito sistemático devido a ionosfera. O mesmo pode-se dizer do posicionamento por ponto. Porém, para bases curtas, com distâncias menores do que 10 Km, a posição relativa pode ser suficientemente acurada (Wells et al., 1986).

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, utilizando o modelo de Klobuchar (Klobuchar, 1987). Porém, vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito total (Newby et al., 1992). Desta forma, é necessário dispor de uma forma mais efetiva de eliminar os efeitos da ionosfera, a qual tem sido investigada a partir do uso de modelos regionais e locais da ionosfera.

Estudos sobre o uso de GPS no sul do Brasil e na região equatorial, mostraram que na América Central e na América do Sul as medidas de GPS são muitas vezes afetadas por diversas condições ionosféricas (Wanninger et al., 1991 e 1992) (Campos et al., 1993). Estas conclusões foram obtidas dos resultados de duas campanhas de GPS denominadas de BRASION'91 (BRASIL-IONosfera) e BRASION'92.

Atualmente, o Brasil dispõe de dados para a realização de estudo desta natureza, uma vez que a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Sistema de Posicionamento Global-GPS, que iniciou com 9 estações espalhadas pelo Brasil, coletando dados continuamente (Fortes, 1997). Atualmente, conta com 12 estações, duas delas, Brasília e Fortaleza, fazem parte da rede IGS (International GPS Service). As estações RBMC têm como um dos objetivos principais servir de base para o uso de posicionamento relativo e operam com receptores GPS de dupla frequência.

As estações da RBMC, conforme ilustrado na figura 1, estão localizadas em Bom Jesus da Lapa/BA (BOMJ), Brasília/DF (BRAZ), Cuiabá/MT (CUIB), Curitiba/PR (PARA), Fortaleza/CE (FORT), Imperatriz/MA (IMPZ), Manaus/AM (MANA), Presidente Prudente/SP (UEPP) e Viçosa/MG (VICO), Porto Alegre/RS (PORT), Recife/PE (RECF) e Salvador/BA (SALV).



Fig. 1 : Estações da RBMC

O objetivo principal deste trabalho é mostrar que corrigindo as observáveis GPS do efeito sistemático devido à ionosfera, é possível reduzir o erro no posicionamento. Além disso, objetiva-se prover um modelo matemático que possa representar aproximadamente as condições ionosféricas brasileiras. E assim, os usuários de GPS de receptores de uma frequência poderão obter melhores resultados. Os parâmetros do modelo da ionosfera são estimados a partir de dados coletados pelas estações GPS da RBMC.

2 Ionosfera

Normalmente é conveniente dividir a atmosfera, com respeito à propagação de sinais GPS, em troposfera e ionosfera, porque as condições particulares de propagação são bem diferentes. As camadas mais baixas da atmosfera terrestre, compreendida entre a superfície da Terra até aproximadamente 50 km, recebe o nome de troposfera. Constitui a zona neutra da atmosfera e a propagação do sinal depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura da camada atmosférica; neste caso a refração independe da frequência do sinal transmitido através dela, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (Leick, 1995). A parte superior estendendo-se aproximadamente entre 50 km e 1000 km recebe o nome de ionosfera. É formada por partículas ionizadas; nesta camada a propagação do sinal depende da frequência.

Os sinais GPS ao propagar através da atmosfera dinâmica sofrem diferentes tipos de influências, que podem provocar variações na direção de propagação, velocidade de propagação, na polarização e na potência do sinal. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, e faz que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço. O retardo é referido também como atraso ionosférico, e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal. O efeito da ionosfera, que depende da frequência, e consequentemente do índice de refração, é proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja, ao número de

elétrons presentes ao longo do caminho do satélite ao receptor. E o problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço.

O índice de refração da fase (+) e grupo (-), considerando somente os efeitos de primeira ordem, pode-se expresso, respectivamente por:

$$n_f = 1 \pm \frac{40,3 n_e}{f^2} \quad (1)$$

sendo n_e a densidade de elétrons e f a frequência do sinal. Resultando diferentes velocidades nos sinais, de modo que ocorram atraso no grupo e avanço na fase, pois a velocidade de grupo (V_g) é menor que a velocidade de fase (V_f). Consequentemente provocando um aumento nas distâncias obtidas a partir do código e uma diminuição nas obtidas a partir fase, de uma mesma quantidade.

