



AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO DE GRADE IONOSFÉRICA BRASILEIRA (GIB)

Thalles Felipe Kovalczuk Ribeiro¹, Claudinei Rodrigues de Aguiar²

¹Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Bolsista da UTFPR/Brasil.
thallesribeiro@hotmail.com

²Orientador, Doutor, Departamento de Engenharia Civil, UTFPR. rodriguesaguiar@utfpr.edu.br

RESUMO

O Sistema Global de Navegação por Satélite tem crescente uso nas mais diversas aplicações como agricultura, navegação aérea, marítima e terrestre, entre outras. Porém, os sinais deste sistema estão sujeitos a diversas fontes de erros destacando-se a ionosfera terrestre através, principalmente, do efeito da refração ionosférica. O erro sistemático referente à ionosfera pode ser minimizado através da adoção de modelos ionosféricos, como o GIB (Grade Ionosférica Brasileira). Este trabalho buscou analisar a eficiência do GIB e compará-lo com o modelo CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Obteve-se resultados satisfatórios de boa acurácia e baixa dispersão das coordenadas corrigidas.

PALAVRAS-CHAVE: Grade Ionosférica Brasileira; GNSS; Ionosfera.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) foi desenvolvido para fornecer informações de posição, velocidade e tempo (PVT) nas mais adversas condições climáticas. O primeiro sistema desenvolvido foi o GPS (*Global Positioning System*) pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (USNO, 2017). Sua manutenção e modernização nos anos seguintes possibilitou sua grande difusão tornando-o o sistema mais utilizado atualmente.

A principal fonte de erro nos sinais GNSS é o atraso dos sinais rastreados pelo receptor devido, principalmente, à camada ionosférica terrestre. A principal fonte deste está diretamente associada ao conteúdo total de elétrons livres (TEC- *Total Electron Contents*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal. Esse erro, assim como o TEC, variam no tempo e no espaço e são influenciados por fatores como atividade solar, posicionamento terrestre em relação ao sol, entre outros.

Devido à esse problema, modelos matemáticos da ionosfera foram desenvolvidos e posteriormente implementados em forma de algoritmos a fim de possibilitar a correção destes erros. Dentre eles citam-se o Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion), desenvolvido por Camargo (1999), sendo analisado posteriormente por Matsuoka (2003) e implementado para aplicações em tempo real por Aguiar (2005), e o da Grade Ionosférica Brasileira (GIB) desenvolvido por Aguiar (2010). O foco deste trabalho é avaliar a qualidade da correção do modelo GIB em períodos de baixa e alta atividade solar.

O GIB modela a ionosfera a partir de observações GNSS obtidas por receptores de no mínimo duas frequências. Assim, as redes geodésicas GNSS constituem-se numa importante infraestrutura para o monitoramento e modelagem da ionosfera.

Nesse sentido, destaca-se a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sob responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a qual conta com 129 estações (abril/2017) ativas e distribuídas por várias regiões do Brasil, como mostrado na figura 1. Essa rede tem por objetivo coletar e armazenar as observações do código e da fase de ondas portadoras transmitidas pelos satélites GPS ou GLONASS. Cada estação possui um receptor e antena geodésica, conexão de Internet e fornecimento constante de energia elétrica que possibilita a operação contínua da estação. (IBGE, 2017).



X EPCC

Encontro Internacional de Produção Científica 24 a 26 de outubro de 2017

ISBN 978-85-459-0773-2



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências - DGC
Coordenação de Geodésia - CGED

REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS



Figura 1: Mapa de estações RBMC.
Fonte: IBGE (2017).

A operação das estações da RBMC é totalmente automatizada, suas observações são organizadas em arquivos divididas de acordo com o tempo universal (UT – *Universal Time*). Posteriormente, os arquivos com as respectivas observações são transferidos do receptor para o Centro de Controle da RBMC - Kátia Duarte Pereira, onde há a criação de novos arquivos no



formato padrão de RINEX (*Receiver INdependent EXchange*) versão 2. Em seguida esses arquivos são disponibilizados para *download* no portal do IBGE (IBGE, 2017).

A atmosfera terrestre pode ser descrita, para propósitos práticos, como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à Terra, e que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas (HARGREAVES, 1992). Segundo Aguiar (2010), tratando-se da análise de propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera pode ser dividida em troposfera e ionosfera, pois elas se propagam neste meio, onde sofrem diferentes influências.

