

AVALIAÇÃO DE UM MODELO IONOSFÉRICO LOCAL EM REDES GPS: ESTUDO DE CASO PARA UM PERÍODO DE BAIXA ATIVIDADE SOLAR

Evaluation of a local ionosphere model in GPS networks: a case study of a period of low solar activity

MAURICIO IHLENFELDT SEJAS¹
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER²
BERNHARD HECK³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Curso de Engenharia Ambiental, Francisco Beltrão – PR
msejas@utfpr.edu.br

²Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências da Terra
Departamento de Geomática, Curitiba – PR
ckrueger@ufpr.br

³Universidade de Karlsruhe (TH)
Instituto de Geodésia de Karlsruhe – Alemanha
heck@kit.edu

RESUMO

Este estudo tem por objetivo avaliar um modelo ionosférico local que emprega um conjunto de estações GPS, de dupla frequência, para gerar correções ionosféricas. Estas correções permitem que observações de estações de uma frequência localizadas nas proximidades da rede, sejam corrigidas do erro devido à refração ionosférica. O modelo proposto foi avaliado segundo: número de satélites observados simultaneamente por todas as estações da rede; valores do conteúdo total de elétrons observado e o estimado em rede; e, coeficientes do modelo matemático que descrevem o erro. O modelo foi testado por meio do posicionamento por ponto simples, onde somente observações do código foram empregadas. Sete estações da RBMC foram escolhidas para os experimentos e as observações foram coletadas em um período de baixa atividade solar. O programa

para o processamento por ponto utilizado foi o Bernese, onde foram utilizados produtos precisos (órbita e relógio) e foi gerada uma única solução envolvendo todas as épocas de observação. Os resultados do posicionamento por ponto para os experimentos conduzidos neste trabalho mostram uma melhora na solução (em termos de discrepâncias) de aproximadamente 50% para a planimetria e de 74% para a altimetria, quando comparados com o processamento sem considerar qualquer correção ionosférica.

Palavras-chave: GPS; Ionosfera; TEC.

ABSTRACT

The goal of this study is to evaluate a local ionosphere model that uses a set of double-frequency GPS receivers for generating ionospheric corrections. These corrections allow single frequency receivers, located at the neighborhood of the network, to correct their raw observations from the ionospheric delay. The proposed model was evaluated as follows: according to the number of satellites observed simultaneously for all network stations; the observed and interpolated total electron content; and, the coefficients from a mathematical model that describe the error. The model was tested in single point positioning, where only code observations were used for data processing. Seven RBMC stations were chosen for experiments and the data were obtained from a period of low solar activity. The Bernese software was used for data processing and precise products (orbit and clocks) were used. The final solution is estimated using all observation epochs. For the experiments performed in this work, results from single point positioning show an improvement about 50% for the horizontal component and 74% for the height component, when they are compared with a processing without any ionospheric correction.

Keywords: GPS; Ionosphere; TEC.

1. INTRODUÇÃO

A ionosfera é constituída por camadas que se estendem de 50 a 1.000 km, e é um meio dispersivo em relação às frequências da banda L do GPS (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001). Desta forma, o atraso ionosférico depende da frequência utilizada, e esta propriedade permite que este erro seja estimado quando se empregam observações das duas frequências.

Sabe-se que o efeito de primeira ordem do atraso ionosférico é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*), e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. O TEC é definido como sendo o número total de elétrons contidos em uma coluna de seção transversal de 1 m^2 que se estende ao longo do caminho entre as antenas dos satélites e a do receptor (LEICK, 2004) e pode ser obtido diretamente das observações do código nas duas frequências.

A necessidade de utilizar receptores GPS de dupla frequência para eliminar a maior parte do erro devido à refração ionosférica, para o posicionamento absoluto ou relativo com linhas de base longas, restringe o número de usuários, principalmente devido ao alto custo destes equipamentos. Outra possibilidade para reduzir esse efeito sobre as observações GPS é o emprego de modelos ionosféricos. Um dos modelos mais versáteis é o modelo de Klobuchar, também conhecido como modelo transmitido (*broadcast*). Uma função cosseno é utilizada para representar as variações diurnas do TEC para ser utilizado por usuários com receptores de uma frequência (KLOBUCHAR, 1996). Os oito coeficientes do modelo são transmitidos pelas mensagens de navegação, e segundo Leick (2004), ele consegue estimar somente algo em torno de 50-60% do atraso ionosférico.

Atualmente, vários centros de pesquisa desenvolvem mapas de ionosfera que contêm valores de TEC para uma grade de pontos. Na Europa o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), por exemplo, emprega harmônicos esféricos para descrever a ionosfera regional e globalmente, além de produzir mapas preditos. Na América do Sul, a Faculdade de Ciências Astronômicas e Geofísicas da Universidade Nacional de La Plata, Argentina, desenvolveu um modelo global de ionosfera denominado LPIM (*La Plata Ionospheric Model*), que também emprega harmônicos esféricos na modelagem (AZPILICUETA *et al.* 2006).

No Brasil, observa-se o crescente interesse de pesquisadores no sentido de estimar o efeito da refração ionosférica e estudar o seu comportamento. Uma sequência de estudos vem sendo desenvolvidos pelo Departamento de Cartografia da FCT/UNESP ao longo dos anos. CAMARGO (1999) desenvolveu o modelo regional de ionosfera (Mod_Ion), analiticamente representado pela Série de Fourier, e que utiliza um conjunto de estações GPS de dupla frequência. Melhoramentos e novas implementações foram introduzidas posteriormente por MATSUOKA (2003) e AGUIAR (2005). MATSUOKA (2007) apresentou uma pesquisa que teve como principal objetivo estudar o comportamento da ionosfera na região brasileira em diferentes condições ionosféricas, além de avaliar a performance e as limitações dos mapas globais de ionosfera, desenvolvidos pelo IGS (*International GNSS Service*), aplicados no posicionamento por ponto no Brasil.

Constata-se que pesquisadores de outros centros também estão atuando nessa área. FEDRIZZI (1999) estudou a variação diurna, latitudinal e sazonal do TEC estimado pelo IGS na região sul americana e da Península Antártica, comparando com modelos empíricos de ionosfera. FONSECA JUNIOR (2002) empregou um programa científico para a criação de uma série histórica do comportamento da refração ionosférica, abrangendo um intervalo de tempo que contemplava períodos de ciclo solar com máxima e mínima atividade. VERONEZ (2004) desenvolveu um método para modelar o atraso ionosférico por meio de um polinômio de segundo grau, baseado no ajustamento sequencial de observações.

Em um trabalho mais recente, ARMENDARIS *et al.* (2009) utilizaram mapas de ionosfera, gerados pelo IGS para o região sul do Brasil, para corrigir as

pseudodistâncias da refração ionosférica. Os resultados do posicionamento por ponto (*single point positioning*) mostraram que a aplicação do modelo permitiu uma melhora média na determinação planimétrica de 44% e na altimétrica de 77%. SALOMONI *et al.* (2009) avaliaram o comportamento diário e sazonal do TEC, além do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar na região brasileira. Os resultados mostraram a existência de uma relação direta entre a melhora na qualidade do posicionamento em função da diminuição da densidade de elétrons na ionosfera em períodos de baixa atividade solar. Observaram também a forte influência da Anomalia Equatorial sobre o posicionamento por ponto.

Diferente das técnicas que estimam um conjunto de coeficientes, de um modelo matemático que descreve a ionosfera, que são válidos para todos os satélites e para todas as épocas, neste estudo são estimados coeficientes independentes para cada satélite e para cada época de observação. Como a modelagem é realizada independentemente para cada satélite e em cada época, a área coberta por um determinado satélite na camada ionosférica, em relação a um conjunto de estações de referência, é menor do que aquela que seria coberta por vários satélites em relação às mesmas estações de referência. Desta forma, assume-se que os erro ionosférico apresenta um comportamento aproximadamente linear na área coberta pelo satélite, então um modelo matemático linear é utilizado para descrever o erro. WEBSTER (1993) aplicou uma superfície linear na modelagem ionosférica, empregando as duplas diferenças de fase como observável básica de processamento, para geração de correções ionosféricas independentes para cada satélite e para cada época. Outros autores como ALVES *et al.* (2005) citam a possibilidade de empregar superfícies lineares na modelagem ionosférica diferencial em redes RTK quando as correções são geradas para cada satélite em cada época. Modelos matemáticos mais complexos podem ser aplicados, no entanto, exigem um maior número de estações de referência.

