

Revista Brasileira de Cartografia (2016) N^o 68/1: 211-221
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

IMPACTO DA DENSIFICAÇÃO DA RBMC ENTRE 2012 E 2014 SOBRE A CAPACIDADE DE MONITORAMENTO DO TEC

Impact of 2012 to 2014 RBMC Densification Over TEC Monitoring Capacity

Wagner Carrupt Machado¹ & Claudinei Rodrigues de Aguiar²

¹**Universidade Federal de Uberlândia – UFU**
Laboratório de Topografia e Geodésia – LTGEO, Campus Monte Carmelo - MG
Rod LMG 746, km 01, s/n, bloco1 CEP 38500-000, Monte Carmelo – MG - Brasil
wagnercarrupt@ufu.br

²**Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR**
Coordenação de Engenharia Civil - Apucarana Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Pato Branco
Rua Marcílio Dias, 635 CEP 86812-460 - Apucarana - PR - Brasil
rodriguesaguiar@utfpr.edu.br

Recebido em 28 de Maio, 2014/ Aceito em 21 de Novembro, 2015
Received on May 28, 2015/ Accepted on November 21, 2015

RESUMO

Durante a propagação entre a antena dos satélites e a antena do receptor, os sinais GNSS interagem com partículas eletricamente carregadas, bem como com moléculas e átomos neutros, presentes na atmosfera terrestre. Isto causa refrações e distúrbios na potência e na forma do sinal que provocam variações na velocidade, na amplitude, na fase e na direção de propagação, deteriorando a qualidade do posicionamento. No entanto, é importante salientar que se por um lado a atmosfera afeta negativamente o posicionamento por satélites, por outro, os sinais GNSS vem sendo utilizados como sensores deste meio, o que permite modelar e reduzir tais efeitos negativos. Destaca-se que o atraso ionosférico de primeira ordem, responsável por mais de 99% deste atraso, é proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC), o qual pode ser calculado a partir de observações GNSS. Neste sentido, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) representa uma importante infraestrutura para se obter tal quantidade. Um dos modelos desenvolvidos para se determinar o TEC assume que ele esteja totalmente concentrado em uma camada esférica de espessura infinitesimal e de altitude pré-definida, normalmente entre 300 km e 450 km. Neste caso, o TEC é calculado na intersecção do vetor satélite-receptor com esta camada, denominado de ponto ionosférico (IPP – *Ionospheric Pierce Point*). Portanto, a disponibilidade de IPPs tem impacto direto sobre a qualidade com que os modelos da ionosfera representam o TEC, bem como sobre o nível de confiança dos modelos. Até 2012, a RBMC possuía 88 estações, aumentando para 112 em 2014. Este artigo visa mostrar o impacto da densificação da RBMC entre 2012 e 2014 sobre a quantidade, distribuição espacial e cobertura temporal dos pontos ionosféricos considerando as constelações GPS e GLONASS, o que permite evidenciar as regiões que possuem maior deficiência sobre a modelagem da ionosfera e ajudar no planejamento da implantação de novas estações.

Palavras chaves: GNSS, RBMC, Ponto Ionosférico, Modelagem do TEC.

ABSTRACT

During propagation between the satellite antenna and receiver antenna, GNSS signals interact with electrically charged particles as well as molecules and neutral atoms present in the atmosphere. This causes refraction and disturbances on

the power and signal shape that cause variations in speed, amplitude, phase and propagation direction, deteriorating the quality of positioning. However, it is important to note that on one hand the atmosphere adversely affects satellite positioning, on the other hand, GNSS signals have been used as sensors of this medium, which allows modeling and reduce such negative effects. It is noteworthy that the first order ionospheric delay, accounting for over than 99% of this delay, is proportional to the total electron content (TEC), which can be calculated from GNSS observations. Thus, Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems (RBMC) represents an excellent infrastructure for obtaining such quantity. One of the models developed to determine the TEC assumes that it is completely concentrated in an infinitesimal thin spherical layer with a predefined altitude, typically between 300 km and 450 km. In this case, the TEC is calculated at the intersection of the satellite-receiver vector with this layer, called ionospheric piercing point (IPP). Therefore, the availability of IPPs has a direct impact on the quality on how the ionospheric models represent the TEC as well as on the confidence level of such models. At the end of 2012, RBMC had 88 stations and it was increased to 112 in 2014. This contribution aims to show the impact of densification RBMC between 2012 and 2014 on the amount, spatial distribution and temporal coverage of the IPP considering GPS and GLONASS constellation, which allows to highlight the regions with major ionospheric modeling shortcomings and help in planning the establishment of new stations.

Keywords: GNSS, RBMC, Ionospheric Piercing Point, TEC Modeling.

1. INTRODUÇÃO

As observáveis utilizadas no posicionamento com GNSS (*Global Navigation Satellite System*) são obtidas em função do tempo de propagação dos sinais emitidos pelos satélites. Se tais sinais se propagassem no vácuo, a velocidade de propagação seria igual à velocidade da luz neste meio. No entanto, durante a propagação entre a antena dos satélites e a antena do receptor, os sinais GNSS interagem com partículas eletricamente carregadas, bem como com moléculas e átomos neutros, presentes na atmosfera. Isto causa refração e distúrbios na potência e na forma do sinal que provocam variações na amplitude, na fase, na velocidade e na direção de propagação. Como consequência, a qualidade do posicionamento é deteriorada.

