

Identificação das irregularidades ionosféricas para os ciclos solares 23 e 24

Identification of ionospheric irregularities for solar cycles 23 and 24

RESUMO

Pablo Henrique Finken
pablohenrique_2000@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

Vinicius Amadeu Stuani Pereira
vpereira@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

A ionosfera é uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento pelo GNSS (*Global Positioning Satellite System*) e, nos últimos anos, os efeitos da camada ionosférica têm despertado grande interesse nacional e principalmente internacional, no que diz respeito ao uso do GBAS (*Ground-Based Augmentation System*). Para investigar a usabilidade deste sistema no território brasileiro é necessário, primeiramente, um estudo acerca das irregularidades ionosféricas durante os ciclos solares 23 e 24. Assim, o trabalho tem por objetivo identificar as irregularidades no Brasil em termos de horários de ocorrência, áreas de abrangência e níveis de intensidade durante os ciclos 23 e 24, bem como, realizar o monitoramento em tempo real das condições ionosféricas. A partir da estimativa do índice ROTI, utilizando dados das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), pode-se verificar que em determinados períodos há uma maior intensidade de irregularidades, principalmente durante o ápice do ciclo solar 24, e em outros períodos uma menor intensidade. Tal identificação ocorre devido a variação sazonal, a localização geográfica e o ciclo solar (11 anos).

PALAVRAS-CHAVE: Índice ROTI. Estações RBMC. Camada ionosférica.

ABSTRACT

The ionosphere is one of the biggest sources of systematic errors in the GNSS (Global Positioning Satellite System) positioning and, in recent years, the effects of the ionospheric layer have aroused great national and mainly international interest, with regard to the use of GBAS (Ground-Based Augmentation System). To investigate the usability of this system in the Brazilian territory, it is necessary, first, a study about ionospheric irregularities during solar cycles 23 and 24. Thus, the work aims to identify irregularities in Brazil in terms of times of occurrence, areas of coverage and intensity levels during cycles 23 and 24, as well as to carry out real-time monitoring of ionospheric conditions. From the estimate of the ROTI index, using data from RBMC stations (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems), it can be verified that in certain periods there is a greater intensity of irregularities, especially during the peak of the solar cycle 24, and in other periods a lower intensity. Such identification occurs due to seasonal variation, geographical location and the solar cycle (11 years).

KEYWORDS: ROTI index. RBMC stations. Ionospheric layer.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais avançadas quando se trata de posicionamento. As principais constelações de satélites do GNSS é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelos Estados Unidos, o russo GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o europeu Galileo e o chinês BeiDou/Compass (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Um dos fatores limitantes do GNSS é a camada ionosférica, compreendida entre 50 e 1000 km de altura, considerada a maior fonte de erro sistemático no posicionamento. Com os experimentos já realizados (SHAN et al., 2002; CHU et al., 2008; OLADIPO; SCHULER, 2013; PEREIRA; CAMARGO, 2013; PEREIRA et al., 2017) verifica-se que é possível, a partir de dados GNSS de redes ativas, realizar estudos do comportamento da camada. Com esses dados pode-se calcular o TEC (*Total Electron Content*), o ROT (*Rate of Change of TEC*) e índices de irregularidades da ionosfera, como o ROTI (WANNINGER, 1993), além disso, gerar mapas que permitem observar o comportamento espacial e temporal.

O Brasil dispõe de dados GNSS para a realização do monitoramento em tempo real e pós-processado das irregularidades, uma vez que o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC).

Considerando a importância do monitoramento das irregularidades, a pesquisa visa identificar tais irregularidades no Brasil durante os ciclos solares 23 (2000 a 2009) e 24 (2010 a 2019), contribuindo para a investigação do uso do GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) no território brasileiro.

OBSERVÁVEIS GNSS E REDES ATIVAS

As observáveis básicas do GNSS são a pseudodistância e a fase da portadora. De acordo com Monico (2008), a medida da pseudodistância (PD_r^s) é obtida por:

$$PD_r^s(t) = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s + v_{PD_r^s} \quad (1)$$

sendo: ρ_r^s – distância geométrica entre o satélite (^s) e o receptor (r); c – velocidade da luz no vácuo; dt_r – erro do relógio do receptor; dt^s – erro do relógio do satélite; I_r^s – erro devido à ionosfera; T_r^s – erro devido à troposfera; dm_r^s – erro devido ao multicaminho; Orb^s – erro da posição do satélite; $v_{PD_r^s}$ – erro da pseudodistância devido aos efeitos sistemáticos não e aleatórios.