Assim, este estudo vem contribuir no sentido de utilizar a atual configuração da RBMC, com estações distantes entre 280 km e 690 km (na região de estudo: sul do Brasil e parte do estado de São Paulo) para gerar correções ionosféricas locais em rede. A qualidade das correções geradas é avaliada e o modelo é testado por meio de um posicionamento por ponto simples, no modo pós-processado.

2. DETERMINAÇÃO ABSOLUTA DO TEC

A equação para a pseudodistância do código entre um satélite j e uma estação r , para as frequências L_1 e L_2 , denotadas por $P_{r,1}^j, P_{r,2}^j$, podem ser dadas por (LIU, 2004):

$$P_{r,1}^j = \rho_r^j + c(\delta\tilde{\alpha}_r - \delta\tilde{\alpha}^j) + O^j + T_r^j + I_{r,1}^j + B_{r,1} + B_1^j + M_{r,1}^j + \varepsilon_{r,P_1} \quad (1)$$

$$P_{r,2}^j = \rho_r^j + c(\delta\tilde{\alpha}_r - \delta\tilde{\alpha}^j) + O^j + T_r^j + \gamma I_{r,1}^j + B_{r,2} + B_2^j + M_{r,2}^j + \varepsilon_{r,P_2} \quad (2)$$

onde: ρ_r^j é a distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor (m), c é a velocidade da luz no vácuo (m/s); δ_r e δ^j são os erros do relógio da estação e do satélite (s); O^j é o erro orbital (m); T_r^j erro devido à refração troposférica (m); $I_{1,r}^j$ erro devido à refração ionosférica para a frequência L_1 (m); $B_{r,1}, B_{r,2}$ são os erros instrumentais do receptor nas frequências L_1 e L_2 (m); B_1^j, B_2^j são os erros instrumentais do satélite em L_1 e L_2 (m); $M_{r,1}^j, M_{r,2}^j$ são os erros de multicaminho para o código em L_1 e L_2 (m); $\varepsilon_{r,P_1}, \varepsilon_{r,P_2}$ são os resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados na estação para os códigos nas duas frequências (m); e γ é uma constante igual a: $\gamma = (f_1 / f_2)^2 = (154 / 120)^2 = 1,646\dots$

Partindo-se das equações 1 e 2, a combinação linear livre de geometria pode ser formada (equação 3), onde se observa que os termos referentes ao relógio dos satélites e do receptor, distância geométrica e refração troposférica foram cancelados. Por conveniência, os índices j e r , que se referem ao satélite e ao receptor foram omitidos em alguns termos.

$$P_1 - P_2 = (1 - \gamma)I_1 + B_r + B^j + \varepsilon_{P_2} \quad (3)$$

Neste caso, considerou-se que o efeito devido ao multicaminho foi minimizado a ponto de ser negligenciado. Alguns cuidados podem ser tomados para minimizar o efeito devido à essa fonte de erro, como: escolha criteriosamente do local de instalação de antenas GNSS e emprego de antenas especiais.

O atraso instrumental do receptor para o código P_1 foi combinado com o do código P_2 , resultando no termo $B_r = B_{r,1} - B_{r,2}$, que representa o atraso instrumental do receptor r entre as frequências L_1 e L_2 . De forma equivalente, o atraso instrumental para o satélite j entre as frequências L_1 e L_2 foi definido como: $B^j = B_1^j - B_2^j$. Os termos B_r e B^j são conhecidos também como *differential code biases* (DCB).

O efeito de primeira ordem para o atraso ionosférico (I_1) é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência (f), segundo a equação (4) (KLOBUCHAR, 1996), escrita para a frequência L_1 :

$$I_1 = \frac{40,3}{f_1^2} TEC \quad (4)$$

Verifica-se que o efeito devido à refração ionosférica é maior para frequências mais baixas. Inserindo a equação (4) na (3) e negligenciando o último termo da

equação (3), depois de algumas manipulações se chega à seguinte equação (LIU, 2004):

$$TEC = \frac{f_1^2 [(P_1 - P_2) - B_r - B^j]}{40,3(1 - \gamma)} \quad (5)$$

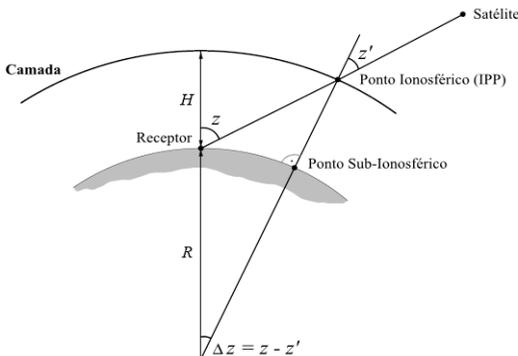
Esta equação mostra que o conteúdo total de elétrons (TEC) pode ser calculado diretamente a partir das observações do código, desde que o DCB dos satélites e do receptor sejam conhecidos. A unidade do TEC calculado pela equação (5) está em elétrons/m², mas por conveniência utiliza-se a unidade TECU (*TEC Unit* – unidade TEC), bastando dividir a quantidade TEC (em el/m²) por 1.10¹⁶ (el/m²) (LIU, 2004).

Para reduzir o ruído das observáveis (P_1 e P_2), aplicou-se no cálculo do TEC a técnica de suavização da pseudodistância. Esta técnica combina as não ambíguas, porém imprecisas medidas dos códigos, com as ambíguas, no entanto precisas medidas de fase das ondas portadoras. Informações adicionais sobre esta técnica podem ser encontradas em HOFMANN-WELLENHOF *et al.* (1997).

3. MODELO DA CAMADA IONOSFÉRICA

No modelo da camada ionosférica, ou SLM (*Single Layer Model*), supõe-se que todos os elétrons livres estão concentrados em uma camada esférica de espessura infinitesimal a uma altitude H sobre a superfície da Terra. Este modelo reduz a complicada estrutura da ionosfera em uma única camada (WILD, 1994). A altura da camada usualmente varia entre 350 e 400 km, valor que corresponde aproximadamente ao maior pico da densidade de elétrons na região F da ionosfera (SCHAER, 1999). A figura 1 é uma representação deste modelo.

Figura 1 – Modelo da camada ionosférica.



FONTE: Adaptado de SCHAER (1999).

O TEC inclinado (na direção satélite-estação) e o VTEC (na direção do zênite) são relacionados por uma função de mapeamento $F(z)$, segundo:

$$TEC = F(z).VTEC \quad (6)$$

Para o modelo da camada ionosférica, pode-se empregar a seguinte função de mapeamento $F(z)$ (SCHAER, 1999):

$$F(z) = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(z')}} ; \sin(z') = \frac{R}{R+H} \sin(z) \quad (7)$$

onde:

z : distância zenital do satélite;

z' : distância zenital do satélite no ponto ionosférico;

R : raio médio da Terra (por exemplo: 6.371 km);

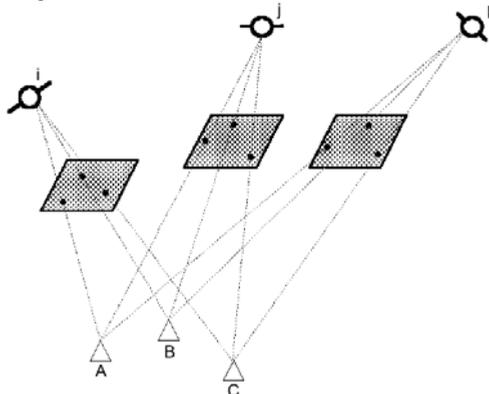
H : altitude da camada (por exemplo: 350 km);

IPP : ponto ionosférico (*ionospheric pierce point*): é o ponto de interseção da linha satélite-receptor com a camada ionosférica. Sua projeção sobre a superfície é chamada de ponto sub-ionosférico.

4. MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL EM REDES GPS

O modelo proposto neste trabalho para correção do efeito da refração ionosférica em redes GPS é baseado em WEBSTER (1993). No modelo desenvolvido pelo autor foram empregadas observações de fase da onda portadora, de receptores de dupla frequência, de três estações para estimar correções que foram aplicadas em estações de frequência única localizadas nas proximidades da rede. Uma superfície linear foi utilizada para descrever o erro na rede para cada satélite em cada época (figura 2). WANNINGER (1995) trata este modelo como *Modelo Diferencial da Ionosfera*.

Figura 2 – Modelo diferencial da ionosfera.



FONTE: Adaptado de WANNINGER (1995).

4.1 Modelo Matemático

A idéia por trás da modelagem apresentada neste trabalho consiste em empregar um conjunto de três estações de referência, cujos receptores coletam observações do código nas duas frequências, para gerar correções ionosféricas locais, independentes para cada satélite em cada época de observação. A geração de correções para cada época permite que rápidas variações de TEC sejam monitoradas e levadas em consideração. Para o cálculo do TEC é utilizado o código suavizado pela fase da onda portadora.

Quando um determinado satélite é observado por um conjunto de estações de referência, o conteúdo total de elétrons (TEC) é calculado para cada par satélite-receptor, em cada época. Para tanto, emprega-se o modelo de camada simples localizado a 350 km de altitude, onde os valores do TEC são transformados em valores verticais (VTEC) por meio da função de mapeamento padrão deste modelo (equação 7).

Um polinômio de primeiro grau, que descreve uma superfície linear, é empregado na modelagem (equação 8). O modelo utilizado para descrever o efeito devido à ionosfera na rede é linear, pois, assume-se que a variação do VTEC na área coberta por um determinado satélite (em relação a um conjunto de estações de referência), para cada época, é aproximadamente linear. Mas é importante notar que essa hipótese pode não ser válida em períodos de maior atividade solar ou em regiões onde ocorrem maiores anomalias ionosféricas.

$$(VTEC - VTEC_0) = a_\varphi(\varphi - \varphi_0) + a_\lambda(\lambda - \lambda_0) \quad (8)$$

O termo à esquerda da igualdade representa as simples diferenças dos VTEC entre uma estação qualquer ($VTEC$) e o da estação mestra ($VTEC_0$), e os termos “ a ” são os coeficientes do modelo matemáticos, aqui denominados *coeficientes de rede*, em latitude (φ) e longitude (λ). Estes coeficientes são estimados para cada satélite em cada época observada e representam as variações do conteúdo total de elétrons em cada direção. Os termos φ_0 e λ_0 são a latitude e longitude do ponto ionosférico calculado em relação à estação mestra.

Particularizando para três estações de referência (A , B e C), sendo a primeira a estação mestra, e para o satélite j , um sistema de equações pode ser escrito na forma matricial como:

$$L = AX; \begin{bmatrix} VTEC_{AB}^j \\ VTEC_{AC}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{AB} & \Delta\lambda_{AB} \\ \Delta\varphi_{AC} & \Delta\lambda_{AC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_\varphi^j \\ a_\lambda^j \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde os elementos do vetor L são as simples diferenças do VTEC entre duas estações (estação mestra A e as outras estações de referência B ou C) e um satélite (j), e os termos $\Delta\varphi_{AB}$ e $\Delta\lambda_{AB}$ são as diferenças (em latitude e longitude) entre os pontos ionosféricos da estação mestra e das outras estações da rede.

Os coeficientes de rede são estimados algebricamente por:

$$\hat{X} = A^{-1}L \quad (10)$$

onde:

\hat{X} : vetor dos parâmetros estimados;

A : matriz das derivadas parciais das funções em relação aos parâmetros (não singular);

L : vetor das observações.

Considerando mais que três estações de referência, os coeficientes podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados, permitindo também estimar a precisão destes parâmetros.

Conhecendo as coordenadas geodésicas aproximadas da estação que se deseja posicionar, e os coeficientes de rede, valores de VTEC são interpolados para esta estação, permitindo que as correções ionosféricas, estimadas em rede, sejam usadas para corrigir as observações originais da estação.

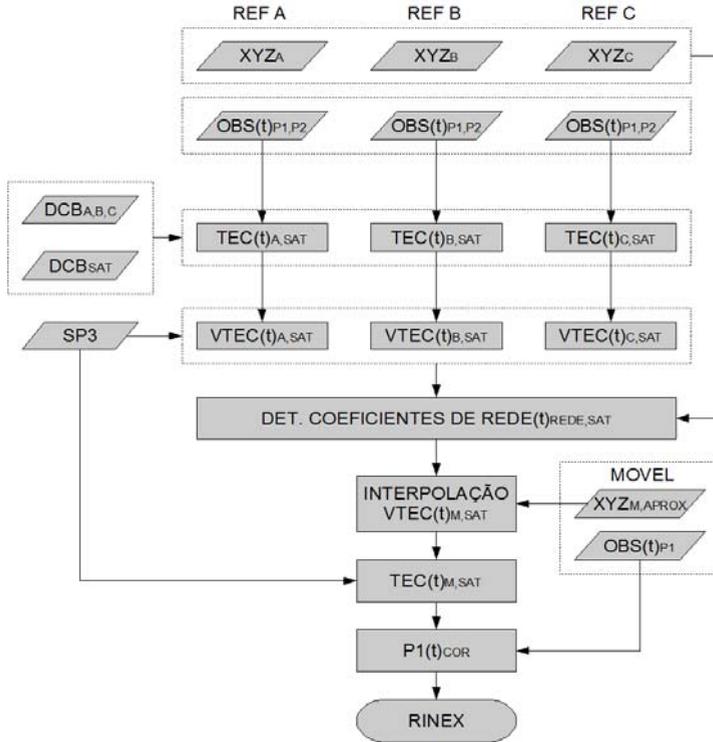
Observa-se que a distribuição geográfica das estações de referência que compõe uma determinada rede deve ser realizada com cuidado, pois caso sejam distribuídas de forma colinear, ou quase colinear, podem ocorrer problemas na estimativa dos parâmetros devido ao mau condicionamento do sistema.

4.2 Programa para a Modelagem Ionosférica Local em Redes GPS

Um programa foi desenvolvido para a modelagem ionosférica local em redes GPS e correção das observações de estações de uma frequência (SEJAS, 2009). Escrito em linguagem de programação C++, ele obedece ao fluxograma apresentado na figura 3.

Os dados de entrada do programa são arquivos RINEX de observação de cada estação (REF), efemérides precisas no formato SP3 e arquivos contendo informações do DCB dos satélites e receptores. Nos arquivos RINEX, além das observações (OBS), foram introduzidas as coordenadas precisas de cada estação (XYZ). Estes arquivos são editados de forma a conterem estas informações, pois são necessárias para a estimativa dos coeficientes de rede. Os arquivos das efemérides precisas (SP3) são utilizados para a obtenção da posição do satélite, e posterior cálculo do ângulo de elevação e azimute em relação às estações.

Figura 3 – Fluxograma do programa desenvolvido para a modelagem ionosférica local.



As observáveis utilizadas no processamento são as pseudodistâncias do código nas duas frequências, suavizadas pela fase da onda portadora, permitindo que valores inclinados de TEC sejam obtidos de forma absoluta para cada par satélite-estação, em cada época de observação (t). Devido aos diferentes ângulos de elevação dos satélites, empregam-se valores de VTEC ao invés de TEC, que são obtidos por meio da função de mapeamento padrão do modelo da camada ionosférica (equação 7).

Calculados os VTEC para cada par satélite-estação, em cada época, o próximo passo consiste em estimar os coeficientes de rede (CR). A validade destes coeficientes é para a época à qual foram calculados e para os satélites que foram observados simultaneamente em todas as estações. Os demais satélites são descartados numa etapa de pré-processamento.