Embora a atmosfera afete negativamente o posicionamento por satélites, os sinais GNSS vêm sendo utilizados como sensores deste meio. Um exemplo é a possibilidade de se monitorar o Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Contents*) calculado a partir das observações GNSS (JAKOWISKY *et al.*, 2012). Além de fornecer informação sobre a ionosfera, esta quantidade permite calcular o atraso ionosférico nos sinais GNSS provocado pelos efeitos de primeira ordem da ionosfera, o qual é responsável por mais de 99% do referido atraso (CAMARGO, MONICO & FERREIRA, 2000; PETIT; LUZUM, 2010).

É importante destacar que o campo geomagnético exerce influência sobre a

distribuição de íons e elétrons na ionosfera. Neste caso, a região do equador geomagnético apresenta os valores mais elevados do TEC, bem como gradientes temporais e espaciais mais acentuados, principalmente em períodos de alta atividade solar, conforme pode ser visto na Figura 1. Esta região também está sujeita a distúrbios, tais como a cintilação e anomalia equatorial (DAVIES, 1990).

Um dos modelos mais utilizados para se determinar o TEC assume que esta quantidade esteja totalmente concentrada em uma camada esférica de espessura infinitesimal localizada em uma altitude pré-definida, normalmente entre 300 km e 450 km. Neste caso, o TEC inclinado (STEC – *Slant TEC*) é calculado na intersecção do vetor satélite-receptor com esta camada, denominado de ponto ionosférico (IPP – *Ionospheric Pierce Point*) (SKONE, 1998). Portanto, os IPPs representam a quantidade de informação sobre a ionosfera disponível na região considerada. Para a normalização dos valores de STEC, normalmente se utiliza uma função de mapeamento e calcula-se o TEC na direção vertical (VTEC).

Observações resultantes da combinação linear conhecida como livre da geometria, de uma rede de estações GNSS de no mínimo dupla frequência são utilizadas no processo de estimação do VTEC. É importante destacar que a tendência interfrequência não é eliminada com a referida combinação linear e deve ser estimada (KOMJATHY, 1997; SCHAER, 1999,

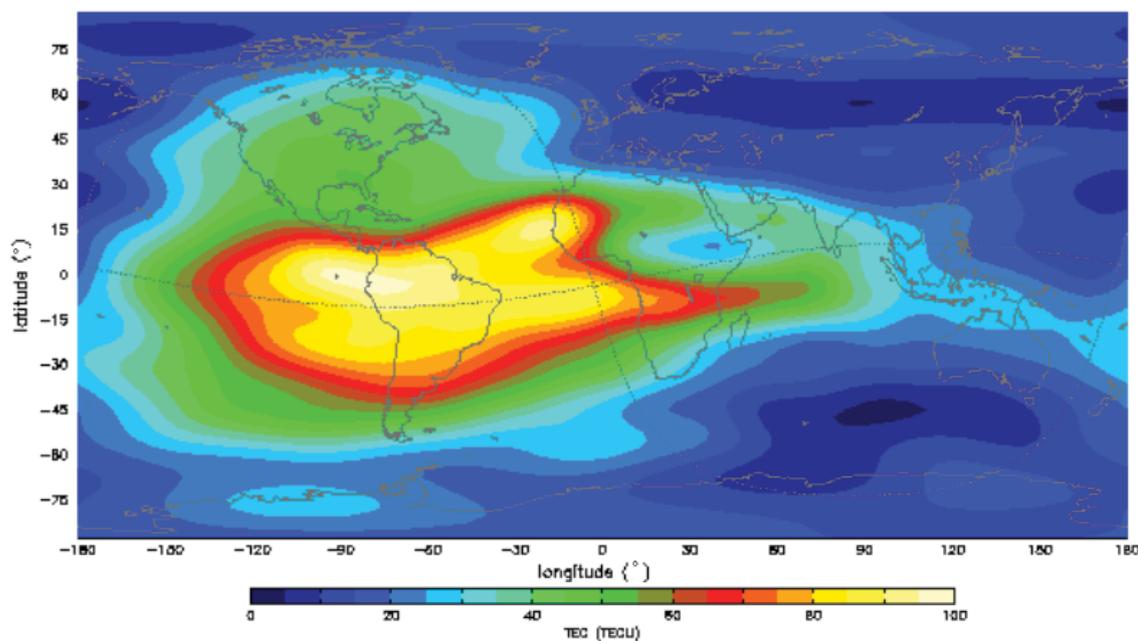


Fig. 1 – Mapa Global da Ionosfera produzido pelo International GNSS Service (IGS) às 15 h (horário de Brasília) do dia 07/11/2014 (Fonte: adaptado de IGS, 2016).

CAMARGO, MONICO & FERREIRA, 2000; AGUIAR e CAMARGO, 2006).