A refração ionosférica (I_r^s), que representa o erro sistemático, ao longo da direção satélite (s) e receptor (r), no caso dos sinais modulado pelo código é dada por:

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

3 Métodos para Correção da Refração Ionosférica

Alguns métodos são empregados para determinar o efeito sistemático devido a refração da ionosfera na portadora L_1 dos receptores GPS de uma frequência. A quantificação deste efeito pode ser feita através dos (Camargo, 1999):

- Coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação - Modelo de Klobuchar;
- Observações coletadas com receptores GPS de uma frequência;
- Observações coletadas com receptores GPS de duas frequências.

Neste trabalho, somente no método que utiliza receptores de dupla frequência será apresentado. Na derivação do modelo, os erros devido ao não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides e da refração da troposfera, não serão considerados. Uma vez que estes efeitos contaminam cada uma das medidas efetuadas em ambas frequências da mesma maneira; assim não comprometerão o método, haja vista que haverá diferenciação entre as medidas; fazendo com que os mesmos sejam cancelados. O modelo é baseado na diferença entre as pseudo distâncias (P_x^s) das portadoras L_2 e L_1 (Georgiadiou, 1994):

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r + \varepsilon_{p21} \quad (3)$$

Porém:

$$I_{2r}^s - I_{1r}^s = 40,3 \text{ TEC}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} = I_{1r}^s \frac{1}{F} \quad (4)$$

Assim:

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = I_{1r}^s + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F\varepsilon_{p21} \quad (5)$$

A equação (5) é utilizada para o cálculo da correção ionosférica (I_{1r}^s) na portadora L_1 . As diferenças $(S_{p2}^s - S_{p1}^s)$ e $(R_{p2} - R_{p1})_r$ representam respectivamente o erro sistemático interfrequência dos satélites e dos receptores na portadora L_1 e ε_{p21} as diferenças dos demais erros, tais como os aleatórios e sistemáticos não eliminados.

O modelo desenvolvido para a ionosfera por Georgiadiou (1994) foi testado com dados GPS para a área coberta pelo Sistema Ativo de Referência GPS (AGRS) da Holanda, e consiste de uma modificação do modelo desenvolvido originalmente por Georgiadiou e Kleusberg, em 1988, para calcular o atraso ionosférico ao longo do caminho do satélite/receptor:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^u}{\cos(z^s)_r} \quad (6)$$

onde I_1^u representa o atraso ionosférico na vertical e z^s o ângulo de elevação do satélite, em relação a um plano, ou seja, a uma simples camada ionosférica de altitude h_m . A intersecção do vetor satélite/receptor com a camada ionosférica, define um ponto, que é designado de ponto ionosférico.

Assim:

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = \frac{I_1^u}{\cos(Z^s)_r} + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F \varepsilon_{p21} \quad (7)$$

O termo do lado esquerdo desta equação representa o atraso ionosférico na portadora L_1 , obtido através das medidas das pseudodistâncias em ambas frequências. Para modelar a correção ionosférica na direção da vertical, Georgiadiou (1994), devido a natureza periódica do efeito, utilizou a seguinte série:

$$I_1^u = a_1 + a_2 B^s + \sum_{h=2H+1}^s \{a_1 \cos(ih^s) + a_{h+1} \sin(ih^s)\} + a_{15} B^s h^s \quad (8)$$

A variável B^s representa a diferença entre as latitudes geográficas do receptor e a do ponto sub-ionosférico (projeção da latitude do ponto ionosférico, na camada ionosférica de altitude média h_m , sobre a superfície da Terra). A variável h^s é dada por:

$$h^s = \frac{2\pi}{T}(t - 14^h) \quad (9)$$

onde T representa o período de 24 horas e t a hora local do ponto sub-ionosférico.

