



# Análise da Performance dos Mapas Ionosféricos na Geração de VRSs no Território Brasileiro

Analysis of Ionospheric Maps Performance in Generation of VRS in the Brazilian Territory

*Mayara Cobacho Ortega Caldeira*<sup>1</sup>

*Daniele Barroca Marra Alves*<sup>2</sup>

*Claudinei Rodrigues de Aguiar*<sup>3</sup>

Recebido em fevereiro de 2017.

Aprovado em janeiro de 2018.

## RESUMO

Visando usufruir do potencial dos Sistemas de Posicionamento Global existentes, novos métodos de posicionamento têm surgido e outros vêm sendo aprimorados. Uma grande tendência nos últimos anos tem sido o uso de redes de estações GNSS de referência. Mas, tanto no uso de redes como nos demais métodos, um fator importante para melhorar a qualidade do posicionamento está relacionado com a modelagem atmosférica. Especial atenção deve ser dada aos erros que ocorrem devido à ionosfera, pois ela se tornou a principal fonte de erro no posicionamento GNSS, após desativação da técnica SA. Este erro é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC - Total Electron Content) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC e, conseqüentemente, o erro ionosférico variam no tempo e no espaço, e sofrem diversas influências, como: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros. Atualmente, os erros proporcionados pela ionosfera podem ter seus efeitos minimizados a partir de mapas ionosféricos disponibilizados por diversos centros do IGS (CODE, ESA, JPL e UPC) por meio do arquivo IONEX (IONosphere map EXchange format) ou por meio de modelagem ionosférica. Portanto, nesta pesquisa, foram utilizados dados de estações da RBMC em diferentes regiões brasileiras no período de baixa e alta densidade de elétrons de 2014 (pico da atividade solar do ciclo solar24), a fim de avaliar o desempenho destes mapas ionosféricos na geração da VRS (Virtual Reference Station). Para tal fim, foi adotado um sistema computacional desenvolvido na FCT/UNESP, denominado VRS-

---

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Instituto Ciberespacial – ICIBE, Av. Perimetral, 2501, Belém, PA – Brasil. Email: mayarac.ortega@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia. Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, SP – Brasil. E-mail: danibarroca@fct.unesp.br

<sup>3</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Rua Marcílio Dias, 635, Apucarana – PR, Brasil. Email: rodrigues.aguiar@gmail.com

Unesp, que emprega o conceito de Estação Virtual no modo pós processado. De acordo com os resultados obtidos, nota-se que não há um único mapa fornecido pelos centros de análise do IGS que melhor se enquadra a realidade brasileira, além disso, o desempenho do mapa depende das condições ionosféricas e, principalmente, da localização da estação. No entanto, o mapa ionosférico fornecido pelo centro de análise CODE foi o que apresentou os piores resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efeitos Ionosféricos. Posicionamento Baseado em Redes. Atividade Solar. Mapas Ionosféricos.

#### **ABSTRACT**

In order to take advantage from Global Positioning Systems, new positioning methods have emerged and others have been improved. An important tendency in recent years has been the use of GNSS reference stations networks. But, using networks or other positioning methods an important factor to improve the positioning quality is related to atmospheric modeling. Special attention should be given to errors that occur due to ionosphere, it became the largest error source in GNSS positioning after disabling SA technique. Ionosphere error depends on signal frequency and Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. TEC and consequently the ionospheric error varies regularly in time and space and they are affected by different sources like: sunspot number (solar cycle), season, local time, geographic position, geomagnetic activity, and others. Currently, the errors provided by the ionosphere can be minimized using IONEX files or models. Currently, the errors provided by the ionosphere can be minimized using Ionospheric Maps available by IGS centers (CODE, ESA, JPL and UPC) by files IONOSPHERE map EXchange format (IONEX) or by ionospheric modeling. Therefore, in this research, the RBMC stations data were used in different regions of Brazil in the period of low and high electron density of the cycle solar 24 to evaluate the performance of the ionospheric maps, in beget Virtual Reference Station (VRS). For this, a computer system developed in FCT / UNESP has been adopted, VRS-Unesp that uses the concept of Virtual Station in post-processed mode. According obtained results, it is noticed that there is not a single map provided by the IGS analysis centers that best fits the Brazilian reality, besides, the performance of the map depends on the ionospheric conditions and, mainly, on the station location. However, the ionospheric map provided by the CODE analysis center was the one that presented the worst results.

**KEYWORDS:** Ionospheric Effects. Network-Based Positioning. Solar Activity, Ionospheric Maps.

\* \* \*

## **Introdução**

Com o intuito de usufruir do potencial do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), os métodos de posicionamento vêm se aprimorando. Um dos métodos mais empregados visando alta acurácia e produtividade é o

posicionamento relativo cinemático em tempo real, denominado RTK (*Real-Time Kinematic*), sendo capaz de alcançar acurácia centimétrica. Este método é baseado no uso de uma única estação de referência localizada nas proximidades do receptor móvel (ALVES, 2008; MONICO, 2008).

Entretanto, em razão dos erros envolvidos no processo, como efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera), órbita dos satélites entre outros, os quais são correlacionados espacialmente, o RTK fica restrito a aplicações com distâncias inferiores a 20 km entre a estação-base e a móvel, dependendo principalmente das condições ionosféricas. Para superar este problema, vem sendo empregado o conceito de rede de estações de referência, denominado RTK em rede ou simplesmente posicionamento baseado em redes, devido à necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, 2011).

No entanto, assim como em todos os outros métodos de posicionamento, a ionosfera deve ser modelada de forma adequada para que o posicionamento em redes possa atender a acurácia centimétrica almejada.

Uma das alternativas de minimizar o erro devido à ionosfera nas observáveis é fazer uso de algum modelo da ionosfera, como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), NeQuick (RADICELLA, 2009), os modelos regionais – MOD\_ION de Camargo (1999) e MOD\_ION\_FK de Aguiar (2005), de Grade de Aguiar (2010)), o Modelo Ionosférico de La Plata – LPIM, entre outros. Outra possibilidade seria utilizar os mapas ionosféricos disponibilizados por exemplo pelo IGS (International GNSS System), conhecidos como GIM (Global Ionospheric Maps – Mapas Globais da Ionosfera) no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*).

Deste modo, o principal objetivo deste artigo é avaliar o desempenho dos arquivos IONEX produzidos por diversos centros no posicionamento baseado em redes em diferentes regiões brasileiras, a partir do conceito de VRS (*Virtual Reference Station*). Assim, conceitos teóricos referentes à RTK em rede, principalmente VRS, bem como, os principais efeitos da ionosfera no

posicionamento, variações temporais e espaciais do TEC são descritos nas próximas seções, incluindo os experimentos e análises dos resultados.

## **2 Posicionamento baseado em redes**

Visando usufruir do potencial dos Sistemas de Posicionamento Global existentes, novos métodos de posicionamento têm surgido e outros vêm sendo aprimorados. Segundo Monico (2008), o posicionamento pode ser classificado em absoluto e relativo, e o receptor pode estar em movimento ou em repouso (estático). Além disso, os dados do posicionamento podem ser processados após a coleta (modo pós-processado) ou durante a própria coleta (tempo real).

O posicionamento relativo em tempo real, denominado RTK, é baseado no uso de uma única estação de referência localizada nas proximidades do receptor móvel (usuário). Mas em razão dos erros correlacionados espacialmente envolvidos no processo, fica-se restrito a aplicações com distâncias inferiores a 20 km entre a estação-base e a móvel, dependendo principalmente das condições ionosféricas (MONICO, 2008; ALVES, 2011).

Deste modo, para superar este problema foi desenvolvido o conceito de rede de estações de referência, denominado RTK em rede ou posicionamento baseado em redes. Uma das principais vantagens dos usuários de redes de estações de referência, quando comparado a usuários de uma simples linha de base, é o aumento na confiabilidade e disponibilidade do serviço, pois se uma ou duas estações de referência falham ao mesmo tempo (por qualquer motivo), as estações de referência remanescentes ainda seriam capazes de prover aos usuários as correções (ALVES, 2008; BARBOSA, 2010; ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Além disso, segundo Alves (2011), o uso da rede permite que a qualidade das correções geradas para cada estação de referência seja verificada com as correções remanescentes. Assim, se uma estação está gerando correções errôneas, o uso da rede permite uma possível detecção e eliminação desse erro para a solução final.