A RBMC (Rede de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) é uma rede de estações GNSS implantada com objetivo de fornecer acesso ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) para os cidadãos. Porém, ela também consiste em uma infra-estrutura importante no monitoramento do TEC, subsidiando diversos projetos de pesquisa e serviços nacionais e internacionais (CAMARGO, 1999; FONSECA JR, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; BRUNINI *et al.*, 2008; Dal POZ & CAMARGO, 2008; HERNÁNDEZ-PAJARES *et al.*, 2009; MUELLA *et al.*, 2011; AGUIAR & CAMARGO, 2012; MATSUOKA *et al.*, 2013; TAKAHASHI *et al.*, 2014, AGUIAR & KOZELINSKI, 2015).

Devido à localização do Brasil e a modelagem do TEC com dados GNSS ser realizada com base nos IPPs, um acompanhamento da quantidade, da distribuição espacial e da cobertura temporal de tais pontos produzidos pela RBMC se torna importante. Neste sentido, uma análise acerca da evolução na capacidade de monitoramento do TEC a partir de dados da RBMC de 1996 a 2012 foi apresentada em Machado e Aguiar (2013). No final de dezembro de 2012 a RBMC possuía 88 estações, havendo um crescimento de mais 24 estações até 31 de dezembro 2014, o que representou um aumento de aproximadamente

27% na quantidade de estações.

Destaca-se que o aumento do número de estações acarreta no aumento da quantidade e disponibilidade dos IPPs e isso proporciona uma melhoria aos modelos ionosféricos e, até mesmo, permite o desenvolvimento de novos modelos, cuja limitação estaria na baixa disponibilidade de IPP. Além disso, tal aumento tem impacto positivo sobre o nível de confiança dos modelos ionosféricos.

Este artigo visa mostrar o impacto da densificação da RBMC entre 2012 e 2014 sobre a quantidade, distribuição espacial e cobertura temporal de IPP considerando as constelações GPS e GLONASS. Ressalta-se que esta análise pode subsidiar pesquisas sobre modelagem da ionosfera no Brasil, uma vez que evidencia as regiões onde há deficiência na disponibilidade de IPP, podendo, portanto, ser utilizada como instrumento para o planejamento de instalação de novas estações.

2. PONTO IONOSFÉRICO

Como exposto anteriormente, uma solução muito utilizada para determinação do TEC a partir de observações de uma rede GNSS considera que esta quantidade esteja totalmente concentrada em uma camada esférica de espessura infinitesimal e de altitude pré-definida. O TEC é calculado na intersecção desta camada com o vetor

receptor-satélite, denominado de IPP. Portanto, as coordenadas do IPP são calculadas em função da posição do satélite, da posição do receptor e da altitude da camada ionosférica. A Figura 2 ilustra os elementos envolvidos na formação de um ponto ionosférico.

A definição da posição do IPP requer a utilização de um sistema de coordenadas. Neste sentido, é possível adotar um sistema de coordenadas vinculado ao campo magnético da Terra (DAVIES, 1990; von BIEL, 1990; HAPGOOD, 1992), um sistema solar-geomagnético (ICD-GPS-200C, 2003 p. 127) ou um sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude) (SKONE, 1998). Neste último caso as coordenadas do IPP são calculadas por (SKONE, 1998).

$$\varphi_{IPP} = \arcsen(\sen\varphi_r \cos\psi + \cos\varphi_r \sen\psi \cos Az) \quad (1)$$

$$\lambda_{IPP} = \lambda_r + \arcsen\left(\frac{\sen\psi \sen Az}{\cos\varphi_{IPP}}\right) \quad (2)$$

onde: φ_r e λ_r representam a latitude e longitude geodésica da estação e Az é o azimute do satélite.

O termo ψ , presente nas equações 1 e 2, é calculado por:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - ele - \arcsen\left(\frac{Rm}{Rm + H_{IPP}} \cos(ele)\right) \quad (3)$$

com ele sendo o ângulo de elevação do satélite.

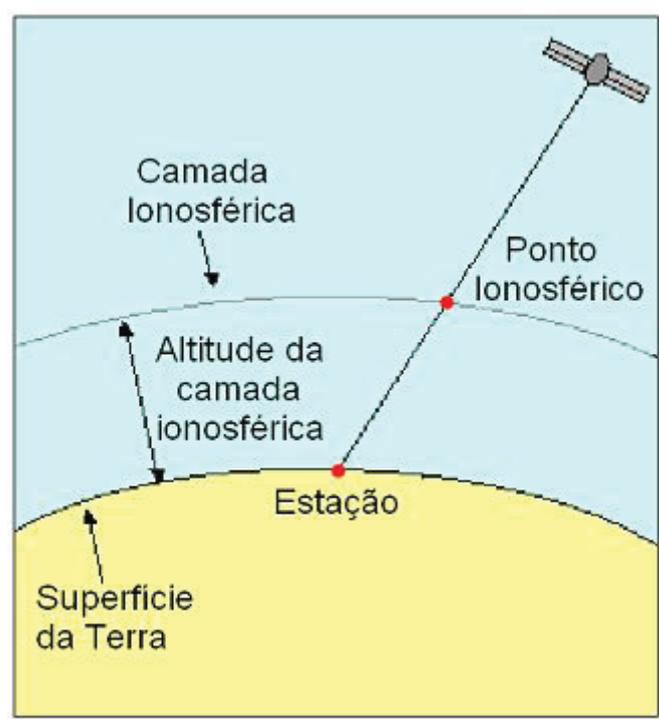


Fig. 2 - Ponto Ionosférico.