Conhecidos os coeficientes de rede e as coordenadas aproximadas da estação, os valores de VTEC são interpolados para a posição da estação. Posteriormente são transformados em valores inclinados, convertidos para a unidade métrica, e então

utilizados na correção das pseudodistâncias originais de uma estação, quando um arquivo RINEX com as pseudodistâncias corrigidas é gerado.

5. EXPERIMENTOS

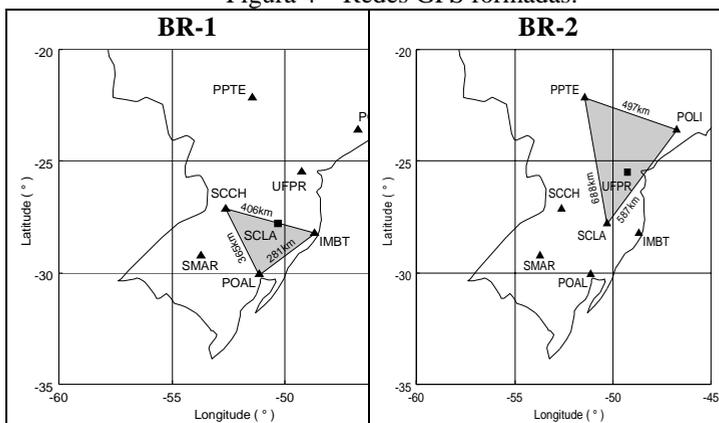
Foram escolhidas sete estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para os experimentos, sendo cinco na Região Sul do país, e duas no Estado de São Paulo. As coordenadas cartesianas precisas destas estações são conhecidas no Sistema Geocêntrico de Referência para as Américas 2000 (SIRGAS2000), na época 2000,4. Todas as estações são equipadas com receptores GPS/GNSS de dupla frequência, que coletam observações de fase nas duas portadoras, código C/A (L_1) e código P_2 (L_2).

Foram selecionados 10 dias para a realização dos testes, iniciando no dia 19/3/2008 (11/07/2008) e finalizando no dia 20/2/2008 (20/07/2008). É importante mencionar que este é um período de baixa atividade solar, e portanto, espera-se um comportamento mais regular da ionosfera e menor incidência de distúrbios ionosféricos. Os arquivos de observações contêm 24 horas de dados, com intervalo de gravação de 15 segundos e foram obtidos diretamente da área de ftp (*file transfer protocol*) da RBMC (ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/). O ângulo mínimo de elevação dos satélites foi de 15° .

Foi selecionado um período de tempo para a realização dos experimentos, iniciando às 12:00h e terminando às 18:00h, no Tempo Universal Coordenado (TUC). Este período foi escolhido de forma a se utilizar observações coletadas próximas às 14:00h (Hora Legal), quando espera-se um pico na densidade de elétrons. Durante o restante do trabalho, o texto refere-se sempre ao TUC.

Para a modelagem ionosférica avaliada neste trabalho, foram formadas duas redes com três estações de referência cada uma (figura 4), além de uma estação teste.

Figura 4 – Redes GPS formadas.



A primeira delas é constituída pelas estações IMBT, SCCH e POAL e foi denominada BR-1 (Brasil-1). As linhas de base entre as estações têm comprimentos que variam entre 281 km e 406 km. A estação teste foi SCLA, localizada aproximadamente em um dos limites da rede, distante cerca de 140 km da estação mais próxima (IMBT) e 275 km da mais distante (SCCH).

A segunda rede, designada BR-2, é composta pelas estações SCLA, POLI e PPTE. As dimensões desta rede são maiores que a primeira, apresentando linhas de base de até 688 km. A estação teste é a UFPR, localizada aproximadamente 305 km da estação mais próxima (SCLA), e 460 km da mais distante (PPTE).

Para o processamento dos dados foi empregado o Programa Bernese (*Bernese GPS Software*), desenvolvido pelo AIUB (Instituto Astronômico da Universidade de Bern, Suíça). Foram empregados órbitas, relógios e parâmetros de orientação da Terra precisos do IGS obtidos na área *ftp* do *Geographical Survey Institute* (GSI), do Japão: (<ftp://terras.gsi.go.jp/data/>).

O programa desenvolvido para a modelagem local em redes GPS, apresentado na seção 4.1, é utilizado em uma etapa intermediária. Inicialmente, o programa Bernese é executado até a etapa de detecção de perdas de ciclo e suavização das pseudodistâncias. Os arquivos RINEX gerados nesta fase são utilizados como arquivos de entrada para o programa de modelagem ionosférica local desenvolvido, o qual emprega as observações suavizadas das estações de referência e as não suavizadas das estações teste. O arquivo RINEX com as observações corrigidas do efeito ionosférico estimado em rede é utilizado pelo programa Bernese para o processamento. Nesta etapa, o principal programa do Bernese para o processamento das observações do código é o CODSP, capaz de estimar as coordenadas da estação e a precisão, neste estudo empregando todas as épocas de observação.

Os valores do DCB dos satélites, necessários para o cálculo do TEC, foram obtidos do site do IGS, enquanto que para os receptores foram estimados por meio de um processamento com o programa Bernese, empregando arquivos com 24 horas de observações.

O modelo ionosférico foi avaliado em função de três fatores que influenciam diretamente na qualidade da modelagem implementada, sendo eles: número de satélites observados simultaneamente em todas as estações de referência da rede e as estações teste, comparação do TEC observado com o interpolado e análise dos parâmetros de rede.

As discrepâncias entre os valores de VTEC interpolados (utilizando informações da rede) e os observados (utilizando observações de dupla frequência) pela própria estação teste, foram calculadas para cada satélite (j), em cada época de observação (i), de acordo com a equação:

$$\Delta VTEC_i^j = VTEC_{INT,i}^j - VTEC_{OBS,i}^j \quad (11)$$

onde:

$\Delta VTEC_i^j$: discrepância entre o VTEC interpolado e o observado;

$VTEC_{INT}$, $VTEC_{OBS}$: VTEC interpolado e VTEC observado, respectivamente.

Ambos os valores de VTEC, o interpolado e o observado, foram calculados empregando o código suavizado pela fase da onda portadora.

O desvio-padrão (σ^j) para as discrepâncias definidas anteriormente é obtido em função do número de observações (n), de acordo com a equação:

$$\sigma^j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta VTEC_i^j)^2} \quad (12)$$

O erro relativo (ER) é o módulo do quociente resultante das discrepâncias oriundas da interpolação, pelo valor observado. Multiplicando-se o valor resultante por 100, tem-se o erro relativo em porcentagem, conforme:

$$ER_i^j (\%) = \left| \frac{\Delta VTEC_i^j}{VTEC_{OBS,i}^j} \right| \cdot 100 \quad (13)$$

Nas análises calculou-se um valor médio do erro relativo obtido em todas as épocas. Esse erro quantifica quanto o valor interpolado foi diferente do valor observado, em média. Assim, quanto menor o erro, melhor é o desempenho do modelo implementado.

O teste estatístico qui-quadrado (χ^2) pode ser aplicado para verificar se os valores de VTEC interpolados apresentam desvios não significativos em relação aos observados. SPIEGEL (1993) *apud* SOARES (2005) apresenta uma equação para este teste, rescrita aqui de forma conveniente:

$$\chi_{CALC}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(VTEC_{INT,i}^j - VTEC_{OBS,i}^j)^2}{VTEC_{OBS,i}^j} \quad (14)$$

O valor de qui-quadrado calculado (χ_{CALC}^2) é comparado a um valor teórico obtido em função do número de graus de liberdade e do nível de confiança. As hipóteses a serem testadas são: hipótese básica (quando as frequências interpoladas são iguais às frequências observadas) e a hipótese alternativa (quando as frequências interpoladas são diferentes das frequências observadas). A hipótese básica (H_0) é aceita quando o valor calculado for inferior ou igual ao valor crítico, dentro de um certo nível de confiança. Caso contrário, ela é rejeitada e se aceita a hipótese alternativa (H_1).