Ao se propagar pela ionosfera, o sinal GNSS fica sujeito a um atraso causado principalmente pela densidade de elétrons presentes nesta camada, quantificado pelo TEC. Apesar da considerável interferência no sinal GNSS, a quantificação das mudanças de onda oferece informações de grande importância sobre o nível de ionização da ionosfera. (JACOWSKI et al., 2012).

Outro efeito a qual as ondas de sinal GNSS estão sujeitas é o da cintilação ionosférica, que se trata de rápidas variações aleatórias na fase e amplitude deste sinal, este efeito é causado por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera (AGUIAR, 2010).

O comportamento ionosférico é influenciado por fatores como incidência solar, que influencia no TEC, este comportamento pode ser analisado através de índices como o *K-index* (K_p), *Solar Flux* at 10.7cm (F10.7cm) e *Disturbance Storm-Time* (DST).

O *K-index* quantifica a perturbação do campo magnético terrestre com números inteiros em um intervalo de 1 a 9, indicando tempestades geomagnéticas. (SWPC, 2017).

O *Solar Flux* at 10.7 cm é um índice que mede a incidência de raios solares no comprimento de onda de 10.7 cm, ou a 2800 MHz. Este índice é um dos mais extensos registros de atividade solar, ele correlaciona-se bem com o número de manchas solares, índices de raios ultravioleta e irradiação solar (SWPC, 2017).

O índice DST é usado para observar a atividade solar próxima ao equador. Esse índice é derivado de escalas horárias de variação magnética horizontal de baixa latitude. Eles mostram o efeito da corrente de anel equatorial de alta altitude que flui para oeste, o que causa a perda da fase principal durante grandes tempestades magnéticas (NCEI, 2017).

A Grade Ionosférica Brasileira (GIB) trata-se de um aplicativo computacional que implementa os modelos desenvolvidos por Aguiar (2010), onde há a conversão das medidas de atraso ionosférico para a direção vertical em todos os pontos observados por uma estação de referência, seguida pela estimativa do atraso de *hardware* dos satélites e receptores, bem como geração de uma grade do atraso ionosférico vertical utilizando funções de interpolação adaptativas e seu nível de confiança (GIVE - *Grid Ionospheric Vertical Error*). A partir dessa grade é possível estimar o atraso ionosférico e o limite de confiança (GIVE) para o usuário (AGUIAR, 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Através da análise dos dados do índice F10.7 cm registrado ao longo dos anos, observa-se um comportamento cíclico da incidência de raios solares, são os chamados ciclos solares. Atualmente se está no final do ciclo 24, como pode-se observar na figura 2, que teve seu pico por volta do ano de 2014 e seu período de menor atividade entre 2009 e 2010. Para desenvolvimento deste trabalho, foram escolhidos esses anos para a análise do comportamento ionosférico.

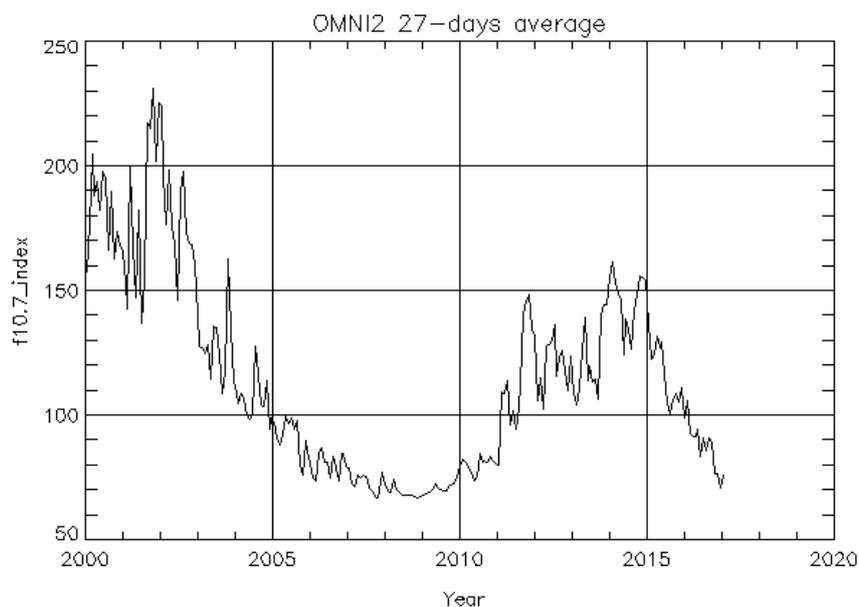


Figura 2 - f10.7 index relativo aos anos de 2000 a 2017.
Fonte: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi> (2017).