Considerando que a posição dos satélites é calculada a partir das efemérides e que a altitude da camada ionosférica tenha sido devidamente definida, verifica-se que a simulação da posição do IPP depende exclusivamente da posição da estação.

2.1 Programa de simulação

Como mencionado, é importante se ter um parâmetro referente ao impacto da distribuição da rede de estações GNSS sobre os resultados

obtidos com a modelagem da ionosfera a partir de dados GNSS. Para a execução deste tipo de análise foi desenvolvido um aplicativo denominado GS (*Grid Simulator – Simulador de Grade*) por Aguiar (2010).

Para o desenvolvimento do GS partiu-se do pressuposto que se conhecem as coordenadas das estações de referência, bem como as coordenadas dos satélites GNSS, obtidas das efemérides precisas do IGS.

Tendo em vista que os satélites possuem

órbitas com planos fixos, logo, a trajetória diária do satélite terá variações insignificantes para a análise a ser realizada. Assim, a partir das posições dos receptores e dos satélites é possível fazer uma predição diária das posições dos pontos ionosféricos na grade ionosférica.

O GS é um aplicativo desenvolvido em linguagem Fortran 95. Este aplicativo é composto por 6 classes de objetos, responsáveis por processos como:

- leitura de arquivos de efemérides precisas e leitura das coordenadas das estações de referência;
- cálculo das posições dos satélites em intervalos de tempo pré definidos;
- cálculo das coordenadas (latitude e longitude) dos pontos ionosféricos;
- conversão do sistema de coordenadas da grade para um sistema de células (pixel) georreferenciadas;
- varredura da incidência de pontos ionosféricos preditos sobre cada célula e contagem da densidade de pontos sobre a mesma; e
- análise estatística.

Juntamente com o GS são utilizados dois aplicativos de distribuição gratuita, o GMT (Generic Map Tools), disponível em <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, e o Image Magick, disponível em <http://www.imagemagick.org/>. O GMT é um pacote de software que permite gerar mapas, no formato Postscript com alta qualidade, e em diversas projeções. O ImageMagick é uma suíte de aplicativos utilizada para criar, editar ou compor imagens. Assim, o GS também é composto por bibliotecas do GMT e do ImageMagick.

Neste trabalho, o aplicativo GS é responsável pela análise da distribuição das estações da RBMC sobre a quantidade e cobertura temporal de IPPs no Brasil. Em seguida é gerada a base cartográfica digital contendo as informações de densidade da grade utilizando bibliotecas do GMT. Finalmente é utilizada uma biblioteca do ImageMagick, que permite a conversão do formato Postscript para outros formatos, como por exemplo o GIF, e assim é possível gerar a visualização dos dados em um formato comumente utilizado.

É importante destacar que além de permitir avaliar a capacidade de monitoramento do TEC

de uma rede ativa, este aplicativo possibilita orientar o planejamento da implantação de novas estações de forma a potencializar o monitoramento de tal grandeza.

3. ESTAÇÕES DA RBMC

Com mais de 18 anos em operação, a RBMC representa a estrutura geodésica mais utilizada por topógrafos e engenheiros em seus trabalhos de georreferenciamento, infraestrutura e mapeamento. Além disso, seus dados fomentam diversas pesquisas em Geodésia, Geofísica, Geodinâmica e Ciências Atmosféricas, beneficiando a sociedade de modo geral.

No início de sua operação, em dezembro de 1996, a RBMC era composta por apenas 4 estações e não havia nenhuma estação localizada na região norte do Brasil. Em um esforço contínuo, o número de estações vem aumentando, atingindo 112 estações em dezembro 2014. Com esta nova realidade há estações em todas as regiões do país. No período de 2012 a 2014 foram implantadas 24 novas estações, sendo 6 na região sul, 6 na região sudeste, 3 na região centro-oeste e 9 na região nordeste. Informações sobre a densidade de estações da RBMC podem ser extraídas de IBGE (2011a, 2011b, 2011c, 2016a). A localização das estações implantadas até o final de 2014 pode ser vista na Figura 3. Também há a possibilidade de se obter as observações da maioria das estações em tempo real, através do serviço RBMC-IP, o qual utiliza o NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) (IBGE, 2016b).

A implantação e manutenção da RBMC contam com apoio de diversos parceiros, na sua maioria instituições de ensino públicas. Porém, o parceiro com maior destaque é o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), cujo convênio proporcionou a união entre a RBMC e a RIBaC (Rede INCRA de Bases Comunitárias), resultando em um aumento expressivo da quantidade de estações e na modernização dos receptores, marcando o início do monitoramento dos satélites GLONASS. Outro parceiro que vem contribuindo de forma relevante com a RBMC é o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cuja cooperação está possibilitando

a modernização do receptor e a implantação de estações meteorológicas em algumas estações. Neste sentido a RBMC passou a disponibilizar dados de pressão, temperatura

e umidade relativa do ar das referidas estações a partir de 2014. Os dados meteorológicos são disponibilizados em formato RINEX, juntamente com as observações e efemérides.