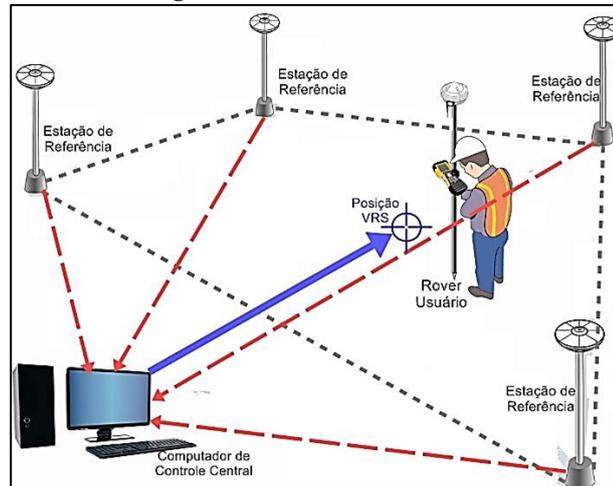
Outro fato importante que vem fortalecendo e viabilizando o posicionamento com múltiplas estações é a existência de redes de estações de referência ativas pelo mundo todo. Principalmente, em países mais desenvolvidos, como é o caso, por exemplo, da Alemanha, Estados Unidos e Japão, as redes de estações de referência são adequadamente densificadas. No que concerne ao Brasil, a configuração atual da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) ainda não favorece o posicionamento em redes em diversas regiões do país. Mas, em algumas regiões, onde a mesma é mais densificada, esse tipo de posicionamento já pode ser realizado.

Outro aspecto importante do posicionamento GNSS baseado em redes é que ele permite a modelagem dos erros espacialmente correlacionados, como o efeito ionosférico e a refração troposférica. Portanto, correções desses erros podem ser geradas e disseminadas ao usuário para melhorar a acurácia do posicionamento (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

No entanto, de acordo com Fotopoulos (2000) existem algumas desvantagens associadas ao uso de uma rede de estações de referência. Mais especificamente, dependendo do método utilizado, pois pode existir um possível aumento da carga de transmissão dos dados (correções) e complexidade na implementação a ser realizada pelo usuário, se comparado ao uso de uma única linha de base.

Combinar todas as observações da rede em uma estação central de processamento, e então transmitir as correções da rede ou observações de uma estação de referência virtual (Figura 1), próxima ao usuário é um dos métodos que pode superar essas limitações.

Figura 1 – Conceito da VRS



Fonte: Adaptado de Alves (2008).

Para utilizar o conceito de VRS, os dados das estações de referência são enviados para um computador de controle central via uma rede de comunicação. Esse computador, juntamente com softwares apropriados, utiliza os dados das estações de referência para modelar os erros sistemáticos (que limitam a acurácia do posicionamento GNSS) e gerar correções apropriadas para serem utilizadas na área de abrangência da rede. Além disso, para geração da VRS, a estação de controle central estabelece a estação base<sup>4</sup> (estação de referência da rede mais próxima ao usuário), para determinação das observáveis de pseudodistância e fase do batimento da onda portadora da VRS (ALVES, 2008)

Posteriormente, o computador de controle central gera as observações dessa estação virtual, com base nas observáveis da estação base e correções provenientes da rede, e finalmente as envia para o usuário, que pode realizar o posicionamento relativo utilizando a VRS como se fosse uma estação de referência nas suas proximidades (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003; EULER, KEENAN e ZEBHAUSER, 2001).

---

<sup>4</sup> A nomenclatura utilizada “estação base” está relacionada com a estação da rede mais próxima ao usuário. Não se deve confundir-la com a estação base utilizada no posicionamento relativo (ALVES, 2011).

Outra possibilidade é utilizar o conceito de VRS no modo pós-processado. Nesse caso os dados da VRS podem ser gerados diretamente no formato Receiver Independent Exchange Format (RINEX). Tal conceito é empregado no sistema VRS\_Unesp (ALVES, 2011). Além disso, existe um vasto número de aplicações que se beneficiariam com a metodologia de Posicionamento em Redes, dentre elas o georreferenciamento de imóveis rurais.

Dessa forma, tanto em tempo real, quanto no modo pós-processado a ideia básica do conceito de VRS é gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação base próxima ao usuário. Assim, o usuário utiliza os dados dessa VRS como se ela fosse uma estação de referência real (ALVES, 2008).

### **3 Ionosfera e seus efeitos no posicionamento**

A radiação solar causa a fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões com alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GNSS, conhecidas como ionosfera, que está compreendida, aproximadamente, entre 50 a 1000 acima da superfície Física da Terra (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991).

A ionosfera se comporta como um meio dispersivo para a faixa de frequência GNSS, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço. Diferentemente da troposfera que se comporta como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar (SEEBER, 2003). Mais detalhe sobre a camada ionosférica pode ser consultado, por exemplo, em Davies (1990) e McNamara (1991).

A magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende diretamente do TEC presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, que

por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência (DAVIES, 1990). Assim, o TEC é o principal parâmetro descritor do efeito ionosférico nos sinais GNSS, porém varia, no tempo e no espaço.

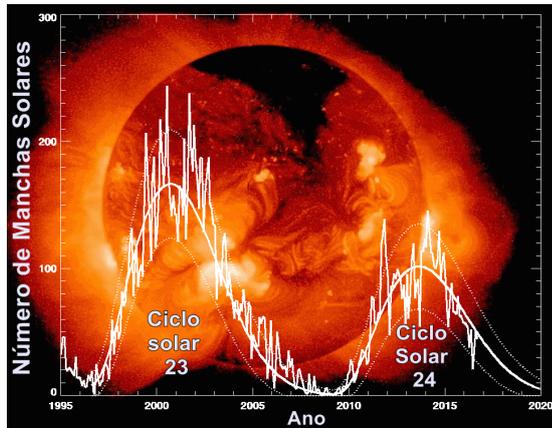
As variações temporais, tais como, variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos, influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera.

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em algumas regiões da ionosfera. A principal razão da existência da variação diurna é devido à radiação solar. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da Hora Local (HL), sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 HL (15 – 19 UTC), com pico próximo as 14 HL (McNAMARA, 1991; WEBSTER, 1993).

A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano devido a variação sazonal do ângulo zenital do Sol, bem como, a intensidade do fluxo de ionização. No hemisfério sul, os efeitos ionosféricos são maiores nos meses de equinócio e nos meses de solstícios são menores, porém com maior destaque os meses referentes ao inverno (McNAMARA, 1991; MONICO, 2008; MATSUOKA, 2007).

No que concerne às variações de ciclos de longos períodos com duração de aproximadamente 11 anos, são associadas as ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas (Figura 2).

Figura 2 – Número de manchas do Ciclo 24



Fonte: NASA, 2017.

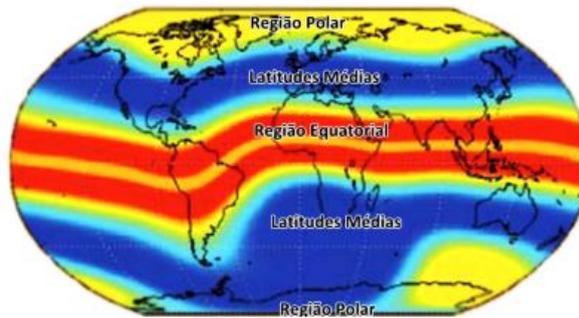
Atualmente (2017) o Sol está no período de declínio do denominado “ciclo 24”, e o período de máxima atividade solar compreendeu entre os anos de 2013 e 2014, o que ocasionou um aumento do número de manchas solares, e conseqüentemente, do número de elétrons na ionosfera.

Além disso, há uma forte influência de eventos solares sobre a Terra, como as Ejeções Coronais de Massa e Explosões Solares, pois dependendo da intensidade e magnitude destes eventos, faz com que, constantemente, a Terra seja “bombardeada” por plasma quente, magnetizado, supersônico, com considerável quantidade de energia cinética e elétrica e capaz de conduzir corrente. O efeito causado por esse bombardeio é a alteração das características do campo magnético normal (McNAMARA, 1991; MOLDWIN, 2008; KELLEY, 2006).

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar, e conseqüentemente, altera a densidade de elétrons. A Figura 3 apresenta a localização das três maiores regiões geográficas da ionosfera: Equatorial, Latitudes médias e Polar. As regiões equatoriais delimitadas aproximadamente pelas latitudes geomagnéticas 20° S e 20° N são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já, as regiões de latitudes médias, delimitadas entre a

latitude de  $\pm 20^\circ$  a  $\pm 60^\circ$ , são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares, delimitadas entre a latitude de  $\pm 60^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , não são muito previsíveis (WEBSTER, 1993).

Figura 3 – Regiões Geográficas da Ionosfera.



Fonte: Adaptado de Matsuoka, 2003

Devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre irregularidades (Mc NAMARA, 1991; OLIVEIRA, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético, devido à ação da gravidade e gradiente de pressão. Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (RISHBETH e GARRIOTT, 1969). Uma consequência da combinação dos movimentos é que dois picos de ionização são formados nas regiões subtropicais entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  de latitude geomagnética, sendo que no equador geomagnético fica menos intenso. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial.

As irregularidades na ionosfera da Terra podem produzir variações de curtos períodos nos sinais, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devido aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra a perda do sinal (MATSUOKA, 2007; CONKER et al., 2003;

DAVIES,1990). Essas rápidas flutuações são chamadas de cintilação ionosférica e, normalmente, as irregularidades do TEC que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude (DE PAULA et al., 2008; CONKER et al., 2003; AGUIAR, 2010).