Em seu experimento Georgiadiou (1994), agrupou os erros devidos as interferências e demais erros ($C^s = F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F \varepsilon_{p21}$) para cada satélite. Neste foram estimados em separados, portando o número total de parâmetros passam a ser $15+r+s$, onde os 15 primeiros representam os coeficientes da série, r corresponde ao erros sistemático devido a interferencia dos receptores, num total igual ao número de receptores utilizados na rede e s corresponde a interferência dos satélites, num total igual ao número de satélites rastreados para determinação dos parâmetros do modelo. Porém isto leva a um sistema de equações normais singular. A singularidade será eliminada com a introdução de inunções iguais ao número de deficiência de característica, que no caso é uma. Isto implica que as diferenças das tendências dos receptores ou satélites têm que ser determinados em relação a um deles. A inunção pode ser introduzida num dos receptores ou num dos satélites. Um valor tem que ser atribuído para a diferença entre as tendências $(R_{p2} - R_{p1})_r$ do receptor (r_i), bem como um padrão para a inunção.

4 Experimentos

Um programa em FORTRAN Lahey 95 foi elaborado para estimar os parâmetros do modelo, que consistem dos coeficientes da série, das interferências em L_1 , devidos aos satélites e receptores. Estes parâmetros são estimados através do ajustamento pelo MMQ, utilizando o método das equações de observação com inunção. Controle de qualidade baseado no teste estatístico Qui-quadrado (χ^2) foi implementado para a análise da qualidade do ajustamento (Teunissen, 1985), bem como o teste de significância dos parâmetros, com objetivo de validar os parâmetros da série utilizada (Zhong, 1997). O programa computacional desenvolvido permite estimar os coeficientes do modelo, e a partir destes e do conhecimento de um valor aproximado para a latitude, longitude e altitude da estação pode-se efetuar correções nas observáveis realizadas com a portadora L_1 . O arquivo de observação utilizados para calcular os coeficientes, bem como os que serão corrigidos, devem estar no formato RINEX (Rinex Independent EXchange format). Isto viabiliza o processamento dos dados em qualquer software GPS, haja vista que eles devem aceitar o formato RINEX.

Nos experimentos realizados, com dados de nove estações da RBMC, para estimar os parâmetros do modelo adotou-se o valor de 400 Km para a altitude média da camada ionosférica. As observáveis de pseudodistâncias utilizadas foram filtradas pela fase das portadoras (Jin, 1996).

4.1 Posicionamento por Ponto

Uma das formas de analisar a qualidade do modelo implementado é comparar os resultados obtidos com a adoção do modelo, com os considerados verdadeiros. No caso em questão adotou-se como "verdade de terreno", as coordenadas SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul), época 1995,4, da estação UEPP. Essas coordenadas foram transformadas para as épocas do posicionamento, usando-se o modelo NNR-NUVEL-1A (*No Net Rotation – Northern University Velocity Model - 1A*) (McCarthy, 1996). Vale ressaltar que a estação UEPP não participou do conjunto das estações que proporcionaram dados para estimar os parâmetros do modelo, o que nos leva a resultados independentes.

Para posicionamento por ponto, a partir das observações de pseudodistância (C/A), utilizou-se dos dados da estação UEPP coletados em 1998 e abrangendo uma semana de cada uma das quatro estações do ano. Os valores estimados para as coordenadas cartesianas (X, Y, Z) foram comparados com os valores considerados *verdadeiros*. Considerou-se os casos sem correção do efeito da ionosfera (SCI) e com correção do efeito da ionosfera (CCI).

No posicionamento utilizou-se as efemérides precisas e correções do relógio dos satélites geradas pelo GSD/NRCan. Isto teve como objetivo eliminar os efeitos da disponibilidade seletiva (SA) que era a maior fonte de erro no posicionamento por ponto. Visando não considerar posições estimadas com pobre geometria dos satélites, adotou-se para a diluição da precisão geométrica (GDOP) valor igual ou menor do que 7. A precisão (s_p) da pseudodistância foi adotado como sendo de 3 m. Os dados meteorológicos utilizados para correção troposférica foram coletados na estação meteorológica da FCT/Unesp. Para o processamento dos dados foi utilizado o software GPSPACE Versão 3.2, desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division, do Natural Resources Canada* (NRCan, 1997).