Fig. 3 - Localização das estações da RBMC. Fonte: adaptado de IBGE (2016a).

4. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE MONITORAMENTO DO TEC

O impacto da densificação da RBMC entre 2012 e 2014 sobre a capacidade de monitoramento do TEC foi avaliado a partir da análise da quantidade, distribuição espacial e cobertura temporal dos IPPs produzidos por suas estações em 31 de dezembro de 2012 e 31 de dezembro de 2014.

Na avaliação, utilizou-se o aplicativo GS (seção 2.1), onde a posição dos satélites foi calculada a partir das efemérides precisas obtidas do Serviço Internacional do GNSS (IGS), sendo considerados os satélites GPS e GLONASS. É importante salientar que em ambos os dias a constelação GPS possuía 32 satélites e a GLONASS 24 satélites, resultando em uma constelação de 56 satélites. Portanto, a diferença da quantidade de IPPs produzida nos dois dias é função exclusivamente do número de estações da RBMC.

A quantidade, a distribuição espacial e a cobertura temporal dos IPPs foram calculadas por um período de 24 h a uma taxa de 15 s e com máscara de elevação de 15°. Nas análises foram adotadas grades de IPPs com resolução espacial (pixel) de 1° x 1° e 2,5° x 2,5°. A quantidade de IPP foi avaliada pela comparação do número de IPPs formados na região, bem como da quantidade média e máxima de IPP em 2012 e 2014. A cobertura temporal considerou a porcentagem de tempo em que havia no mínimo 1 IPP dentro da região interna de cada célula da grade.

5. RESULTADOS

Esta seção apresenta a quantidade, a distribuição espacial e a cobertura temporal dos IPPs produzidos pelas estações da RBMC e as constelações GPS e GLONASS durante os dois dias considerados.

5.1 Quantidade de pontos ionosféricos

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos pixels que contêm IPPs produzidos pelas estações da RBMC nos 2 dias selecionados e também mostra a quantidade de tal grandeza em cada pixel, considerando grades de $1^\circ \times 1^\circ$ e $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

É possível observar que as estações da RBMC produzem IPPs em todos os países da América do Sul, sendo uma cobertura parcial sobre o Chile, a Argentina, a Colômbia e a Venezuela e total nos demais países. Verifica-se, também, que são formados pontos ionosféricos no mar a até aproximadamente 1200 km além da costa. Destaca-se que o Estado de São Paulo apresenta maior densidade de IPPs, em ambos os períodos, devido à cooperação da Unesp. Por

outro lado, a parte noroeste da região amazônica possui a menor densidade.

Em 2012, aproximadamente 6.600.000 IPPs eram produzidos diariamente com intervalo de 15 s. Este número aumentou para pouco mais de 8.300.000 em 2014, representando um aumento de cerca de 26%. Destaca-se a contribuição das novas estações para o aumento na quantidade de IPPs em todas as regiões do país, sobretudo nas regiões sul, sudeste e nordeste.

A Tabela 1 mostra a quantidade de IPP média e máxima por pixel nas quatro grades analisadas considerando todo o período. Observa-se que a quantidade média de IPP aumentou cerca de 24% de 2012 a 2014, enquanto que a quantidade máxima de IPP foi elevada em aproximadamente 34%.