De acordo com Davies (1990), um sinal de rádio que atravessa a ionosfera será modificado por irregularidades do tamanho de poucos metros até quilômetros, podendo se tornar um problema severo ao ponto de inviabilizar o rastreamento do sinal, assim, a cintilação pode causar tanto enfraquecimento e degradação do sinal, quanto perda de sinal.

Além disso, a cintilação também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas que são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida (WEBSTER, 1993, FEDRIZZI,2003). Ocorrem sempre após o pôr do Sol até a meia noite; não obstante, durante algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer (SAHAI, FAGUNDES e BITENCOURT, 2000; DE PAULA, 2008).

Estimativas de cintilação ionosférica podem ser definidas em termos da densidade espectral da potência do sinal (Power Spectral Density – PSD) (CONKER et al., 2003). Índices específicos também podem ser produzidos, os quais denotam fatores de intensidade de cintilação ionosférica. Dois índices são mais destacados na literatura: o índice S4, para cintilações de amplitude, e o índice Sigma- $\phi$  ( $\sigma\phi$ ), para cintilações de fase.

O índice adotado para análises foi de amplitude, o S4. Este índice é adimensional e alguns limiares para seu valor podem ser encontrados na literatura. Conker et al (2003) definem que um valor 0 indica ausência de cintilação, enquanto o valor 1 indica severa cintilação. Tiwari et al. (2011) apresenta três níveis de classificação para o referido índice:

- a) Cintilação forte:  $S4 \geq 1$ ;
- b) Cintilação moderada:  $0,5 < S4 < 1$ ;
- c) Cintilação fraca:  $S4 \leq 0,5$ .

Durante os eventos de cintilação, a performance do rastreamento em L1 é menos afetada que o rastreamento. Dessa forma, tanto em tempo real, quanto no modo pós-processado a ideia básica do conceito de VRS é gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação base próxima ao usuário. Assim, o usuário utiliza os dados dessa VRS como se ela fosse uma estação de referência real (ALVES, 2008).

### 3.1 Modelos e mapas ionosféricos

Durante Vários modelos foram e vêm sendo desenvolvidos para minimizar os efeitos da ionosfera para melhorar a acurácia do posicionamento, como o modelo de Klobuchar, NeQuick, modelos regionais ou de Grade, modelos tridimensionais, entre outros.

Outro modelo disponível aos usuários são os Mapas Ionosféricos que, tanto Globais (GIM) quanto regionais, são disponibilizados por diversos Centros no formato IONEX. No que concerne aos GIMs, o IGS tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados na sua geração. Quatro centros de análise do IGS produzem estimativas do GIM no formato IONEX. As agências que contribuem com o IGS são (IGS, 2017):

a) CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*): o TEC é modelado por uma expansão em harmônicos esféricos até grau e ordem 15, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Os parâmetros da ionosfera, a cada 2 horas, são obtidos a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS (240–260 estações). Considera a ionosfera como uma camada com altitude de 450 km;

b) ESOC (*European Space Operations Center*): utiliza um modelo bi-dimensional considerando a ionosfera como uma única camada com altitude de 450 km, empregando 185–230 estações, bem como um modelo baseado no perfil 3D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial;

c) JPL (*Jet Propulsion Laboratory*): a ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando splines bicúbicas numa grade esférica com 1280 triângulos esféricos. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L1–L2 e o atraso vertical nos pontos de uma grade ionosférica. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico, utilizando dados de 180–190 estações;

d) UPC (*Polytechnical University of Catalonia*): utiliza um modelo tomográfico estocástico e a ionosfera é dividida em duas camadas, com altitude de 450 km e 1130km, sendo utilizados dados de 185 – 205 estações.

Os arquivos IONEX, de todos os GIMs citados, contêm os valores de VTEC com resolução espacial de 5° x 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, com resolução temporal de 2 horas e tempo de latência de 11 dias. Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de cinco arquivos IONEX. Desde 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos Centros de Análise são combinados para gerar em um único arquivo IONEX, resultando então em cinco arquivos diários (IGS, 2016; MATSUOKA e CAMARGO, 2007).

Atualmente, já vem sendo disponibilizados mapas com latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS). Estes arquivos de cada centro de análise são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço eletrônico < ftp://cddis.gsfc.nasa.gov /gps/products/ionex/>.

A precisão média dos valores de VTEC fornecidos nos arquivos IONEX varia em função da região do globo, do número de estações GNSS utilizadas, entre outros fatores. Na América do Sul e, principalmente, no Brasil, a rede IGS é pouco densificada. A avaliação dos mapas de TEC do IGS pode ser encontrada em diversos trabalhos, dentre os quais pode-se citar: Armendaris, Matsuoka e Camargo (2009) entre outros.

A rede de estações de referência do IGS (<http://www.igs.org/network/complete.html>) na região brasileira conta apenas com oito estações, localizadas em Brasília, Eusébio, Cachoeira Paulista, Porto Velho, Recife, São Luiz, Salvador e Curitiba.

#### 4 Materiais e métodos empregados

Para a realização do experimento foi utilizado um sistema que vem sendo desenvolvido em linguagem C++ por pesquisadores da FCT/UNESP denominado VRS\_Unesp (ALVES, 2008; 2011). Este sistema possui caráter científico para realizar RTK em Rede usando o conceito de VRS no modo pós-processado.

Em relação ao experimento realizado para o posicionamento em redes, os dados de entrada para o sistema VRS\_Unesp foram:

- a) Arquivos de observação GPS no formato RINEX de uma rede de referência, no qual, optou-se por dados públicos das redes GNSS/SP e RBMC;
- b) Arquivos de efemérides precisas finais (no formato SP3) disponibilizadas pelo IGS.
- c) Arquivos no formato IONEX, disponibilizado por diversos centros como JPL, CODE, ESA, UPC, IGS.

Vale ressaltar, que é realizada interpolação espacial (ponderada) dos valores do VTEC do grid do IONEX, para a obtenção deste valor correspondente à posição da VRS gerada pelo programa.

Para o experimento foram utilizados os dados da RBMC do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), pois as estações de referência estão distribuídas em diferentes regiões do Brasil, sendo possível avaliar influência da localização no posicionamento baseado em redes em períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Deste modo, a fim de avaliar a influência espacial do TEC, foram geradas VRSs em cinco regiões, Sul, Sudeste, Nordeste, Norte e Central do Brasil.

Os dados das estações de referência da RBMC (Figura 4) empregados para as estações-base (Figura 1) da região Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central, serão respectivamente, POAL (Porto Alegre –RS), PPTE (Presidente Prudente – SP), NAUS (Manaus –AM), CEFT (Fortaleza –CE) e TOPL (Palmas – TO).

Figura 4 – Estações da rede RBMC próxima das estações a rede CIGALA/CALIBRA



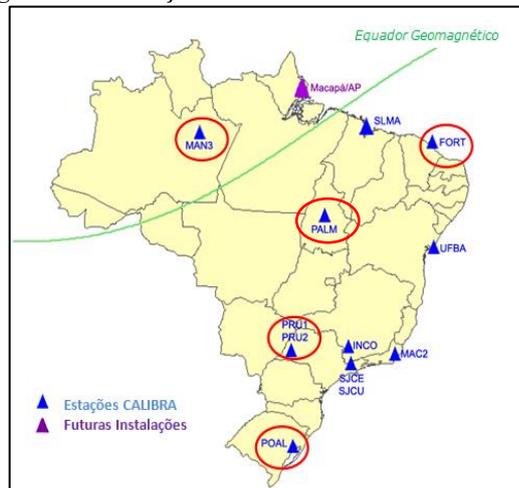
Fonte: Adaptado de IBGE, 2016

Vale ressaltar que o critério de escolha das estações base foi a proximidade das estações da Rede do Projeto CALIBRA/CIGALA <sup>5</sup>: POAL, PRU1, MAN3, FORT e PALM (Figura 5), com o objetivo de facilitar a análise da cintilação ionosférica, dentre outros parâmetros disponíveis software web ISMR Query Tool (VANI, SHIMABUKURO e MONICO, 2016). Este software web visa estender as possibilidades de análise dos dados concernentes ao monitoramento da ionosfera, por meio de técnicas de visualização e mineração de dados.

---

<sup>5</sup> CIGALA (Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in LatinAmerica) e o projeto CALIBRA (Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil) são iniciativas internacional (ESA- European Space Agency) para estudar/modelar os efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS. Mais informações <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php>>

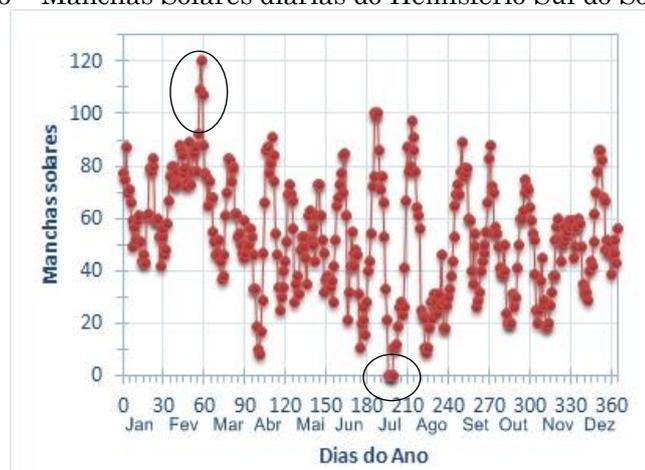
Figura 5 – Estações da rede CALIBRA/CIGALA.