Na figura 2 encontra-se as discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da estação UEPP tomadas como verdadeiras e as

estimadas (SCI e CCI) para um período de 24 horas.

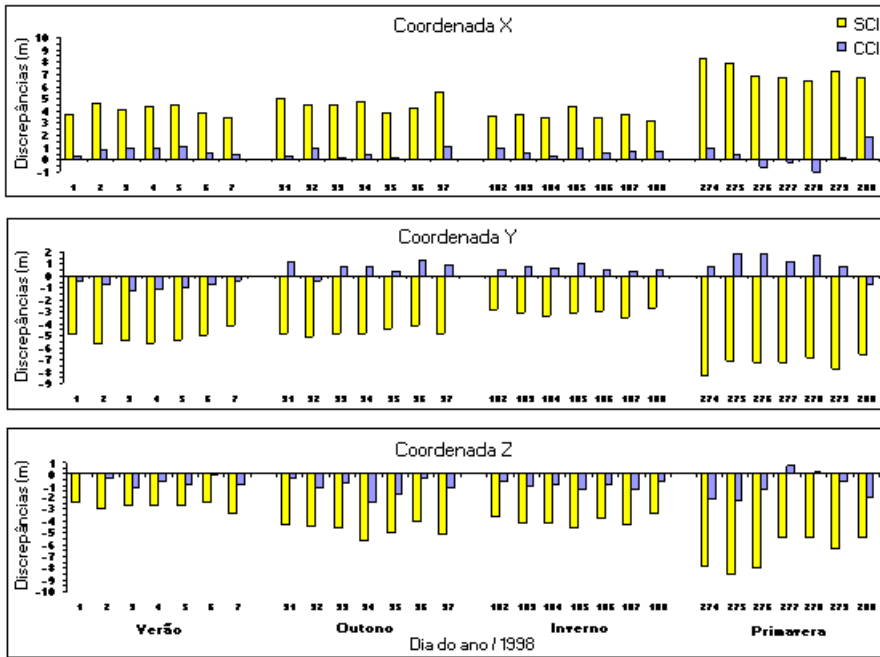


Fig. 2 : Discrepâncias entre as coordenadas - Estação UEPP

A média das discrepâncias indicam diferenças melhores do que um metro para as coordenadas cartesianas, em termos do erro resultante, houve uma redução da ordem de 80,0%, que corresponde a uma redução do erro de 8,44 m para 1,61 m. Em termos de valores máximo e mínimo, tem-se 14,21 m e 5,33 m, respectivamente, para o caso sem correção do efeito sistemático da ionosfera, que após a correção passaram ser 2,96 m e 0,55 m.

A tabela 1 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos no experimento. Entre parênteses, está indicada a porcentagem de melhoras conseguidas, com a correção do erro sistemático, devido à ionosfera. A acurácia e a precisão (1s) representam os valores para cada época relativa à média.

Tabela 1 : Resumo das resultantes obtidos no posicionamento por ponto.

Valores	Resultante					
	Discrepância (80,7%)		Acurácia - 1σ (54,3%)		Precisão - 1σ (30,5%)	
	SCI	CCI	SCI	CCI	SSI	CCI
Máximo	14,21 m	2,96 m	17,47 m	9,22 m	11,01 m	8,72 m
Mínimo	5,33 m	0,55 m	7,31 m	2,76 m	3,61 m	2,53 m
Médio	8,44 m	1,61 m	10,72 m	5,94 m	6,56 m	4,63 m

Em termos de latitude, longitude e altitude geométrica, as resultantes das discrepâncias, da acuracidade e da precisão são similares às obtidas com as coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Por exemplo, a figura 3 mostra o comportamento da altitude geométrica para o posicionamento por ponto. Nela se concentra a maior influência do erro sistemático, devido à ionosfera.