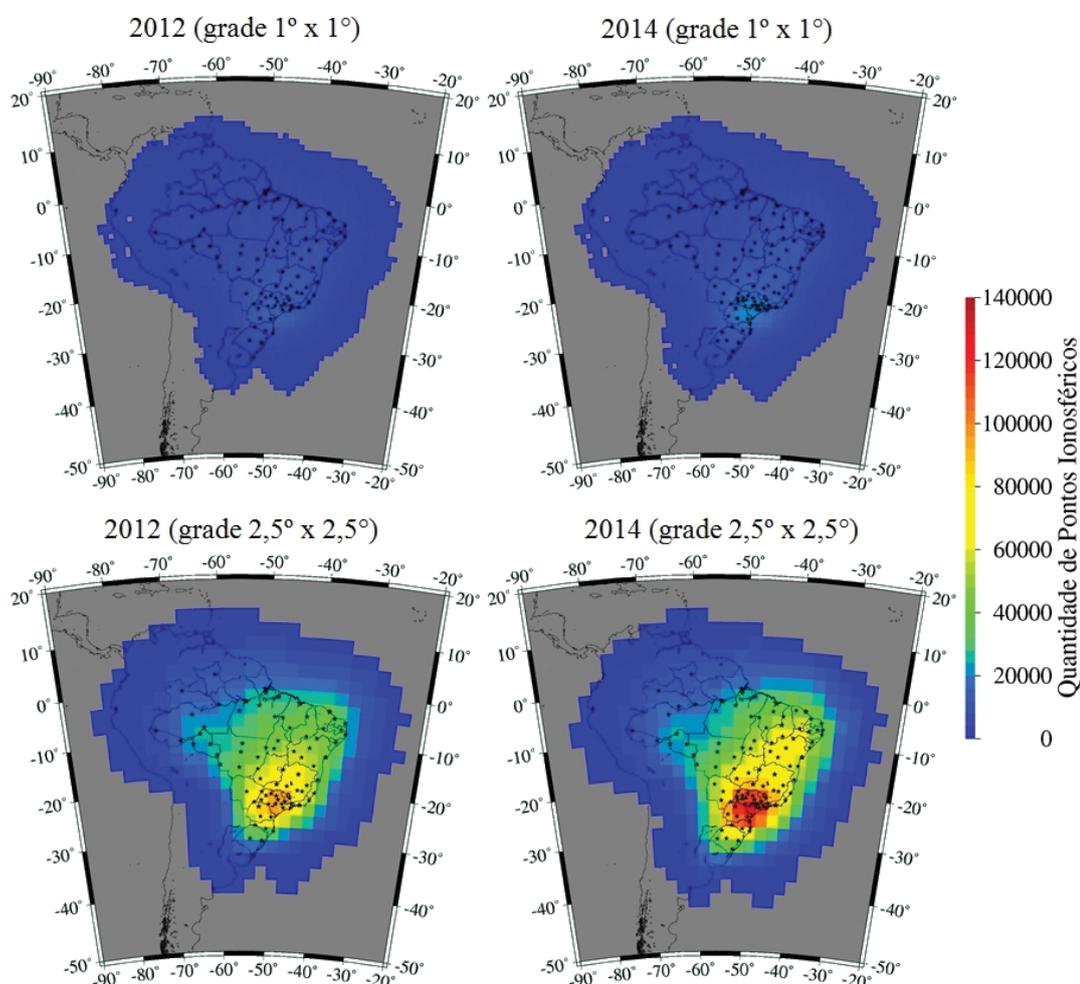


Fig. 4 - Quantidade de IPPs.

5.2 Cobertura temporal dos pontos ionosféricos

Como na modelagem do TEC se deseja produzir informação continuamente, a cobertura temporal dos IPPs se torna outra grandeza de

grande interesse, haja vista estar relacionada com a resolução espacial da referida modelagem.

A Figura 5 mostra a cobertura temporal dos IPPs produzida pelas estações da RBMC nos dois

Tabela 1: quantidade de IPP máxima e média por pixel

Grade	Ano	Máxima	Média
1° x 1°	2012	16,25	2,98
	2014	21,79	3,69
2,5° x 2,5°	2012	94,06	16,95
	2014	128,51	21,04

dias com grades de 1° x 1° e 2,5° x 2,5°, sendo possível constatar que a cobertura temporal das grades com resolução de 1° x 1° é insuficiente para se representar o TEC de forma consistente, principalmente na região norte. Também é

possível observar que poucas regiões do Rio Grande do Sul apresentavam cobertura temporal acima de 60% em 2012, enquanto que em 2014 a maior parte deste estado apresentou cobertura temporal acima de 70%. Efeito parecido pode ser observado na maioria dos estados da região nordeste. Considerando a grade de 2,5°x 2,5°, verifica-se que as quadrículas formadas sobre quase toda a área do Brasil possui pelo menos 1 IPP durante mais de 80% do tempo, sendo possível verificar um aumento na área com cobertura temporal acima de 80% no extremo sul do país.