Fonte: Adaptado de CIGALA/CALIBRA, 2016

Neste experimento foram empregados dados de cinco dias de intensa densidade de elétrons (24 à 28 de fevereiro – dias do ano 55 à 59), bem como dias de baixa intensidade eletrônica (15 à 19 de julho – dias do ano 196 à 200) de 2014 (pico do ciclo 24). Essa escolha foi realizada de tal forma que a avaliação correspondesse a um período de alta atividade ionosférica dentro da variação do ciclo 24 de longo período (Figura 2), bem como apresentasse irregularidades ionosféricas. A Figura 6 apresenta a quantidade de manchas solares do hemisfério sul para o ano de 2014.

Figura 6 – Manchas Solares diárias do Hemisfério Sul do Solem 2014



Fonte: Adaptado de NASA, 2016

Como pode-se observar na Figura 6 a quantidade de manchas solares no hemisfério sul no período de 24 à 28 de fevereiro destaca-se no ano de 2014, devido ao máximo de manchas solares atingindo (120 manchas). Por outro lado, os dias de julho, destacam-se por ter o número mínimo de manchas em 2014, 11 ou até mesmo com a inexistência de manchas.

No que concerne à geração dos dados da VRS, foram utilizados os arquivos IONEX do CODE, ESA, JPL, UPC e IGS, para corrigir o efeito ionosférico. Nesse caso, somente os dados da estação-base foram empregados, pois utilizando os arquivos IONEX é possível interpolar os erros ionosféricos diretamente para a posição da VRS. Assim, para cada dia do período de estudo, foram gerados cinco arquivos de VRS no formato RINEX, de modo que todos foram corrigidos do efeito troposférico utilizando o modelo de Hopfield (MONICO, 2008). As denominações das estratégias utilizadas foram:

- a) VRS\_CODE: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do CODE;
- b) VRS\_ESA: com correção da ionosfera utilizando o IONEX da ESA;
- c) VRS\_JPL: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do JPL;
- d) VRS\_UPC: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do UPC;
- e) VRS\_IGS: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do IGS – os valores obtidos com esse IONEX foram considerados como referência nas análises dos resultados, haja visto que o mesmo é a combinação dos demais Centros de Análises.

As VRSs foram geradas considerando uma linha de base de aproximadamente 100 km. Vale ressaltar que os dados destas estações foram empregados visando utilizar a melhor configuração nacional existente para realizar o posicionamento em rede, pois como se pode notar na Figura 4, as distâncias entre as estações variam devido a RBMC não ser uma rede homogênea, justificando o fato de fixar o tamanho da linha de base das sub-rede em uma distância relativamente longa, de modo a não beneficiar os resultados de uma região mais densificada. O Quadro 1 apresenta as coordenadas em SIRGAS2000, das VRSs geradas por região de estudo.

Quadro 1 – Coordenadas das VRSs das regiões de estudo

<b>Região</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Z(m)</b>
<b>Sul</b>	3467183,92	-4357762,47	-3099983,46
<b>Sudeste</b>	3766102,24	-4567407,88	-2367310,35
<b>Norte</b>	3177310,26	-5512972,11	-437851,12
<b>Nordeste</b>	4970840,77	-3963437,41	-512189,94
<b>Central</b>	4246158,59	-4636214,96	-1073512,73

Fonte: Elaborado pelos autores

Posteriormente, os dados das VRSs foram processados no serviço gratuito de pós-processamento do Canadian Spatial Reference System (CSRS-PPP) desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan), no modo cinemático a fim de evidenciar os efeitos ionosféricos no posicionamento, para validação e comparação dos resultados obtidos para cada centro de análise.

Optou-se por este software online, haja visto que o mesmo busca atualizações constantes, de modo que vários países, inclusive o Brasil, utiliza-o como base para serviços de PPP-online, como fornecido pelo órgão nacional, o IBGE

Para análise, foi calculado o Erro Quadrático Médio (EMQ – Equação 1), que proporciona o erro posicional cometido em cada época (por meio do arquivo de saída do pós processamento .pos) e o valor médio diário (por meio do arquivo de saída do pós processamento .sum), utilizando o software Gnuplot e o Microsoft Office Excel 2007, respectivamente. O cálculo do EQM pode ser realizado, pois se conhece a coordenada no qual os dados da VRS são gerados, como apresentado a seguir:

$$EMQ = \sqrt{\Delta X^2 + \sigma X^2} \quad (1)$$

Onde:

$\Delta X^2$  é a discrepância da coordenada;

$\sigma X^2$  é o desvio padrão da coordenada.

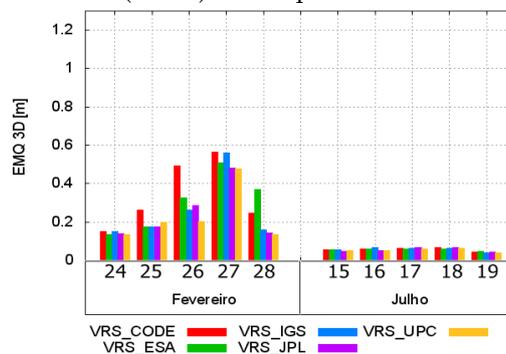
Deste modo, é possível avaliar a performance dos mapas globais da ionosfera no posicionamento baseado em redes em um país que sofre diversas influências da ionosfera.

Além disso, neste experimento, foram avaliados os gráficos do VTEC e o índice de cintilação gerado no programa ISMR Query Tool. Esses gráficos foram produzidos com intuito de avaliar as variações diurnas do VTEC e do índice S4.

## 5 Resultados e Análises

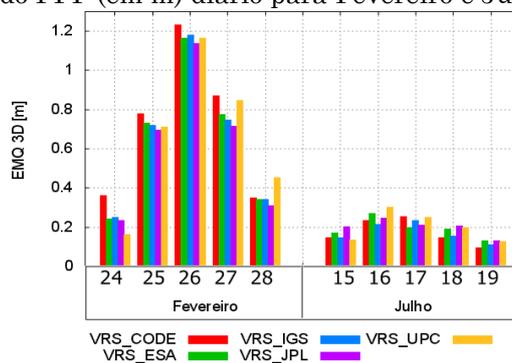
As Figuras 7 a 11 apresentam os resultados do EMQ 3D diário, considerando 24 horas de dados, do PPP no modo cinemático para o período de estudo para as regiões Sul, Sudeste, Norte, Nordeste, e Central, respectivamente. Com base nestas figuras é possível verificar a influência do efeito sazonal do TEC na qualidade da VRS, pois em julho, mês com densidade de elétrons relativamente baixa, resultou no EMQ 3D médio diário de 5,6cm, 18,8cm, 11,9cm, 11,3cm e 58,2cm para a VRS gerada no Sul, Nordeste, Norte, Sudeste e Central respectivamente. Do mesmo modo, porém referente a fevereiro, período de alta densidade eletrônica na ionosfera, apresentou valores 27,7cm, 66,1cm, 17,6cm, 23,13cm e 57,3 para o EMQ 3D.

Figura 7 – EMQ 3D do PPP (em m) diário para Fevereiro e Julho da região Sul.



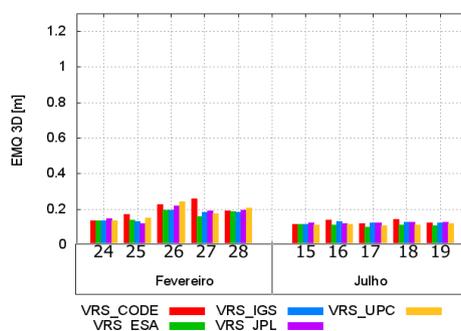
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 8 – EMQ 3D do PPP (em m) diário para Fevereiro e Julho da região Sudeste.



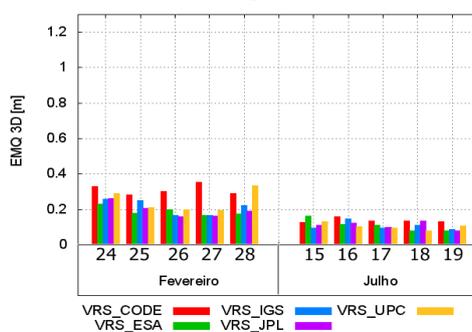
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 9 – EMQ 3D do PPP (em m) diário para Fevereiro e Julho da região Norte.