6. RESULTADOS E ANÁLISES

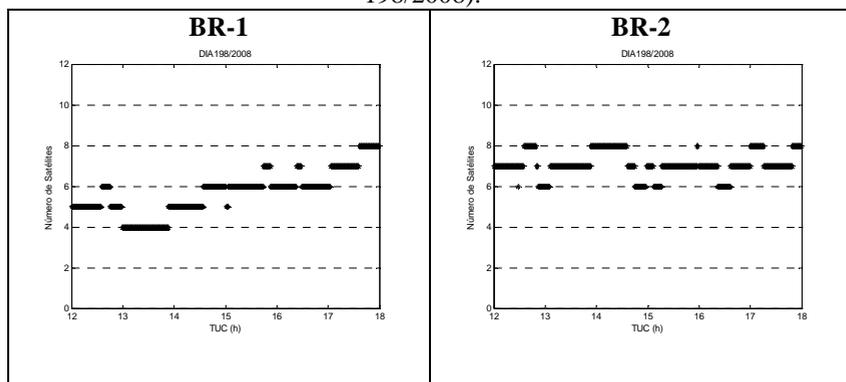
Neste capítulo serão discutidos alguns aspectos referentes à modelagem ionosférica local em rede proposta. Após a apresentação dos resultados e discussões pertinentes à modelagem propriamente dita, serão mostrados os resultados no posicionamento por ponto.

6.1 Número de Satélites

Esta análise tem como objetivo verificar o número de satélites observados simultaneamente entre todas as estações da rede, incluindo a estação teste.

A figura 5 mostra o número de satélites observados por todas as estações nas redes BR-1 e BR-2, para o dia 198/2008. Estes gráficos são representativos para o que ocorreu na maioria dos dias. Na primeira rede, nota-se que o número de satélites variou entre 4 e 8, e na segunda o número de satélites é maior, variando entre 6 e 8.

Figura 5 – Número de satélites observados simultaneamente pelas estações (dia 198/2008).



Verificou-se que houve ausência de satélites no dia 196/2008, entre as 13:00h e 14:00h e entre as 15:00h e 16:00h, e para o dia 200/2008 entre as 12:00h e 13:30h. Esta ausência de satélites foi causada devido à problemas na estimativa do VTEC em uma ou mais estações da rede, para um ou mais satélites observados, quando então estes foram excluídos do processamento.

6.2 VTEC Observado e Interpolado

Nesta seção são analisadas as diferenças entre os valores de VTEC observados, utilizando observações do código (suavizado) de dupla frequência, e os VTEC interpolados com informações da rede, segundo as equações (12), (13) e (14).

Foram analisados 12 satélites para todos os 10 dias de dados. Algumas estações observaram mais de 12 satélites durante o período entre 12:00h e 18:00h, porém, nas análises foram realizadas apenas para a maioria (80%) dos satélites observados em todos os dias.

A tabela 1 mostra os desvios-padrão (σ) e os erros relativos (ER) para a estação SCLA quando foi utilizada a rede BR-1. O maior desvio-padrão foi de 2,94 TECU, para o satélite PRN 03 no dia 198. O maior erro relativo foi para o satélite PRN 02 no último dia de rastreamento (202/2008), alcançando 68,15%, ou 17 TECU (2,7 m). Em duas situações os erros atingiram 47%, e em algumas outras foram superiores a 20%, contudo, a média do erro relativo para todos os satélites e para todos os dias foi de 13%.

Tabela 1 – Estatística da modelagem ionosférica para a rede BR-1 (estação teste SCLA).

DIA	VTEC _{INT-0}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,93	0,43	0,70	0,66	0,68	0,62	0,99	1,38	0,94	1,62	0,80	0,77
	ER (%)	16,60	7,77	22,93	7,31	11,54	1,04	9,54	17,77	13,44	9,23	13,76	7,73
194	σ (TECU)	0,73	1,18	1,30	1,15	0,75	0,49	0,86	1,40	1,10	1,57	0,51	0,83
	ER (%)	10,11	8,19	17,10	11,07	5,38	0,88	6,17	12,36	11,28	6,65	3,83	3,59
195	σ (TECU)	1,11	0,51	0,84	1,28	0,96	0,52	0,63	1,05	0,85	0,73	0,63	1,32
	ER (%)	12,92	9,85	10,52	14,63	9,72	0,81	7,70	13,34	17,73	7,36	7,76	8,30
196	σ (TECU)	0,68	0,34	1,57	0,84	0,99	0,61	0,58	2,03	1,61	0,69	0,94	1,31
	ER (%)	4,15	7,19	47,41	13,40	15,63	3,59	5,43	17,53	12,70	7,74	9,32	5,69
197	σ (TECU)	0,69	0,77	0,61	1,30	1,22	0,81	0,63	0,88	0,93	1,05	0,90	1,13
	ER (%)	14,79	15,89	3,65	14,83	20,44	5,90	6,36	10,19	14,30	11,48	13,15	5,96
198	σ (TECU)	0,94	2,94	1,03	1,81	1,17	1,02	0,83	1,16	0,65	1,58	0,64	1,24
	ER (%)	26,69	47,47	30,80	15,75	27,32	3,00	3,07	14,26	8,43	8,80	15,00	9,54
199	σ (TECU)	0,98	1,32	1,18	0,81	0,72	0,75	0,31	1,20	0,69	0,38	0,96	1,06
	ER (%)	26,32	19,77	32,93	7,60	22,53	5,25	1,95	14,73	8,40	0,60	17,76	9,31
200	σ (TECU)	*	0,65	0,94	0,81	*	1,25	1,31	1,88	1,43	0,99	0,81	2,22
	ER (%)		11,04	7,50	5,44		1,50	2,61	11,24	11,63	2,52	5,98	10,85
201	σ (TECU)	0,59	0,81	1,65	1,03	0,64	1,26	0,51	1,12	1,04	1,34	0,71	1,29
	ER (%)	13,76	7,62	37,99	8,94	24,67	10,96	4,12	14,34	15,08	9,81	14,90	8,49
202	σ (TECU)	1,53	0,55	0,95	0,70	0,71	0,98	0,58	1,59	0,63	1,64	0,96	0,90
	ER (%)	68,15	8,86	27,23	3,40	33,53	5,04	1,77	15,55	10,43	9,01	19,12	7,05

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia. As áreas sombreadas representam que o teste de hipótese foi rejeitado para a hipótese H_0 .

O teste qui-quadrado foi aplicado para verificar se os desvios entre o VTEC interpolado e o observado são estatisticamente significativos ou não. As áreas sombreadas na tabela 1 indicam que o teste qui-quadrado foi rejeitado para a hipótese básica H_0 , a um nível de confiança de 95%, o que representa 25% de todas as análises desta rede. As outras áreas, ou seja 75% dos casos, indicam que o desvio entre os valores de VTEC não são significativos a esse nível de confiança.

Os satélites PRN 05, PRN 09 e PRN 18 foram os que tiveram o maior número de testes rejeitados. Devido aos efeitos atmosféricos e de multicaminho, satélites com ângulo de elevação baixo apresentam maiores problemas nas observações. Dos

três satélites listados anteriormente, somente o satélite PRN 09 é que apresenta um ângulo de elevação baixo, variando de 40° a 10° . Não se verificou, nos experimentos, uma relação direta entre a rejeição do teste estatístico e o ângulo de elevação. Mesmo em casos em que o teste estatístico foi rejeitado, observou-se uma alta correlação ($>0,80$) entre o VTEC interpolado e o observado para 86% dos casos. O satélite PRN 05 apresentou um coeficiente de correlação acima de 0,80 para todos os dias. O satélite PRN 09 apresentou correção de 0,54 e 0,20 para os dias 197 e 198, respectivamente, e o satélite PRN 18 uma correção de 0,78 no dia 201. Os satélites que apresentaram os menores coeficientes de correlação foram os satélites PRN 02 e PRN 03.