Posteriormente, selecionou-se aleatoriamente como dias para análise os dias 02 de janeiro de 2014, referente ao dia de alta atividade na máxima do ciclo solar 24, e o dia 07 de janeiro de 2010, referente ao dia de baixa atividade solar na mínima do ciclo solar 24, através da análise dos índices Kp e DST.

Os dados utilizados para analisar esses dias foram das estações da RBMC, fornecidos pelo IBGE, além dos dados de órbita IGS (*International GNSS Service*), disponibilizados pela NASA. Cada dia é orientado segundo o calendário GNSS, tendo um número relativo a cada dia do ano (DOY – *Day of Year*) e um número para cada semana, denominada semana GPS, assim, é possível encontrar os arquivos necessários ao processamento dos dados no modelo GIB.

Agrupados os arquivos, o programa GIB os analisa e gera mapas ionosféricos no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*), com resolução espacial a partir de 1° em latitude e 1° em longitude e resolução temporal de 10 minutos.

Em todos os processamentos, foi removida a estação de Presidente Prudente (PPTe), para realização do pós-processamento considerando esta como receptor GPS, simulando um usuário do sistema.

Após o processamento pelo GIB, foi utilizado o software RTKLIB 2.4.2 (TAKASU, 2013), distribuído sob a licença *BSD-2-Clause*, a fim de aplicar o método de posicionamento por ponto e calcular as coordenadas X, Y e Z relativas a estação PPTe. Para a análise da qualidade das correções, utilizou-se os arquivos de coordenadas gerados pelo *software* sem correção ionosférica, com a correção pelo GIB e com a correção fornecida pelos mapas globais do CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), ambas em formato IONEX.

Através dos arquivos obtidos pelo pós-processamento, calculou-se as discrepâncias (Dx, Dy e Dz) entre cada coordenada através da equação 1, onde as coordenadas verdadeiras (ou de referência) são fornecidas pelo IBGE na época 200,4 e, posteriormente, corrigidas para a época dos processamentos através de *software online* TREVEI (PROL et al., 2014) disponibilizado pelo Grupo de Estudos e Pesquisa Geodésica da UNESP.



$$\begin{aligned} D_x &= X_{real} - X_{calculada}; \\ D_y &= Y_{real} - Y_{calculada}; \\ D_z &= Z_{real} - Z_{calculada}. \end{aligned} \quad (1)$$

Para melhor análise, calculou-se o valor das discrepâncias resultantes em três dimensões (D_{3D}) através da equação 2.

$$D_{3D} = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}. \quad (2)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSAO

Através do processamento pelo GIB e pós processamento pelo *software* RTK, obteve-se um conjunto de coordenadas X, Y e Z onde foi possível realizar o cálculo das discrepâncias D_{3D} para cada intervalo de 10 minutos. Com estes valores calculou-se a média e o desvio padrão, bem como verificou-se o valor máximo e o mínimo do conjunto de valores do dia, o mesmo procedimento foi realizado para o arquivo RINEX com a correção ionosférica a partir do IONEX do CODE. Os valores referentes ao dia de alta atividade podem ser observados na Tabela 1 e os de baixa atividade na Tabela 2, onde são apresentados os valores obtidos com a correção disponibilizada pelo CODE, pelo GIB e sem a aplicação de qualquer correção.

Tabela 1: Valores referentes ao dia de alta atividade

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
SEM	4,582	2,892	15,931	0,310
CODE	2,840	2,578	15,306	0,153
GIB	3,488	2,349	18,578	0,246

Fonte: Autores (2017).

Tabela 2:- Valores referentes ao dia de baixa atividade

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
SEM	4,209	2,328	11,639	0,049
CODE	1,829	0,988	7,687	0,071
GIB	1,768	1,522	18,849	0,103

Fonte: Autores (2017).