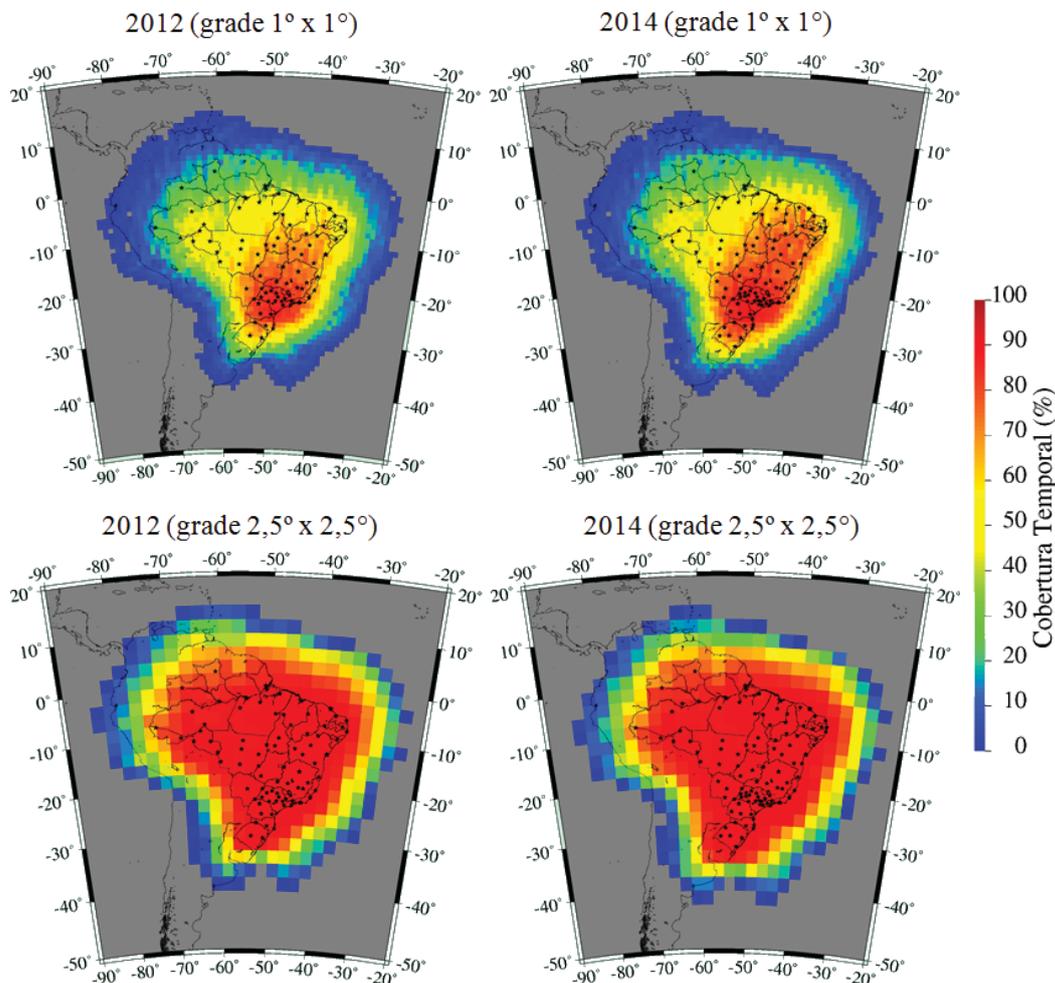


Fig. 5 - Cobertura temporal dos IPPs.

A Tabela 2 mostra as porcentagens máximas e médias da cobertura temporal das grades avaliadas.

Observa-se que em nenhum dos casos houve cobertura temporal acima de 89%. O impacto da densificação na porcentagem média da grade com resolução de 1° foi uma elevação de cerca de 10%, enquanto que na grade com

Tabela 2: porcentagens máximas e médias da cobertura temporal

Grade	Ano	Máxima (%)	Média (%)
1° x 1°	2012	87	30
	2014	87	33
2,5° x 2,5°	2012	89	56
	2014	89	57

resolução de 2,5° esta porcentagem aumentou em 2%, mostrando que a densificação da rede tem importante impacto na disponibilidade quando se deseja utilizar o modelo ionosférico com resolução maior.

O aumento da cobertura temporal é de suma importância para atender a necessidade dos modelos ionosféricos desenvolvidos, principalmente, para processamento e aplicações em tempo real.

6. CONCLUSÕES

A RBMC é uma fonte de informação contínua sobre o TEC, sendo uma infra-estrutura importante para o monitoramento desta grandeza sobre o Brasil. Neste artigo, o impacto da densificação das estações da RBMC entre 2012 e 2014 sobre sua capacidade de monitoramento do TEC foi avaliado.

Observou-se que a quantidade de IPPs produzida diariamente pelas estações da RBMC aumentou de aproximadamente 26% entre 31 de dezembro de 2012 e 31 de dezembro de 2014, passando de 6.600.000 para 8.300.000. Portanto, neste caso, a porcentagem do aumento da quantidade de IPP foi similar à do aumento do número de estações, que foi em torno de 27%. Além disso, verificou-se que tais estações produzem IPPs em uma vasta área, cobrindo completamente quase todos os países da América do Sul e uma vasta região no oceano.

A análise acerca da cobertura temporal revelou que estas estações da RBMC não produzem IPPs 100% do tempo em grades com resolução de 1° e 2,5°, sugerindo a necessidade de se avançar com mais densificações na rede, principalmente na região norte, para um monitoramento mais eficaz do TEC.

Além de proporcionar uma melhoria nos modelos de ionosfera existentes, o aumento na quantidade e na disponibilidade de IPP pode permitir o desenvolvimento de novos modelos, cuja limitação estaria na baixa disponibilidade de IPP, bem como ter impacto positivo sobre o nível de confiança dos modelos. Além disto, o aumento da cobertura temporal dos IPPs tem importante impacto no desenvolvimento de modelos ionosféricos com processamento em tempo real.

É importante destacar que, ao mesmo tempo em que a RBMC possibilita a sondagem

da ionosfera, ela permite a produção de insumos que podem ser utilizados para melhorar a qualidade do posicionamento com GNSS em território brasileiro e do acesso do cidadão ao SGB. Neste sentido, os resultados apresentados neste artigo mostram que as regiões norte, nordeste e extremo sul do Brasil apresentam uma deficiência na quantidade e cobertura temporal de IPP e, portanto, carecem de mais estações.

É importante destacar que as estações da rede SIRGAS-CON produzem IPPs que podem ser utilizados na modelagem da ionosfera para o Brasil, sendo uma proposta futura realizar uma avaliação da inclusão das estações desta rede. Além disso, pretende-se realizar uma análise sobre a disponibilidade do GIVE (*Grid Ionosphere Vertical Error*) em função da quantidade e cobertura temporal de IPP

Por fim, salienta-se que a disponibilidade de IPP sobre o Brasil deve aumentar em, aproximadamente, 100% quando os sistemas Galileo e Beidou estiverem totalmente operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

AGUIAR, C. R. & CAMARGO, P. O. Modelagem em Tempo Real do Erro Sistemático das Observáveis GPS Devido à Ionosfera. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 1, p. 101-120, 2006.