Constata-se que os dias 198, 199, 201 e 202 são os que apresentam maior número de rejeições para o teste qui-quadrado. Segundo o índice geomagnético Kp (do alemão *Planetarische Kennziffer* – índice planetário), os cinco primeiros dias de levantamento (193 a 197) apresentaram atividade geomagnética moderada, enquanto que os últimos cinco dias (198 a 202) baixa atividade. Portanto, não se constatou nos experimentos uma correlação entre a rejeição do teste estatístico com o índice Kp.

Os resultados para a estação UFPR, quando a rede BR-2 (POLI, PPTe e SCLA) foi utilizada, são apresentados na tabela 2. O maior desvio-padrão foi de 5,19 TECU para o satélite PRN 21, no dia 202/2008. Verificou-se que para este dia, e para este satélite, a estação POLI apresentou valores de VTEC discrepantes dos valores estimados pelas outras estações de referência. Com exceção deste caso, o maior desvio-padrão foi de 3,26 TECU, também para o satélite PRN 21, mas no dia 200/2008. O maior erro relativo foi de 23,07% para o satélite PRN 03 no dia 198/2008. Em apenas três casos os erros foram superiores a 20%. Considerando todos os satélites e todos os dias, erro relativo foi de 8% em média.

Para esta estação, verificou-se que em 78% dos casos o teste qui-quadrado não foi rejeitado para a hipótese básica H_0 . Verifica-se que os satélites PRN 03, 05, 06 e 16 foram os responsáveis pelo maior número de rejeições do teste. O coeficiente de correlação entre o VTEC interpolado e o observado foi superior a 0,80 em 86% dos casos. Os satélites PRN 02 e PRN 03 apresentaram o maior número de valores abaixo de 0,80, tal como aconteceu com a estação SCLA. A alta correlação entre as grandezas analisadas pode ser um indicativo que os problemas (rejeição do teste e altos valores de erro relativo) podem ser de natureza sistemática, como a não modelagem correta do DCB dos satélites e estações, ou o multicaminho, cuja magnitude nas observações do código é maior de que nas de fase.

Tabela 2 – Estatística da modelagem ionosférica para a rede BR-2 (estação teste UFPR).

DIA	VTEC _{BNT-0}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,38	0,47	0,75	0,71	0,78	0,78	0,64	0,79	0,76	0,95	0,58	*
	ER (%)	10,58	6,10	11,90	6,20	8,42	1,41	6,93	2,18	7,59	2,55	1,88	
194	σ (TECU)	0,25	1,07	1,29	1,93	1,13	1,55	1,07	1,13	1,01	1,35	0,86	0,93
	ER (%)	2,88	9,79	10,33	14,14	11,58	4,90	8,50	1,15	6,55	1,22	6,50	2,86
195	σ (TECU)	0,80	0,69	1,25	1,31	0,88	1,62	0,84	0,94	0,99	1,15	0,93	0,74
	ER (%)	11,05	14,51	11,84	11,01	4,00	5,05	12,54	3,21	2,47	2,29	7,25	1,74
196	σ (TECU)	0,61	1,65	1,09	2,27	0,92	0,66	1,48	0,81	0,75	1,46	0,95	0,54
	ER (%)	9,52	11,96	18,71	9,52	12,67	0,98	6,95	1,36	2,04	1,68	7,02	3,32
197	σ (TECU)	0,39	1,12	0,69	1,66	0,76	1,45	0,90	1,17	1,04	1,26	1,07	0,87
	ER (%)	3,98	20,52	19,14	17,91	10,56	3,99	12,51	2,17	4,52	1,64	3,34	2,52
198	σ (TECU)	0,55	1,93	1,00	1,87	0,59	2,21	1,23	1,52	1,27	1,61	1,12	1,32
	ER (%)	14,75	23,07	15,13	15,52	9,44	4,16	10,35	3,37	7,81	2,01	11,40	1,66
199	σ (TECU)	0,45	1,10	0,32	1,14	0,69	0,83	0,62	0,79	0,69	1,03	0,47	0,91
	ER (%)	13,14	14,11	1,72	11,46	9,10	1,13	8,75	1,55	2,58	2,35	1,36	1,26
200	σ (TECU)	0,17	2,26	0,94	1,91	0,68	1,48	0,89	1,95	3,26	2,25	0,98	1,67
	ER (%)	15,59	12,80	22,21	8,60	11,94	1,73	11,96	3,65	3,98	5,34	7,63	4,79
201	σ (TECU)	0,28	1,39	0,43	3,02	0,54	0,61	1,47	0,77	0,71	1,08	0,76	0,55
	ER (%)	2,93	12,81	13,00	15,15	15,74	0,64	12,12	1,30	2,36	2,89	7,25	3,12
202	σ (TECU)	0,41	1,03	0,71	1,21	0,36	0,57	1,47	1,07	5,19	1,42	1,54	0,76
	ER (%)	11,77	8,85	9,42	8,71	10,75	1,12	8,98	3,52	14,33	2,13	11,54	3,59

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia. As áreas sombreadas representam que o teste de hipótese foi rejeitado para a hipótese H_0 .

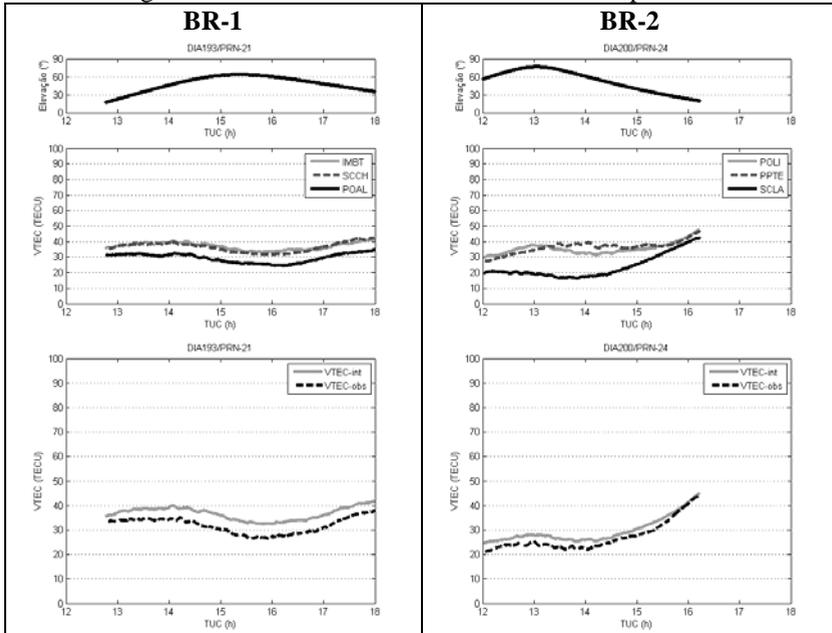
A figura 6 mostra os valores de VTEC observados e os interpolados para as redes BR-1 e BR-2 nos dias 193/2008 (PRN 21) e 200/2008 (PRN 24). A visualização dos VTEC para todos os 12 satélites em todos os 10 dias de observação seria inviável devido ao grande número de gráficos que seriam gerados. Assim, escolheu-se apenas dois satélites para a visualização e esta escolha foi em função deles apresentarem valores de erro relativo semelhantes aos valores médios obtidos para cada rede (13% e 8% respectivamente). Na parte superior de cada figura, verifica-se o ângulo de elevação do satélite durante o período em que foi observado, na parte intermediária se visualiza o VTEC calculado pelas três estações de referência, e na parte inferior o VTEC interpolado e o observado pela estação teste.

Na rede BR-1, para o satélite PRN 21 no dia 193/2008, os valores de VTEC estimados pelas três estações de referência são próximos entre si, não diferindo mais que 10 TECU. Observa-se também uma alta correlação dos valores de VTEC calculados pelas estações de referência. A estação POAL, localizada mais ao sul, foi a que apresentou menores valores de VTEC.