Nas tabelas 1 e 2 observa-se que os mapas ionosféricos dos CODE e do GIB melhoram o resultado do posicionamento tridimensional do GPS, tanto em termos de acurácia quando em termos de dispersão em torno da média. No dia de alta atividade solar o CODE apresentou melhor resultado do que o GIB, onde o erro médio do posicionamento reduziu de 4,582 m para 2,840 m e 3,488 m com a correção do CODE e do GIB, respectivamente. No período de baixa atividade a correção foi ainda mais expressiva utilizando ambos modelos, destacando-se o GIB que apresentou resultado ligeiramente melhor. Na baixa atividade solar o erro do posicionamento reduziu de 4,209 m para 1,829 m e 1,768 m após a correção com dados, respectivamente, do CODE e do GIB.

A partir das discrepâncias obtidas com e sem as correções ionosféricas foi possível gerar os respectivos gráficos para cada dia, no intervalo de 10 minutos. Esses podem ser observados na figura 3, referente ao dia de alta atividade e na figura 4, referente ao dia de baixa atividade.

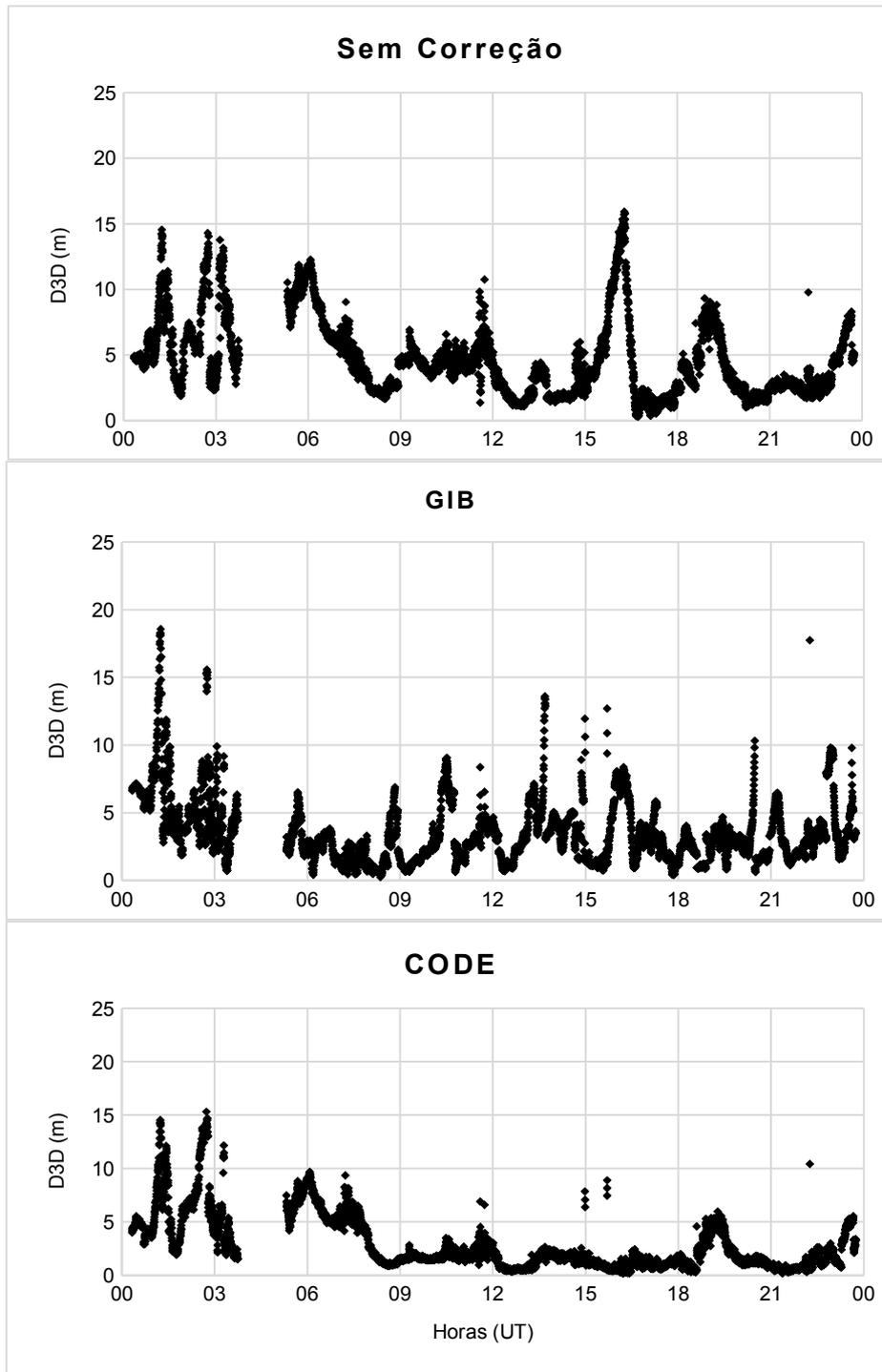
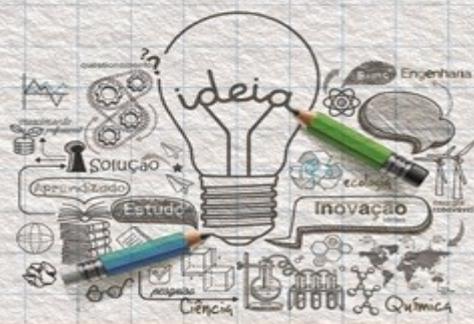