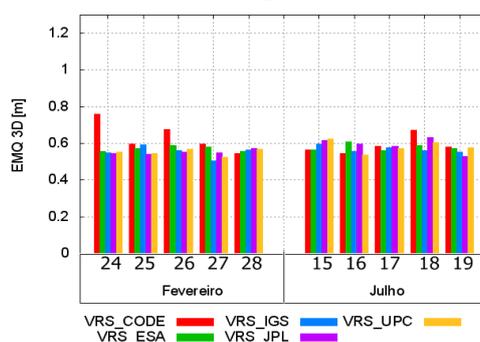
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 10 – EMQ 3D do PPP (em m) diário para Fevereiro e Julho da região Nordeste.



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 11 – EMQ 3D do PPP (em m) diário para Fevereiro e Julho da região Central.



Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação a comparação do uso dos diferentes IONEX, com base nos dados apresentados graficamente na Figura 7 a 11 pode-se verificar que os mapas ionosféricos não apresentam um padrão, quanto ao emprego de um único IONEX, que satisfaça todas as regiões brasileiras de maneira precisa. Além disso, é importante destacar que a diferença dos resultados empregando os IONEXs em período de baixa atividade ionosférica são em grande parte inferiores a 5 cm.

No entanto, com base nos resultados dos dias de estudo, considerando principalmente o período de alta densidade de elétrons, pode-se concluir que os melhores mapas ionosféricos a serem utilizados na região sul são os fornecidos pelo centro de análise UPC. No que concerne a região Sudeste, o melhor modelo adotado seria o JPL. Esta conclusão referente aos melhores modelos, bem como outras análises, pode ser verificada nos resultados também obtidos por Ortega, Alves e Aguiar (2014) e Caldeira (2016) em outros períodos de 2014.

No entanto, para as regiões norte, bem como para o nordeste, o melhor modelo para correção ionosférica é o fornecido pelo ESA, já para a região Central é o JPL. Por outro lado, o mapa do CODE foi o que apresentou os piores resultados em todas as regiões.

Note que em média o erro associado a alta densidade de elétrons é maior que os meses de baixa, evidenciando o efeito sazonal da ionosfera no posicionamento, exceto para a região Central (Figura 11). Deste modo, pode-se notar (Figura 8) que o erro referente ao posicionamento em período de alta atividade solar na região Sudeste é em torno de 2 à 3 vezes maior, porém em alguns casos este erro pode ser quatro ou até seis vezes maior que no período de baixa densidade de elétrons. Do mesmo modo, a região Sul (Figura 7) apresenta uma variação de 2 à 5 vezes.

No entanto, no que concerne a VRS gerada na região Norte (Figura 9), Nordeste (Figura 10) e Central (Figura 11), o erro não apresentou mudanças significativas quanto a variação sazonal, isso ocorreu, possivelmente, porque as primeiras regiões (Nordeste e Norte) estão espacialmente relacionadas com

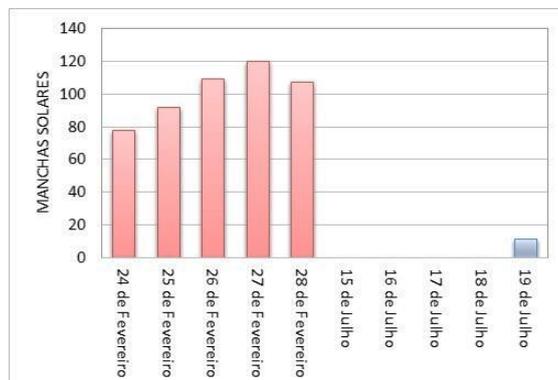
a elevação dos elétrons para as altas altitudes devido ao efeito fonte, ou seja, próximo a linha do equador geomagnético.

Por outro lado, o que concerne a região Central, mais estudos e investigações a respeito desta região devem ser realizados, pois embora não apresente variação sazonal, como as outras regiões (Nordeste e Norte), a região central apresentou um erro médio maior, em torno de 57 cm (Figura 11). Este valor representa quase o dobro em relação ao erro obtido na região norte em período de alta atividade ionosférica, e ainda é de 3 a 4 vezes maior do que o erro médio nas outras regiões no período de baixa atividade. Este valor de EMQ 3D elevado pode estar relacionado com alguma particularidade ionosférica, como a formação das bolhas de plasma, ou outro erro característico da região, ou ainda provindos da estação base TOPL, como a qualidade dos dados, bem como, ao mal funcionamento dos modelos para esta região.

Outro ponto a ser destacado, é a influência espacial evidenciada no período de alta atividade ionosférica, pois a região sudeste apresenta o triplo do EMQ se comparada com as regiões Sul, Norte e Nordeste. Acredita-se, pelo fato da região sudeste estar localizada sob a região equatorial, onde normalmente ocorre o pico do efeito da anomalia equatorial ( $\approx$  latitude geomagnética  $22^\circ$ ) e irregularidades ionosféricas, aumentando o efeito eletrojato da ionosfera.

Ao considerar os dias com maior quantidade de manchas solares, dias 57 e 58 (dias 26 e 27 de fevereiro – Figura 12) de 2014, destaca-se a região Sudeste e Sul, pois resulta em EMQ 3D de até 5 vezes (Sudeste) e 3 vezes (Sul) maior que a região Norte e Nordeste. Deste modo, nota-se a influência das manchas solares no valor do TEC, e conseqüentemente no erro ionosférico, prejudicando assim a qualidade do posicionamento. Como se pode observar, nestes dias, o EMQ na região sudeste alcançou a precisão métrica.

Figura 12 – Quantidade de Manchas Solares no período de estudo.

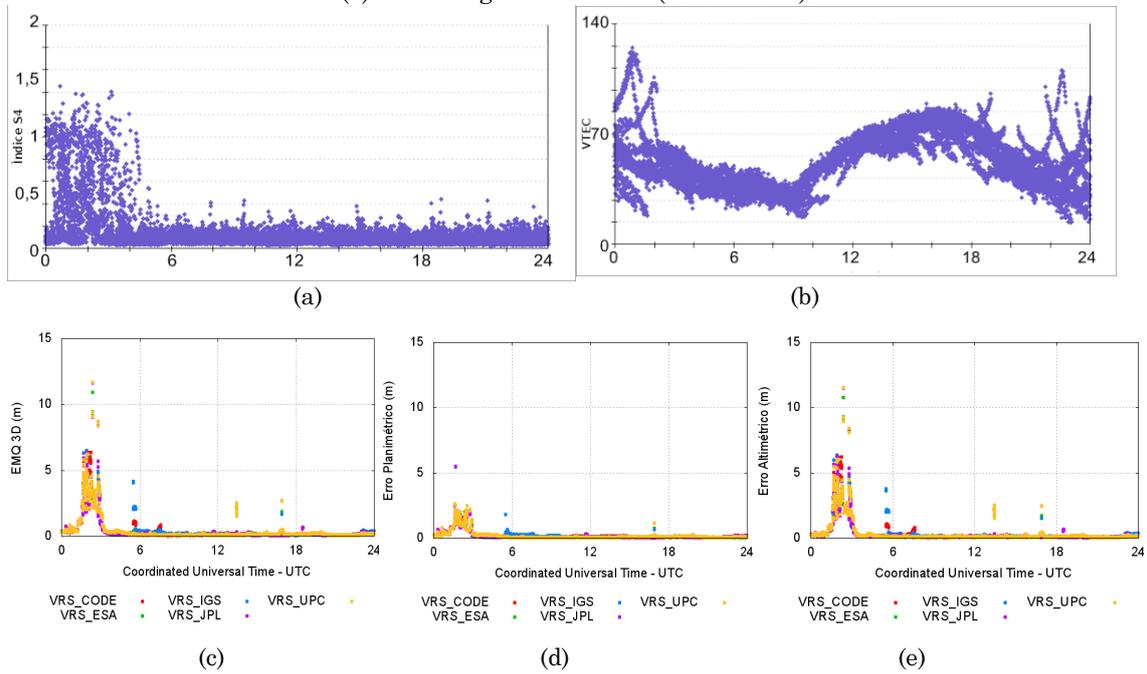


Fonte: Elaborado pelos autores

Este fato pode estar também relacionado com a cintilação ionosférica. Deste modo, para fim de comparação e análise, as Figuras 13 a 17 apresentam dados do índice S4(a) e VTEC(b) para estações da rede CIGALA/CALIBRA nas proximidades das estações base (Figura 5). Como pode ser observado, estes dias apresentaram cintilação forte ( $S4 \geq 0,7$ ), o que pode influenciar o resultado do EMQ, pois de acordo com Conker et al. (2003), quando o índice de cintilação S4 é maior que 0,707 os receptores podem perder parte ou totalmente o sinal transmitido pelos satélites, deteriorando assim o posicionamento.