Na rede BR-2, verifica-se que as diferenças entre os valores de VTEC estimados pelas estações são maiores do que a da primeira rede. As diferenças entre os valores calculados pelas estações PPTe e POLI são menores entre si quando comparadas com aqueles da estação SCLA. Como esta última estação se localiza aproximadamente 5° ao sul das demais (variação em latitude), nota-se menor

correlação entre os valores de VTEC. Além disso, e deve-se considerar que a rede BR-2 possui dimensões maiores que a anterior, desta forma, é de se esperar que a correlação dos erros seja menor devido a diferentes condições ionosféricas nas estações.

Figura 6 – Valores de VTEC observados e interpolados.



6.3 Coeficientes de Rede

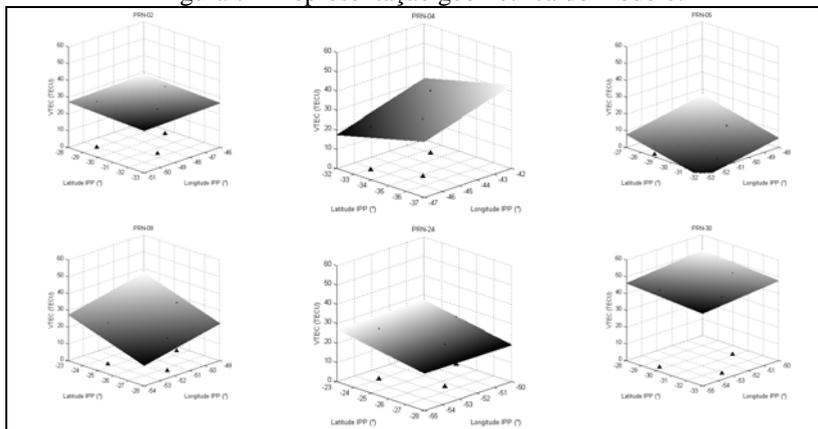
Os coeficientes de rede na direção da latitude e longitude são estimados para cada satélite em cada época de observação. Eles representam a declividade dos planos segundo o meridiano e o paralelo. A figura 7 é uma representação geométrica do modelo para cada um dos 6 satélites rastreados na rede BR-1, às 12:00h do dia 193/2008. Nesta figura se pode observar o comportamento do modelo em uma mesma época para satélites diferentes.

A figura 8 mostra a variação temporal dos coeficientes de rede estimados para os satélites PRN 21 (193/2008) e PRN 24 (200/2008), nas redes BR-1 e BR-2, respectivamente. Os coeficientes são representados em ppm (partes por milhão). Como estes satélites foram observados por algumas horas, é possível verificar a variação dos coeficientes de rede durante a passagem do satélite com ângulos de elevação baixos e próximos a 90°.

Para o satélite PRN 21 (rede BR-1, figura 8), os coeficientes apresentam uma tendência aproximadamente linear durante o período em que este foi observado. Os valores dos coeficientes de rede em longitude são inferiores aos valores dos

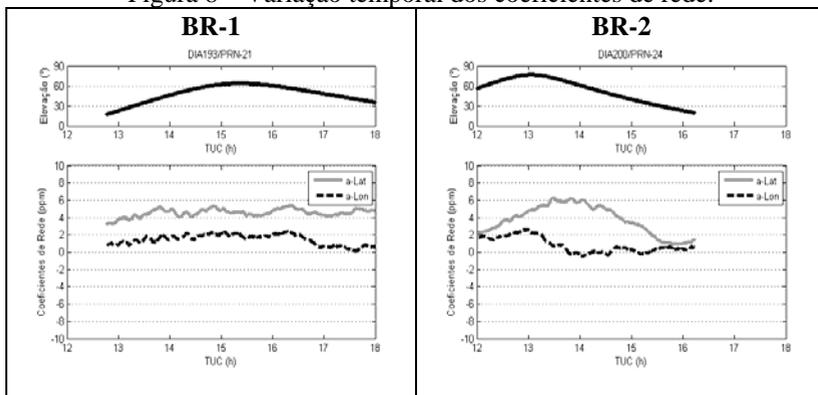
coeficientes em latitude, esta foi uma característica para maioria dos satélites. Para o exemplo em questão, os coeficientes em longitude atingiram valor máximo igual a 2,5 ppm, enquanto que para a latitude foi de 5,5 ppm. Para o satélite PRN 24 no dia 200/2008, na rede BR-2, observa-se um comportamento mais irregular dos coeficientes de rede, especialmente para o coeficiente em latitude, que também apresentou maiores valores (até 6,3 ppm) quando comparado com o coeficiente em longitude (até 2,6 ppm).

Figura 7 – Representação geométrica do modelo.



NOTA: Rede BR-1, 12:00h, dia 193/2008.

Figura 8 – Variação temporal dos coeficientes de rede.



6.4 Posicionamento por Ponto (PP)

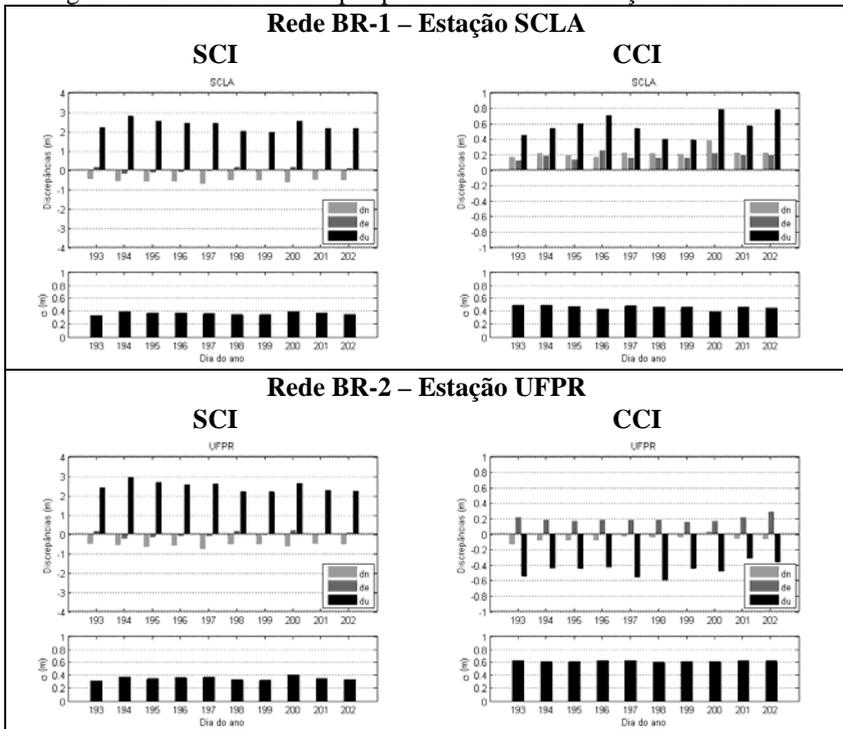
As observações das estações de referência foram suavizadas pela fase da onda portadora de modo a se obter valores de VTEC mais precisos. As observações da estação teste, por sua vez, não foram suavizadas no processamento PP, porém,

observações de código e fase nas duas frequências foram empregadas para a detecção e correção de perdas de ciclo. Desta forma, é importante ressaltar que os resultados obtidos no experimento são melhores do que aqueles que seriam obtidos caso fossem empregados, de fato, observações de apenas uma frequência.

Além disso, é necessário mencionar que devido ao fato das observações terem sido coletadas em um período de baixa atividade solar, é de se esperar discrepâncias menores do que aquelas que eventualmente se obteria em períodos de maior atividade. Neste último caso, normalmente se observam maiores valores de TEC bem como a presença maior de anomalias que certamente afetariam o posicionamento.

A figura 9 ilustra os resultados obtidos para o processamento por ponto empregando o código C/A em duas situações diferentes: sem correção ionosférica (SCI) e com correção ionosférica (CCI). Como ambos os processamentos, sem e com correção ionosférica, foram empregadas as mesmas configurações no processamento, a diferença entre os resultados reflete basicamente a influência da refração ionosférica no posicionamento.