Uma observável mais precisa é a fase da portadora (Φ_r^s) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Diferentemente da pseudodistância, apenas uma medida fracionária é obtida, restando como incógnita um número inteiro de ciclos desconhecido denominado de ambiguidade (N_r^s). O modelo funcional, em ciclos, é dado por (SEEBER, 2003; MONICO, 2008):

$$\Phi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\Phi^s(t_0) - \Phi_r(t_0)) + N_r^s + v_{\Phi_r^s} \quad (2)$$

sendo: f – frequência nominal da onda portadora; $\phi^s(t_0)$ – fase inicial no satélite; $\phi_r(t_0)$ – fase inicial no receptor; v_{ϕ^s} – erro da fase da portadora devido aos efeitos sistemáticos não modelados e aleatórios.

As observáveis GNSS são registradas por receptores das redes ativas, que consistem em um conjunto de receptores, instalados em pontos com coordenadas conhecidas, que operam continuamente ou por um determinado período de tempo, sendo gerenciada por um centro operacional responsável por manter o sistema e divulgar os dados (MONICO, 2008). No Brasil destacam-se as seguintes redes ativas públicas e particulares: RBMC, GNSS-SP, INCT GNSS-NavAer, LISN (*Low-latitude Ionosphere Sensor Network*), SCNet (Rede de Estações Ativa da Santiago & Cintra) e CEGAT (Centro Geodésico Alezi Teodolini).

Dentre estas, as principais redes ativas públicas são a RBMC e INCT GNSS-NavAer, cujos dados são utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. A RBMC conta com 152 estações espalhadas pelo território brasileiro. Cento e vinte e quatro dessas estações também transmitem dados em tempo real, formando a RBMC-IP (IBGE, 2020).

IONOSFERA

Conforme Amendola (2003), a ionosfera é a parte da atmosfera terrestre em que os elétrons livres são suficientemente numerosos para influenciar a propagação de ondas radioelétricas, na qual, a densidade de elétrons varia com a altura, formando regiões de maior concentração que definem as camadas D, E e F. Nesse sentido, a formação da ionosfera está relacionada, principalmente, com a radiação solar eletromagnética e com a radiação corpuscular incidente na atmosfera terrestre e, com menor importância, com a radiação cósmica (FEDRIZZI, 1999).

Sobre o comportamento da ionosfera vários fatores influenciam, como a localização geográfica, a estação do ano, o nível de atividade solar e geomagnética, bem como, as variações dia a dia.

TEC (TOTAL ELECTRON CONTENT) E SUAS VARIAÇÕES

O erro devido à ionosfera nas observáveis GNSS é diretamente proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal (MATSUOKA et al., 2009). O TEC pode ser obtido utilizando as medidas de fase ou de pseudodistância advindas das portadoras L1 e L2 (PD_{rL1}^s , PD_{rL2}^s), a partir da combinação linear apresentada pela equação (3) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \left[(PD_{rL2}^s - PD_{rL1}^s) - v_{PD} \right] \quad (3)$$

As variações temporais da densidade de elétrons na ionosfera podem ser classificadas em variações diárias, sazonais e ciclos solares (CAMARGO, 1999).

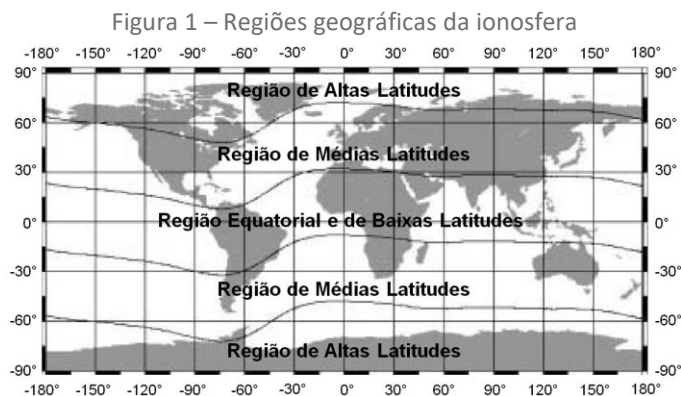
As variações diárias ocorrem devido à iluminação do Sol, ou seja, devido à radiação solar eletromagnética. No transcorrer do dia a densidade eletrônica

depende da hora local, atingindo um valor máximo entre 12h e 16h (WEBSTER, 1993).