Figura 3: Erro no posicionamento (discrepância) relativo ao dia de alta atividade – 02/01/2014 (DoY 002).
Fonte: Autores (2017).

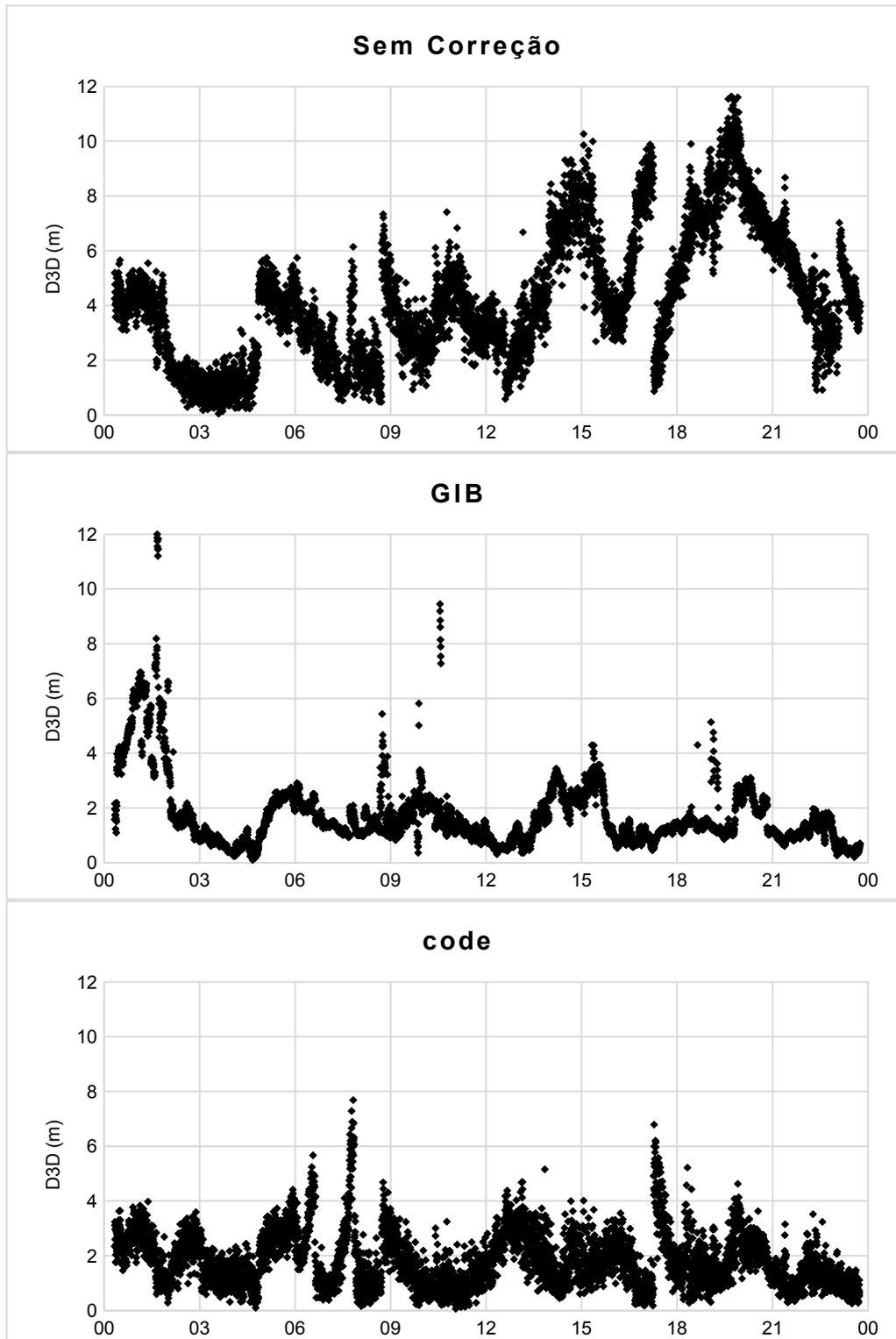


Figura 4: Erro no posicionamento (discrepância) relativo ao dia de baixa atividade – 07/01/2010 (DoY 007).
Fonte: Autores (2017).

Pelas figuras 3 e 4 observa-se que o erro no posicionamento devido à influência da ionosfera apresentar maior magnitude nas primeiras horas do dia e após as 15 horas UT (12 horas locais). As causas do erro nesses diferentes horários são provocadas por diferentes fenômenos que ocorrem na



atmosfera superior. Nas primeiras horas do dia ocorre um processo chamado de cintilação ionosférica que afeta significativamente os sinais GNSS. Após as 15 horas UT, com o sol quase em posição zenital, há uma maior incidência de fluxo solar sobre a ionosfera aumentando a produção de elétrons e intensificando um fenômeno chamado de eletrojato (efeito fonte) na região equatorial, na qual o Brasil se encontra.

4 CONCLUSÃO

A aplicação de modelos como o GIB para a correção do erro no sinal de GNSS possibilita uma maior precisão no posicionamento, principalmente em receptores de simples frequência, sendo estes cada vez mais utilizados para aplicações civis.

Através da análise dos resultados, observou-se que o GIB apresentou um bom desempenho para a correção dos sinais, tanto em termos de acurácia quanto de dispersão em torno da média, sendo mais expressivo em períodos de baixa atividade, sofrendo algumas interferências aleatórias por conta do efeito de cintilação ionosférica em períodos onde há maior incidência solar. Logo, o modelo apresentou resultados satisfatórios e promissores.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Claudinei Rodrigues de. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

AGUIAR, Claudinei Rodrigues de. **MAPAS DE TEC IONEX EM TEMPO REAL GERADOS PELO MODELO GIB (GRADE IONOSFÉRICA BRASILEIRA)**. 2015. 17f. Artigo - Revista Brasileira de Cartografia, 2015.