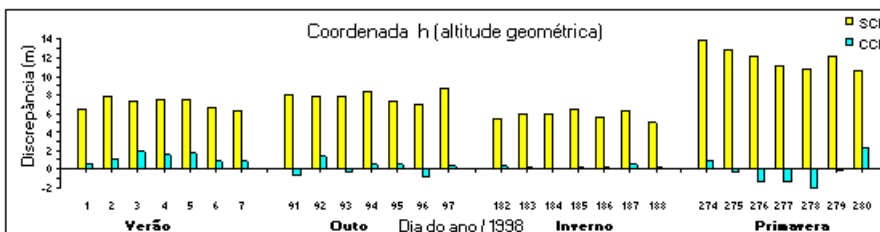


Fig. 3 : Discrepâncias em altitude geométrica – Estação UEPP

Os valores, máximo e mínimo, para as discrepâncias das altitudes, sem a correção, foram de 13,86 m e 5,03 m, com uma média de 8,20 m, ao passo que, após a correção, os mesmos assumiram magnitudes bem menores, da ordem 2,34 m e -1,92 m, respectivamente, para o máximo e mínimo, com uma média de 0,36 m. Para o erro médio quadrático, os valores máximo, mínimo e médio foram, respectivamente, de 8,00 m, 0,83 m e 3,68 m, após a correção do efeito da ionosfera, ao passo que os valores sem correção foram de 16,50 m, 7,04 m e 10,06 m. Valores similares foram obtidos, para o desvio padrão da altitude, após a correção, respectivamente de 7,99 m, 1,81 m e 3,69 para os valores máximo, mínimo e médio, que, sem a correção, foram de 10,21 m, 2,21 m e 5,77 m.

Com o objetivo de mostrar o comportamento das coordenadas cartesianas, com e sem o erro sistemático, devido à ionosfera, durante as 24 horas do dia, serão mostradas as posições estimadas para cada época. A figura 4 mostra as posições para o primeiro dia do experimento.

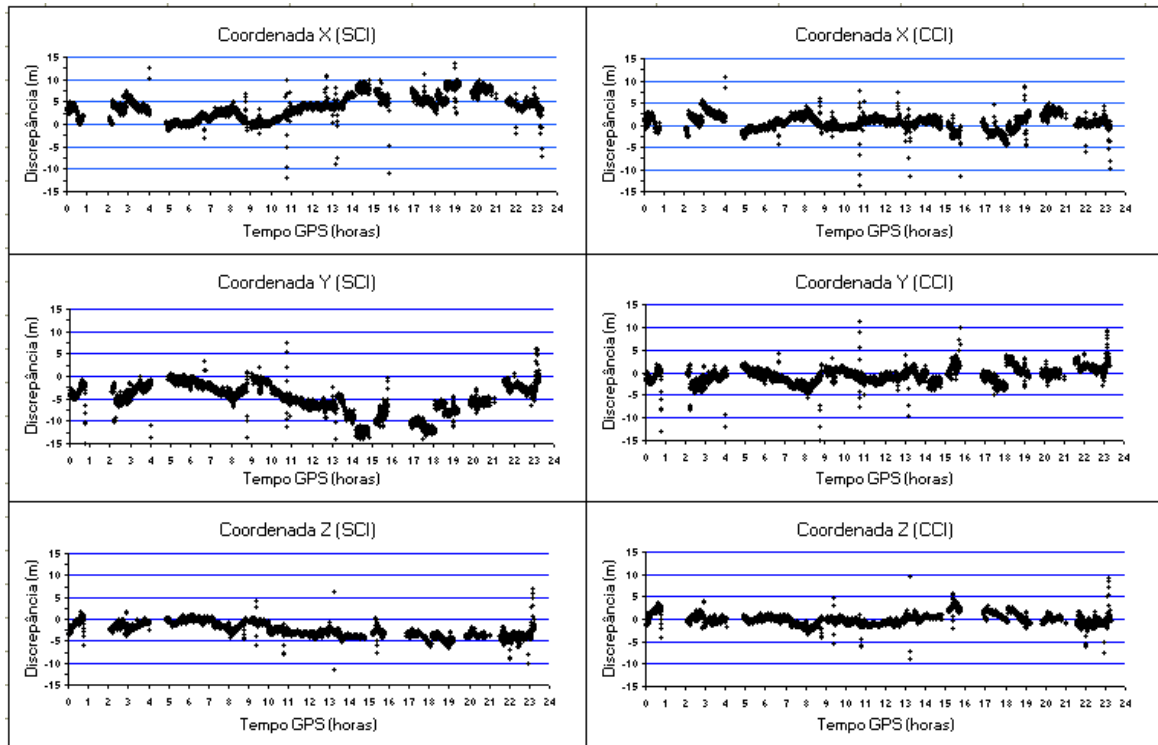


Fig. 4 : Posicionamento por ponto – Estação UEPP (001/1998)