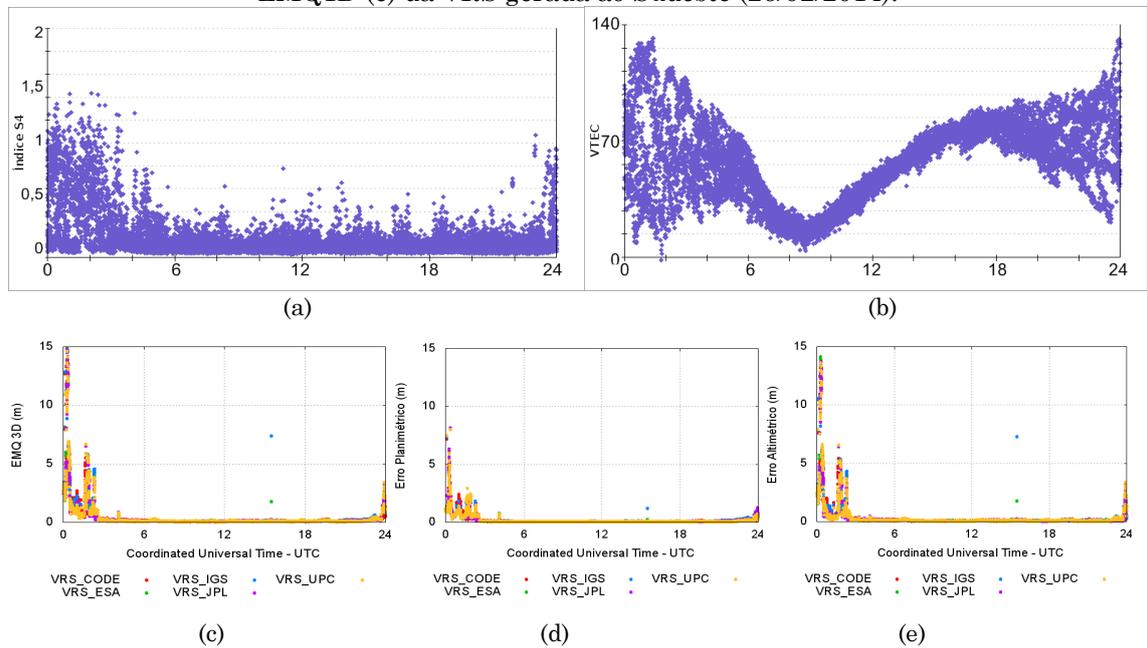
Além disso, as figuras a seguir (Figura 13 a 17) também apresentam os resultados do EMQ 3D (Planialtimetria – (c)), EMQ 2D (Planimetria (d)) e EMQ1D (Altimetria(e)) do PPP no modo cinemático época por época, dos dias que apresentaram o maior EMQ, os dias 27 e 24 de Fevereiro para regiões Sul e Nordeste, respectivamente, e os dias 26 de Fevereiro para região Norte, Sudeste e Central.

Figura 13 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação POAL e EMQ3D(c), EMQ 2D(d) e EMQ1D (e) da VRS gerada ao Sul (27/02/2014).



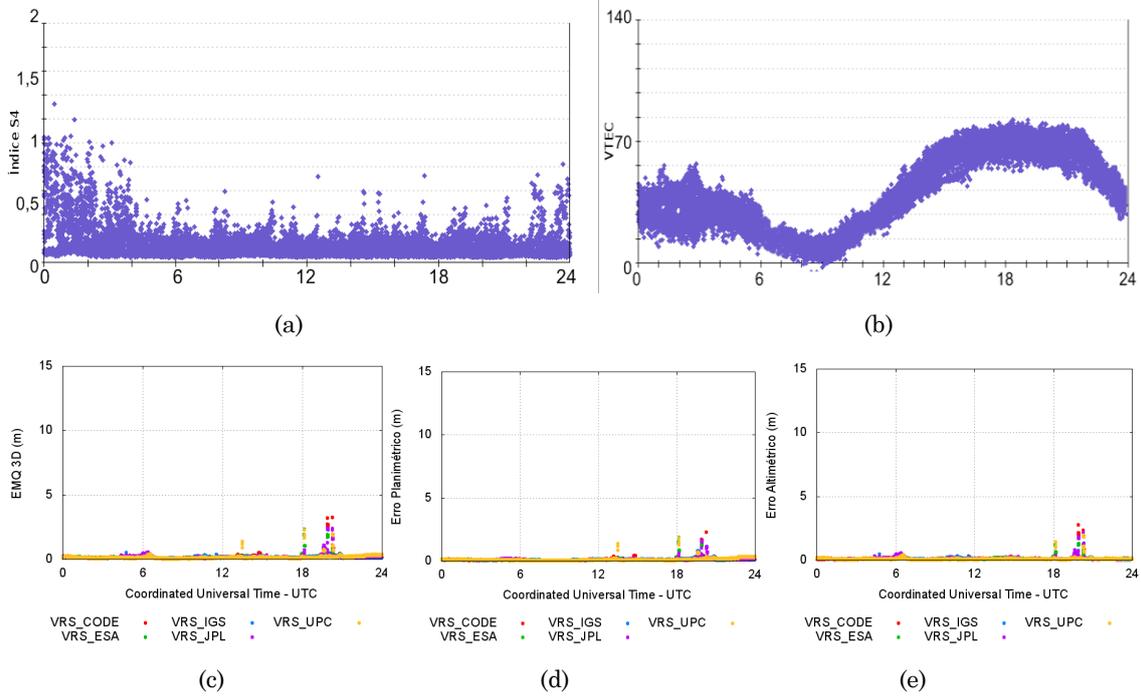
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 14 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação PRU1 e EMQ3D(c), EMQ 2D(d) e EMQ1D (e) da VRS gerada ao Sudeste (26/02/2014).



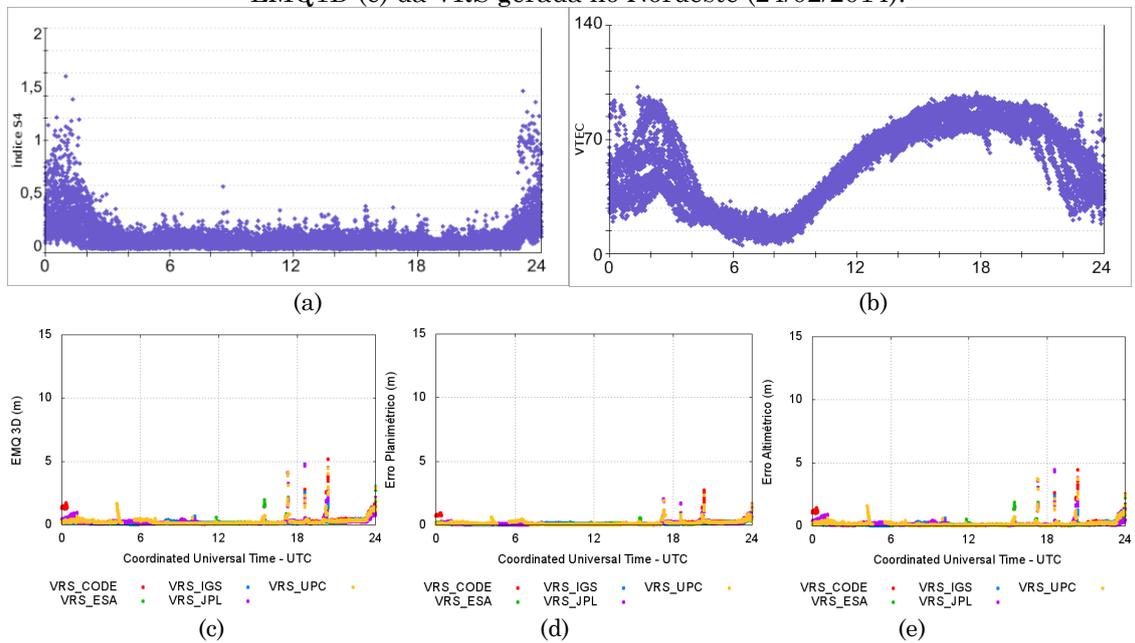
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 15 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação MAN3 e EMQ3D(c), EMQ 2D(d) e EMQ1D (e) da VRS gerada ao Norte (26/02/2014).



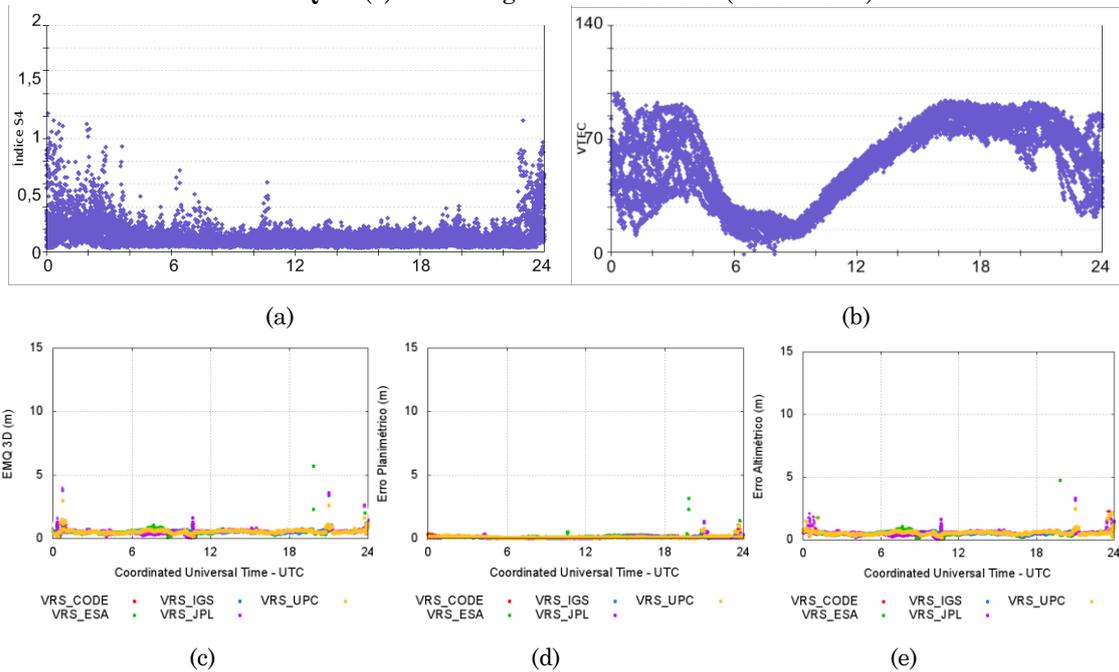
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 16 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação FORT e EMQ3D(c), EMQ 2D(d) e EMQ1D (e) da VRS gerada no Nordeste (24/02/2014).