AGUIAR, Claudinei Rodrigues de. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores gps de uma frequência**. 1999. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere**. Cambridge: Cambridge Press, 1992. 420p.

IBGE. **RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>>. Acesso: 30 março 2017.

JAKOWSKI N.; Béniguel Y.; De FRANCESCO G.; PAJARES M. H.; Jacobsen K. S.; STANISLAWSKA I.; TOMASIK L.; WARNANT R.; WAUTELET G. **Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques**. J. Space Weather Space Clim., 2012, 2, A22.

PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, F. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A. C.



Encontro Internacional
de Produção Científica
24 a 26 de outubro de 2017

ISBN 978-85-459-0773-2

Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. Revista Brasileira de Cartografia, N° 66/3, p. 569-579, 2014.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira.** 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora da UNESP, 2008.

NASA. International. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/content/international/>>. Acesso: 30 março 2017.

NCEI - National Centers of Environmental Information. **The Disturbance Storm Time Index.** Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/dst.html>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

SWPC - Space Weather Prediction Center. **Planetary K-Index.** Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

SWPC - Space Weather Prediction Center. **F10.7 cm Radio Emissions.** Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

TAKASU, T. **RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.** ver. 2.4.2. Japan: Tokio. 2013.

USNO. **GPS SYSTEM DESCRIPTION.** Disponível em: <<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpssy.txt>>. Acesso em: 05 abr. 2017.