Na solução época por época, os resultados mostram o comportamento das coordenadas SCI e os resultados melhorados (CCI), durante 24 horas. O máximo efeito, como é de se esperar, ocorreu às 17 horas do tempo GPS (14 horas local).

4.2 Atraso Ionosférico Vertical

Com o objetivo de se mostrar o comportamento do erro sistemático, durante o período de 24 horas do dia, foi elaborada a figura 5 para o dia 001/1998 da estação UEPP. Ela mostra o atraso ionosférico observado e projetado na vertical ($I_{1\text{obs}}^u$), em função da hora local (t) do ponto ionosférico e da diferença (B^s) entre a da latitude do ponto sub-ionosférico e latitude da estação UEPP. O atraso ionosférico vertical observado é calculado por meio da equação:

$$I_{1\text{obs}}^u = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_{2r}^s - P_{1r}^s) \cos(z^s)_r \quad (10)$$

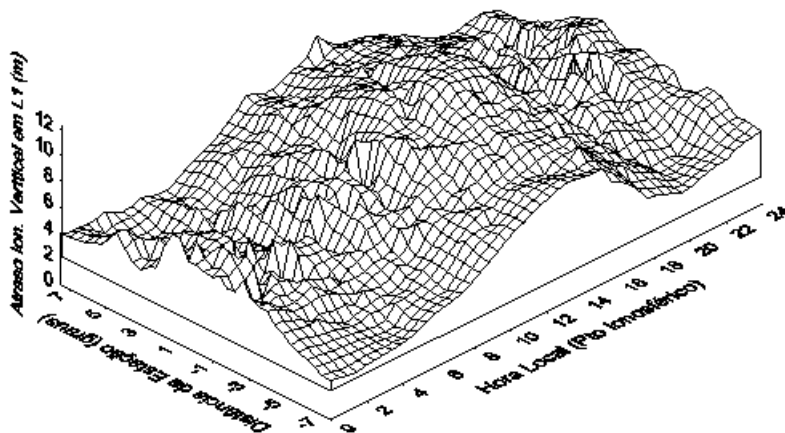


Fig. 5 : Atraso ionosférico vertical observado– Estação UEPP (001/1998)

Convém salientar que, na figura 5, o atraso ionosférico vertical observado contém o erro sistemático interferência do receptor e dos satélites. Na realidade, o eixo Z da figura representa o atraso, devido à ionosfera, acrescido do erro interferência em L_1 .

Após estimar os coeficientes do modelo, utilizando-se das demais estações da RBMC, calculou-se as correções, devido à ionosfera, para a estação GPS em questão. A figura 6 mostra o atraso ionosférico vertical ($I_{1\text{calc}}^u$), calculado para o dia 001/1998, com o modelo

adotado, a partir da equação (8).

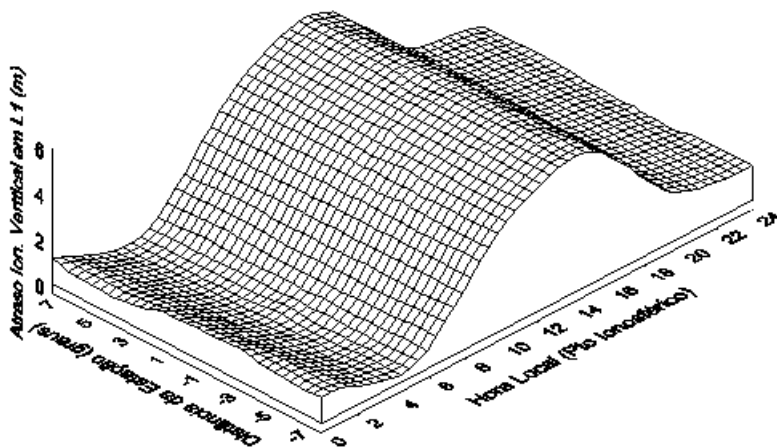


Fig. 6 : Atraso ionosférico vertical estimado – Estação UEPP (001/1998)