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 17 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação PALM e EMQ3D(c), EMQ 2D(d) e EMQ1D (e) da VRS gerada no Centro (26/02/2014).

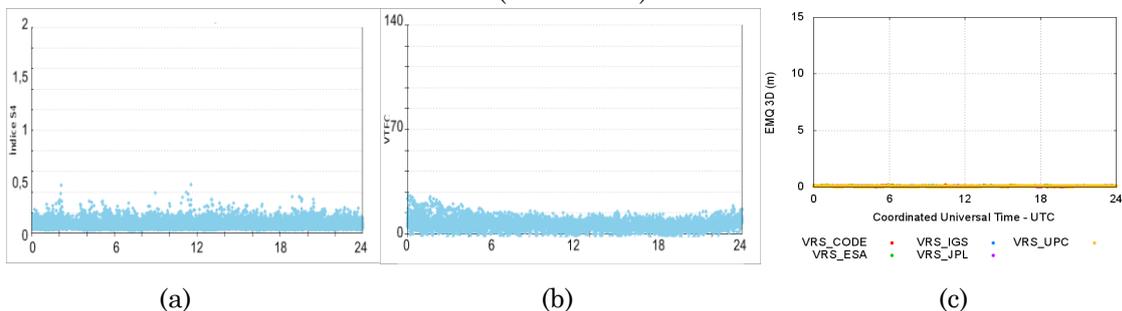


Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se mais especificamente nas regiões Sul e Sudeste (Figura 13 a Figura 14) a influência da cintilação ionosférica (em (a)), pois no período onde o índice de cintilação S4 foi maior que 0,7, acarretou em maior erro no posicionamento, principalmente para a componente altimétrica (apresentado em (e)). Isso resultou na degradação da qualidade do posicionamento, chegando aproximadamente 15m, entre as 0 – 5 e 23 –24 UTC. Além disso, pode-se observar (Figura 15 a 17) em (a) a influência do TEC, onde seu valor máximo ocorre próximo às 16–20 UTC e após o por do sol.

Para avaliar o efeito sazonal, bem como a variabilidade espacial diária do TEC, são apresentados nas Figuras 18 a 22 os resultados do EMQ 3D, época a época. Esses gráficos foram construídos para o dia que apresentou melhor qualidade, ou seja, menor erro posicional, ou seja, o dia 19 de julho para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul, Sudeste e Nordeste, bem como, os dias 17 e 18 de julho, para as regiões Norte e Central respectivamente.

Figura 18 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação POAL e EMQ3D(c) da VRS gerada no Sul (19/07/2014).



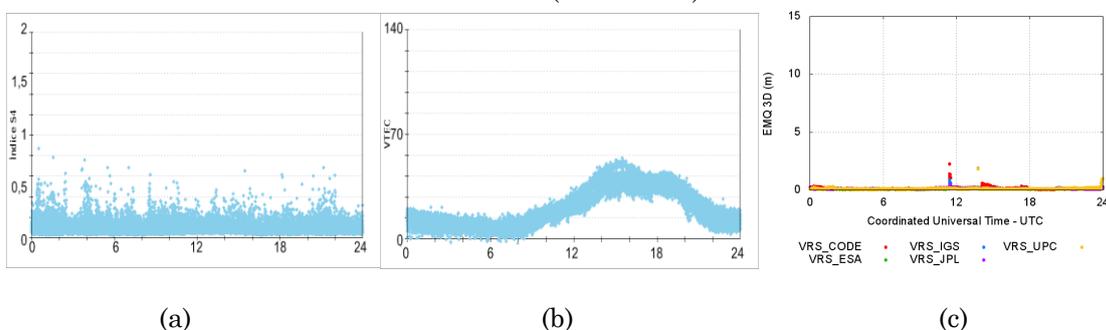
(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 19 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação PRU1 e EMQ3D(c) da VRS gerada no Sudeste (19/07/2014).



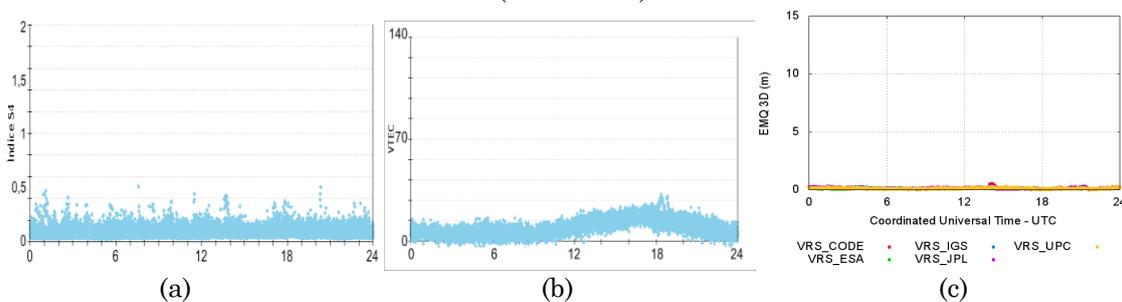
(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 20 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação MAN3 e EMQ3D(c) da VRS gerada no Norte (17/07/2014).



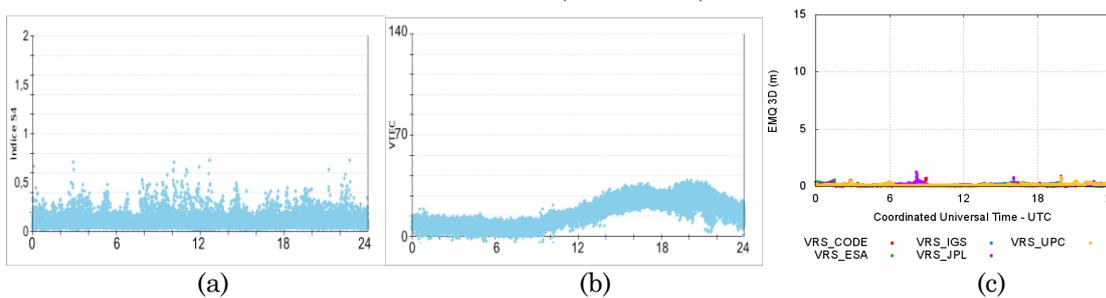
(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 21 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação FORT e EMQ3D(c) da VRS gerada no Nordeste (19/07/2014).



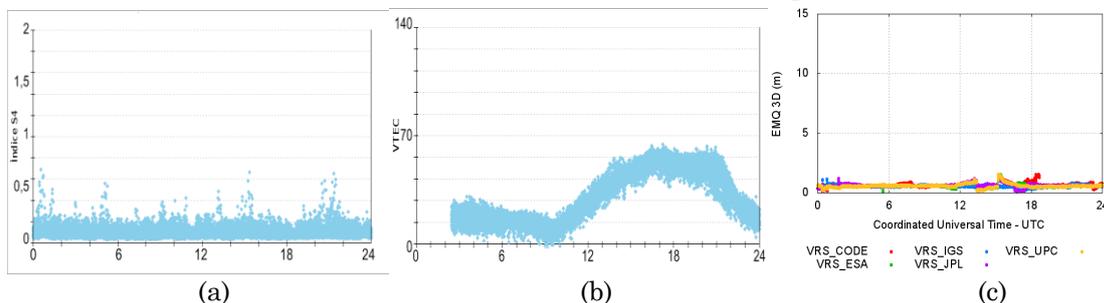
(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 22 – Índice S4(a) e VTEC(b) da Estação PALM e EMQ3D(c) da VRS gerada no Nordeste (18/07/2014). Período de 0h a 2h30 (b), não foram computados os valores do VTEC.



Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se, que a região Central apresentou maior VTEC (Figura 22 (b)) em período de baixa densidade de elétrons, atingindo seu pico em 65, uma possibilidade ao fato de apresentar o maior EMQ3D, em média 55cm (Figura 22 (c) e Figura 11). É importante destacar, que embora o período de estudo refere-se a baixa densidade de elétrons e sem manchas solares, a Região Sudeste também apresenta um valor de VTEC alto, seguido das regiões Nordeste e Norte.

Além disso, vale ressaltar, que diferentemente dos gráficos (Figura 13–17), a influência das irregularidades ionosféricas (0–5UTC) não é notado em período de baixa atividade ionosférica (Figura 18–22), como esperado.

## 5 Conclusão

Neste artigo, foi apresentada uma breve revisão bibliográfica envolvendo a composição e formação da ionosfera e seus efeitos no posicionamento, assim como a investigação das irregularidades ionosféricas e variações do TEC, além de algumas metodologias para mitigação dos efeitos da ionosfera, com o enfoque nos mapas globais da ionosfera.

Sendo assim, pôde-se perceber a importância de estudos que contribuem para análise do efeito ionosférico no posicionamento, principalmente quando é necessário realizar posicionamento acurado. Além disso, parte do território brasileiro está localizado na região do equatorial, sendo esta a mais crítica

para o posicionamento devido à ionosfera, o que torna pesquisas nesta área ainda mais relevantes.

Deste modo, considerando a ionosfera como a principal fonte de erro sistemático no posicionamento, principalmente com a utilização de redes, empregando o conceito de VRS, esse artigo se propôs a avaliar o desempenho dos Mapas Globais Ionosféricos, disponibilizados por diversos centros, como CODE, ESA, JPL, UPC e IGS, na geração da VRS. Para tanto foram empregados dados de um período de máxima e baixa atividade do pico solar do ciclo 24 (2014) e com alta cintilação ionosférica.

Com base nos resultados obtidos, o mapa ionosférico fornecido pelo centro de análise CODE foi o que apresentou os piores resultados na geração da VRS, considerando a realidade brasileira, com acurácia inferior a adotada como referência (VRS\_IGS), apresentando uma discrepância máxima de 18,38cm (27/02/2014 para a região nordeste), que representa uma piora de 109,08%.

No entanto, nota-se que não há um único modelo fornecido pelos centros de análise do IGS que melhor se enquadra a realidade brasileira, além disso, o desempenho do mapa depende das condições ionosféricas e, principalmente, da localização da estação. No entanto, considerando o período de alta densidade de elétrons, pode-se concluir que os melhores mapas ionosféricos a serem utilizados na região Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central, são os fornecidos pelo centro de análise UPC (melhora de 14,98%), JPL (melhora de 9,22%), ESA (melhora de 12,69%), ESA (melhora de 28,25%) e JPL (melhora de 9,13%), respectivamente.

É importante enfatizar que uma das vantagens dos mapas globais da ionosfera é que eles são disponibilizados na internet com acesso livre, neste caso, o usuário poderá melhorar seu posicionamento, seja absoluto ou relativo, sem custo adicional. Vale ressaltar ainda, que a precisão média dos valores de VTEC fornecidos nos arquivos IONEX varia em função da região do globo, do número de estações GNSS utilizadas, entre outros fatores, sendo estes predominantes na qualidade e acurácia pretendida no posicionamento.

De uma forma geral, esta pesquisa contribuiu com o desenvolvimento científico nacional, visto que a modelagem ionosférica é de extrema importância para realizar posicionamento acurado no Brasil, por estar localizado em região equatorial e de média latitude. Além disso, o posicionamento em rede pode ser utilizado em inúmeras aplicações, ainda mais com a evolução da densificação da RBMC.

### **Agradecimentos**

À FAPESP pelo financiamento da bolsa da primeira autora (2014/03858–9), pelo projeto Regular da segunda autora (processo 2012/19906–7) e projeto Universal CNPq (Processo 483954/2011–0) do terceiro autor. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa para a segunda autora e ao projeto Universal (processo 470112/2012–3). Ao projeto CIGALA e CALIBRA financiados pela Comissão Europeia (CE) no âmbito do FP7–GALILEO–2009–GSA e FP7–GALILEO–2011–GSA–1a, respectivamente, pelo fornecimento dos dados.

### **Referências Bibliográficas**

- AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion): Implementação em Tempo Real**. Dissertação de Mestrado –Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Programa de Pós–Graduação em Ciências Cartográficas. Presidente Prudente 2005. 159p.
- AGUIAR, C. R. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente. 2010. 258p.
- ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado em redes GPS utilizando o conceito de estação virtual**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Ciências Cartográficas, Presidente Prudente. 2008. 145p.
- ALVES, D. B. M. **Desenvolvimento e Implantação do RTK em Rede para Posicionamento Geodésico no Estado de São Paulo**, Pós–Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Departamento de Cartografia, Presidente Prudente. 2011. 141p

- ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. *In: ION GPS 2003*, Oregon Convention Center, Portland. Proceedings..., 2003. 11p.
- ARMENDARIS, O. C.; MATSUOKA, M T; CAMARGO, P. 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. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 2, 2009. p.208–223.
- BARBOSA, E. M. **Integridade, disponibilidade e acurácia no posicionamento RTK e RTK em rede: investigação no contexto da rede GNSS ativa do estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. Ciências Cartográficas, Presidente Prudente 2010. 140p.
- CALDEIRA, M.C.O. **Análise do Impacto do Efeito Ionosférico e Cintilação Ionosférica no Posicionamento Baseado em Redes e Por Ponto**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente. 2016. 122p.
- CALIBRA, Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL. Site: < <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php> >. Acessado em: 04/10/2016.
- CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Frequência**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Ciências Geodésicas, Curitiba. 1999. 191p.
- CONKER; R. S., EL-ARINI, M. B. HEGARTY, C. J., HSIAO, T., 2003, Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability, **Radio Science**, Vol. 38.
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; MUELLA, M. T. H.; CAMPOS, A. A. N.; SMORIGO, P. F.; NETO, A. C. Characteristics of the low latitude ionospheric irregularities and their effects over GPS signal. Ionospheric scintillation: Scientific Aspects Space Weather and Services Workshop. Nottingham, **Proceedings... 2008**.

- EULER, H. J.; KEENAN, R.; ZEBHAUSER, B. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. *In: ION GPS 2001*, Salt Lake City, Utah. Proceedings..., 2001. 26p.
- FOTOPOULOS, G. **Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations**. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary. 2000. 202p
- FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS**. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ciência Espacial/Geofísica Espacial, São José dos Campos. 2003. 256 p.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Site: <[www.ibge.gov.br/home/geociencias/rbmc](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/rbmc)>. Acessado em 04/10/2016.
- IGS, International GNSS Service Ionosphere WG Status Report: Performance of IGS Ionosphere TEC Maps –Position Paper Site: <[http://www.igs.org/assets/archive/04\\_rtberne/cdrom/Session11/11\\_0\\_Hernandez.pdf](http://www.igs.org/assets/archive/04_rtberne/cdrom/Session11/11_0_Hernandez.pdf)>. Acessado em 04/01/2017.
- KELLEY, M.C. **The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics**. International Geophysics Series, vol 43. San Diego: Academic Press, 2006. 544p.
- 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, pp.325–331.
- MATSUOKA, M.T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. Programa de Pós–Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente, 2003. 164p.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O. Correção Ionosférica Utilizando os Mapas Globais do TEC do IGS: Avaliação no Posicionamento Por Ponto na Região Brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.13, nº2, 2007, pp.253–270.
- MATSUOKA, M.T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263p. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia,

- Universidade Estadual Paulista. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente. 2007. 263p.
- MCNAMARA, L. F. The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding. Flórida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MOLDWIN, M. **An Introduction to Space Weather**, 3 Ed., New York: Cambridge Press, 2008. 134p.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora UNESP. 2008. 480p.
- NASA, National Aeronautics and Space Administration, Site: < [http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn\\_predict\\_l.gif](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_l.gif) >. Acessado em 30/01/2017.
- OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial**. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. 2003. 167p.
- ORTEGA, M. C; ALVES, D. B. M; AGUIAR, C. R. **Análise do Desempenho dos Mapas Ionosféricos no Posicionamento Baseado em Redes**. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2014, 11p.
- RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. *In: Annals of Geophysics*, vol. 52, n. ¾, 2009, pp. 417–422.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O.K. (1969) **Introduction to Ionospheric Physics**. 1st Edition, Academic Press, New York, 47, 234 p.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. Transequatorial F–region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics**, v. 62, n. 15, 2000. pp 1337–1383.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, H; STRANGWAYS H. J. WMod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation a\_ect in high latitude region. **In: General Assembly and Scientific Symposium**, 2011 XXXth URSI. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2011. pp. 1–4
- VANI, B. **Análise da Cintilação Ionosférica no Brasil empregando GNSS e Técnicas de Visualização de Dados**. Dissertação de Mestrado. Faculdade

de Ciências e Tecnologia da UNESP Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente. 2013.139p.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool. **Computers e Geosciences** (2016), Site: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.022>>. Acessado em: 07/01/2017.

WEBSTER, I. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada. 1993. 125p.