Figura 9 – Posicionamento por ponto sem e com correção ionosférica.



NOTA: SCI = sem correção ionosférica; CCI = com correção ionosférica.

Observa-se na figura 9 que os resultados são altamente concordantes entre os dias consecutivos, bem como os desvios-padrão que para a estação SCLA foram de até 0,40 m no processamento sem qualquer correção ionosférica e de até 0,49 m com as correções. Para a estação UFPR os desvios-padrão foram de até 0,41 m e de até 0,63 m para os processamentos com e sem correção ionosférica, respectivamente. Verificou-se que as diferenças entre os desvios padrão, resultantes do processamento SCI e CCI, são estatisticamente não significantes para um nível de confiança de 95%.

A tabela 3 mostra as discrepâncias máximas, mínimas e médias obtidas para as estações SCLA e UFPR quando o efeito devido a refração ionosférica foi desconsiderado e quando não. Estas discrepâncias foram calculadas em função das coordenadas precisas destas estações. Além destas informações, a tabela apresenta o quanto foi a melhora (em média) do posicionamento após a aplicação das correções geradas pelo modelo ionosférico proposto.

Tabela 3 – Discrepâncias para a planimetria e altimetria.

	SCLA				UFPR			
	Planimetria		Altimetria		Planimetria		Altimetria	
	SCI	CCI	SCI	CCI	SCI	CCI	SCI	CCI
Máximo (m)	0,7	0,4	2,7	0,8	0,7	0,3	2,9	-0,3
Mínimo (m)	0,5	0,2	2,0	0,4	0,5	0,2	2,2	-0,6
Média (m)	0,6	0,3	2,3	0,6	0,6	0,2	2,5	-0,5
Melhora (%)	50,0		73,9		66,7		80,0	

NOTA: SCI = sem correção ionosférica; CCI = com correção ionosférica.

Quando o efeito devido à refração ionosférica não foi levado em consideração, verifica-se discrepâncias planimétricas médias foram de 0,7 m nas duas estações. A aplicação das correções ionosféricas permitiu uma melhora de 50% e 67% para as estações SCLA e UFPR, respectivamente. Para a altimetria, observa-se uma melhora de aproximadamente 74% para a estação SCLA e de 80% para a estação UFPR. Discrepâncias que antes da aplicação das correções ionosféricas eram da ordem de 2,5 m passaram a ser inferiores ao metro (em módulo).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi apresentado um modelo ionosférico local, que empregou um conjunto de três estações GPS de dupla frequência da RBMC, para geração de correções ionosféricas locais. Estas correções foram aplicadas nas observações originais de estações de uma frequência, localizadas no interior da rede. As observações empregadas nos experimentos se referem a um período de baixa atividade solar, quando se espera menor atividade ionosférica e menor incidência de distúrbios ionosféricos. Este modelo foi implementado em um programa

computacional, e avaliado segundo alguns fatores que indicam a qualidade da modelagem.

Os desvios-padrão para as discrepâncias calculadas entre os valores de VTEC interpolados, com as informações da rede, e os observados foram de até 3,5 TECU, com apenas uma exceção. O erro relativo, que indica o quanto o modelo conseguiu estimar o VTEC quando comparado com aquele gerado pela própria estação também foi calculado. Os resultados mostraram que o modelo conseguiu eliminar em média 87% do efeito ionosférico total na rede, isto é, quando os resultados foram comparado com as correções geradas pela própria estação empregando a mesma observável. O teste qui-quadrado mostrou que os desvios entre os valores de VTEC interpolados e observados não são significativos, a um nível de confiança de 95%, para 75% dos casos na rede BR-1 e 78% dos casos na rede BR-2. Observou-se que em 86% dos casos o coeficiente de correlação entre as grandezas foi superior a 0,80.

O posicionamento por ponto empregando observações do código foi conduzido primeiramente sem levar em consideração qualquer correção ionosférica, e em uma segundo caso, corrigindo as observações com as informações da rede. Apesar da diferença entre os desvios-padrão serem estatisticamente não significantes, observou-se uma melhora acentuada no posicionamento quando as correções ionosféricas foram aplicadas. Para a altimetria verifica-se uma melhora de 50% e 67% para as estações SCLA e UFPR, respectivamente. A melhora em altimetria foi de 74% para a estação SCLA e de 80% para a estação UFPR.

Verifica-se a importância, em trabalhos futuros, de avaliar o modelo em períodos de maior atividade solar, bem como implementar e testar outros modelos matemáticos para a interpolação dos valores de VTEC estimados em rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao DAAD (*Deutscher Akademischer Austauschdienst* - Serviço de Intercâmbio Acadêmico Alemão) que por meio do programa PROBRAL permitiu o desenvolvimento da pesquisa. Agradecem também ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que disponibiliza gratuitamente e sistematicamente observações GNSS, e ao IGS (*International GNSS Service*), por disponibilizar os produtos precisos utilizados no trabalho. O primeiro autor também gostaria de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte financeiro durante o doutorado realizado na Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. *Modelo regional da ionosfera (MOD_ION): implementação em tempo real*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual

- Paulista, Presidente Prudente, 2005, 159 p., Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas).
- ALVES, P.; GEISLER, I.; BROWN, N.; WIRTH, J.; EULER, H.-J. *Introduction of a geometry-based network RTK quality indicator*, Published in proceedings of ION GNSS, September 13-16, 2005, Long Beach, CA.
- ARMENDARIS, O. da C.; MATSUOKA, M. T. CAMARGO, P. de O. *Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar*, Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 15, no 2, p.208-223, abr-jun, 2009.
- AZPILLICUETA, F.; BRUNINI, C.; RADICELLA, S. M. *Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude*, 2006, 38, p. 2324-2331, Advances in Space Research.
- CAMARGO, P. O. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. 191 p., Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas).
- FEDRIZZI, M. *Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS*. São José dos Campos: INPE, 1999, 142 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial).
- FONSECA JUNIOR, E. S. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002, Tese (Doutorado).
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *GPS theory and practice*. Fifth, revised edition, SpringerWienNewYork, 2001, 382 p.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *GPS theory and practice*. Fifth, revised edition, SpringerWienNewYork, 1997, 382 p.
- KLOBUCHAR, J. A. *Ionospheric effects on GPS*. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J., *Global positioning system: theory and applications*. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.II, 1996, p. 485-515.
- LEICK, A. *GPS satellite surveying*. Third Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004, 435 p.
- LIU, Z. *Ionosphere tomographic modeling and applications using Global Positioning System (GPS) measurements*. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canadá, 2004.
- MATSUOKA, M. T. *Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003, 263 p., Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas).
- MATSUOKA, M. T. *Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira*. Faculdade

- de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007, Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas).
- SALOMONI, C. S.; MATSUOKA, M. T.; SOUZA, S. F. de; CAMARGO, P. de O., *Análise e comparação do comportamento da ionosfera e do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar*, Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 15, no 3, p.333-351, jul-set, 2009.
- SCHAER, S. *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 59, 1999, 205 p., Tese.
- SEJAS; M. I. *Modelagem ionosférica local em redes GPS para o posicionamento de estações de uma frequência*. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2009, Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas).
- SOARES, W. A. *Investigação de uma modelagem matemática como alternativa para aumento da área de cobertura de estações de referência DGPS*. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2005, Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas).
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*, 3a edição, Makron Books, São Paulo, 1993.
- VERONEZ, M. R. *Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método seqüencial de ajustamento*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004, Tese (Doutorado em Engenharia Civil).
- WANNINGER, L. *Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere*. Proceedings of ION GPS-95, Palm Springs, Sep. 12-15, 1995, pp. 55-62.
- WEBSTER, I. R. *A regional model for the prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System*. Department of Surveying Engineering, Technical Report No. 166, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1993, 124 p., M.Sc.E. thesis.
- WILD, U. *Ionosphere and geodetic satellite systems, permanent GPS tracking data for modelling and monitoring*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 48, 1994, 155 p., Tese.

(Recebido em outubro de 2009. Aceito em fevereiro de 2010)