AGUIAR, C. R. & CAMARGO, P. O. Resolução Espacial da grade ionosférica e do GIVE. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 18, n. 3, p.464-479, 2012.

AGUIAR, C. R. & KOZELINSKI, A. Mapas de TEC IONEX em tempo real gerados pelo modelo GIB (Grade Ionosférica Brasileira). **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 7, n. 8, p. 1569-1585, 2015.

BRUNINI, C.; MEZA, A.; GENDE, M. & AZPILICUETA, F. South American regional ionospheric maps computed by GESA: a pilot service in the framework of SIRGAS. **Advances**

- in *Space Research*, v. 48, n. 4, p.737-744, 2008.
- CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191 p. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G. & FERREIRA, L. D. D. . Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth, Planets and Space*, v. 52, n. 11, p. 1083-1089, 2000.
- DAL POZ, W. R & CAMARGO, P. O. Influência da Variação Espacial do TEC na Definição do Comprimento de Linha de Base: Abordagem Teórica E Prática. *Revista Brasileira de Cartografia*. v. 60, n. 4, p. 363-374, 2008.
- DAVIES, K. **Ionospheric radio**. London: IEE (Institute of Electrical Engineer), 1990. 580 p. (Eletromagnetic Waves Series v. 31).
- FONSECA JR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 176 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- HAPGOOD, M. A. Space physics coordinate transformations: a user guide. *Planet. Planetary and Space Science.*, v. 40, n. 5, p. 711-717, May, 1992.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORUS, R.; GARCIO-RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAER, S. C. & KRANKOWISKI, A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, v. 83, n. 3-4, p. 263-275, Mar., 2009.
- IBGE. **Análise dos Dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 1996 a 2000**. Relatório Técnico, 2011a. 81 p.
- IBGE. **Análise dos Dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 2001 a 2005**. Relatório Técnico, 2011b. 116 p.
- IBGE. **Análise dos Dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 2006 a 2010**. Relatório Técnico, 2011c. 363 p.
- IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC: Estações estabelecidas**. 2016a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc_est.php>. Acesso em: 17 maio 2016.
- IBGE. **RBMC-IP – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real**. 2016b Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ntrip/>>. Acesso em: 17 maio 2016.
- ICD-GPS-200C. **NAVSTAR GPS space segment/ Navigation user interfaces**, 2003. p. 164.
- IGS. **Final IGS Global Ionosphere Maps (GIM)**. 2016. Disponível em: <http://igsion.uwm.edu.pl/igsionoprod/TEC_final_maps/>. Acesso em: 17 maio 2016.
- JAKOWSKI, N.; BÉNIGUEL, Y.; DE FRANCESCHI, G.; HERNANDEZ PAJARES, M.; JACOBSEN, K. S.; STANISLAWSKA, I.; TOMASIK, L.; WARNANT, R. & WAUTELET, G. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques *Journal of Space Weather and Space Climate*. v. 2, n. A22, p. 1-14, 2012.
- KOMJATHY, A. **Global ionospheric Total Electron Content mapping using Global Positioning System**. 1997. 248 p. Tese (Doutorado) – Department of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick, Fredericton, 1997.
- MACHADO, W. C. & AGUIAR, C. R. Evolução na capacidade de monitoramento do conteúdo total de elétrons a partir de dados GNSS da RBMC. **Mundogeoconnect Latin America 2013**. Workshop RBMC, 2013. Disponível em: <<http://mundogeoconnect.com/2013/grade/encontros-paralelos/evolucao-na-capacidade-de-monitoramento-da-ionosfera-a-partir-de-dados-gnss-da-rbmc/>> Acesso em: 17 maio 2016.
- MATSUOKA, M. T. & CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.56, n.1, p.14-27, 2004.
- MATSUOKA, M T ; COLLISCHONN. C; KLEIN, I.

- ; CAMARGO, P. O. & PEREIRA, V. A. S. . Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, p. 14-33, 2013.
- MUELLA, M. T. A. H.; PAULA, E. R.; MITCHELL, C. N.; KINTNER, P. M.; PAES, R. R.; BATISTA, I. S. Tomographic imaging of the equatorial and low latitude ionosphere over central-eastern Brazil. **Earth Planets Space**. v. 63, n. 2, p. 129-138, 2011.
- PETIT, G. & LUZUM, B. IERS Conventions (2010): IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
- SCHAER, S. **Mapping and predicting Earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999, 205 p. Tese (Doutorado) – Naturwissenschaftlichen Fakultät. Universität Bern, Berna, 1999.
- SKONE, S. **Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region**. 1998. 198 p. Tese (Doutorado) - Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 1998.
- TAKAHASHI, H.; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J.F.G.; PAULA, E.; NOGUEIRA, P.; DENARDINI, C.M.; BECKER-GUEDES, F.; WRASSE, C.M.; IVO, A.S.; GOMES, V.C.F.; GARGARELA JR., W.; SANT'ANNA, N. & GATTO, R. Diagnostics of equatorial and low latitude ionosphere by TEC mapping over Brazil. **Advances in Space Research**, v. 53, p. 385-394, 2014.
- VON BIEL, H. A. The geomagnetic time and position of a terrestrial station. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 52, n. 9, p. 687 - 694, Sept., 1990.