Pode-se notar, através da figura 6, que a atividade máxima diária da ionosfera se dá próximo às 14:00 horas local.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O posicionamento por ponto, com a pseudodistância, indicou que a série utilizada para estimar os efeitos sistemático da ionosfera é apropriado para estes fins, pois proporcionou resultados da ordem do metro para as coordenadas cartesianas. A componente resultante máxima foi de 2,96 m e mínima de 0,55 m, representando uma correção média de 80,0% em relação as obtidas sem a correção.

Em trabalhos futuros novos experimentos serão realizados utilizando outras funções, tais como: harmônicos esféricos e polinômios, para modelar o efeito sistemático da ionosfera. Testes com dados coletados durante o período de máxima atividade solar, que ocorrerá por volta do ano 2000-2001 e cintilação ionosférica, também serão realizados. Além disso, mapas da ionosfera, que representem o erro sistemático da ionosfera na portadora L_1 ou conteúdo total de elétrons, para a América do Sul serão produzidos.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com recursos financeiros de FAPESP (contrato 95/08775-1) e CAPES/PICD.

6 Referências Bibliográficas

Camargo, P.O.: *Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência*, Curitiba, 1999. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná.

Campos, M.A.; Wanninger, L.; Seeber, G.: *Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS*. In: 3o. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro/RJ, 7 a 11 de novembro, 1993, p.601-604. (Resumos Expandidos).

Fortes, L.P.S.: *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*, Rio de Janeiro, 1997. Dissertação (Mestrado), IME.

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

Georgiadiou, Y.: *Modeling the ionosphere for an active control network of GPS stations*, LGR-Series - Publications of the Delft Geodetic Computing Centre, Delft University of Technology, n.7, 1994.

Jin, XX.: *Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results*, Delft, 1996. Thesis, Delft University of Technology.

Klobuchar, J.A.: *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v.AES-23, n.3, 1987, p.325-331.

Leick, A.: *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, New York, 1995.

McCARTHY, D.D.: *IERS Conventions*, IERS Technical Note. Observatoire de Paris, Paris, IERS Technical Note 21, July, 1996.

Monico, J.F.G.: *High Precision GPS Inter-continental Networks*, Nottingham, 1995. Ph.D. Thesis, University of Nottingham.

Newby, S.P.; Langley, R.B.: *Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model?*, In: Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, 1992, v.1, p.240-244.

NRCan: *User's Guide – GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides – Version 3.2)*, Canadian Active Control System Operations, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada, 1997.

Teunissen, P.J.: *Quality control in geodetic networks*. In: Optimization and design of geodetic networks, Berlin: Springer-Verlag,

1985, p.526-547.

Wanninger, L.; Seeber, G.: *Campos, M.A.: Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions.* In: IAG Symposium 111, Heidelberg, Aug. 13, 1991.

Wanninger, L.; Seeber, G.; Campos, M.: *Limitations of GPS in equatorial regions due to the ionosphere.* In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, May 10-14, 1993. In: International Conference Cartography - Geodesy, Maracaibo, Venezuela, Nov. 24 - Dec. 4, 1993.

Wells, D.; Beck, N.; Delikaraoglou, D.; Kleusberg, A.; Krakiwsky, E. J.; Lachapelle, G.; Langley, R. B.; Nakiboglu, M.; Schwarz, K. P.; Tranquilla, J. M.; Vanicek, P.: *Guide to GPS positioning.* Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1986.

Zhong, D.: *Robust estimation and optimal selection of polynomial parameter for the interpolation of GPS heights.* Journal of Geodesy, v.9, n.71, 1997, p.552-561.