Com relação às variações sazonais, a densidade de elétrons varia durante os meses do ano em uma determinada região (McNAMARA, 1991), sendo os menores valores de densidade de elétrons nos meses de solstício de inverno, e os maiores valores nos meses de março, abril, setembro e outubro e no solstício de verão (PEREIRA; CAMARGO, 2013).

Já as variações de ciclos de longos períodos correspondem a ciclos de, aproximadamente, 11 anos e estão relacionadas à ocorrência de manchas solares. Dessa maneira, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (McNAMARA, 1991). Atualmente o Sol encontra-se no início do ciclo 25.

Com relação às regiões geográficas ionosféricas, elas são conhecidas como: regiões de altas latitudes (mais ativa), regiões de médias latitudes (menos ativa) e região equatorial e de baixas latitudes (mais ativa) (FONSECA JUNIOR, 2002). A Figura 1 apresenta, aproximadamente, as regiões e suas respectivas amplitudes.



Fonte: Adaptado de Fonseca Junior (2002).

ÍNDICE ROTI DE IRREGULARIDADES DA IONOSFERA

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico, que surgem por meio de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T) que ocorrem na região equatorial e de baixas latitudes. Há vários índices que determinam o nível de irregularidades ionosféricas, com destaque para o ROTI (PI et al., 1997):

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (4)$$

sendo ROT a taxa de variação do TEC, obtida por:

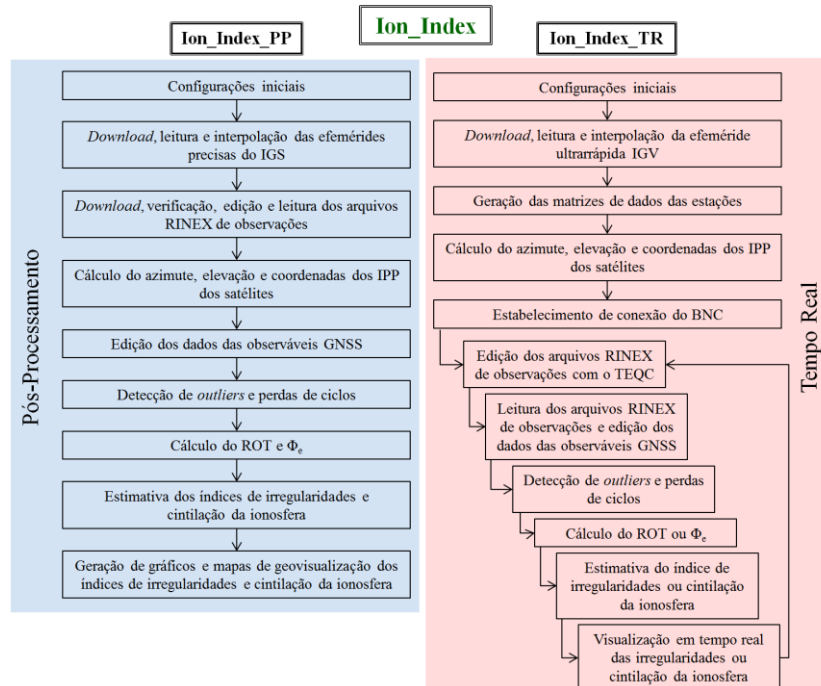
$$ROTI = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (5)$$

Para tal situação, Pereira e Camargo (2014) ressaltam um padrão classificatório para o ROTI, em que: $ROTI \leq 0,05$ para baixos níveis de irregularidades; $0,05 < ROTI \leq 0,2$ para a presença de irregularidades moderadas, e $ROTI > 0,2$ para a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas.

PROGRAMA ION_INDEX

No Brasil, usuários e pesquisadores que desejam estimar índices de irregularidades da ionosfera podem utilizar o programa científico Ion_Index (PEREIRA; CAMARGO, 2016), disponível em <<https://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/software/>>, cujo método é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do método do Ion_Index



Fonte: Pereira e Camargo (2016).

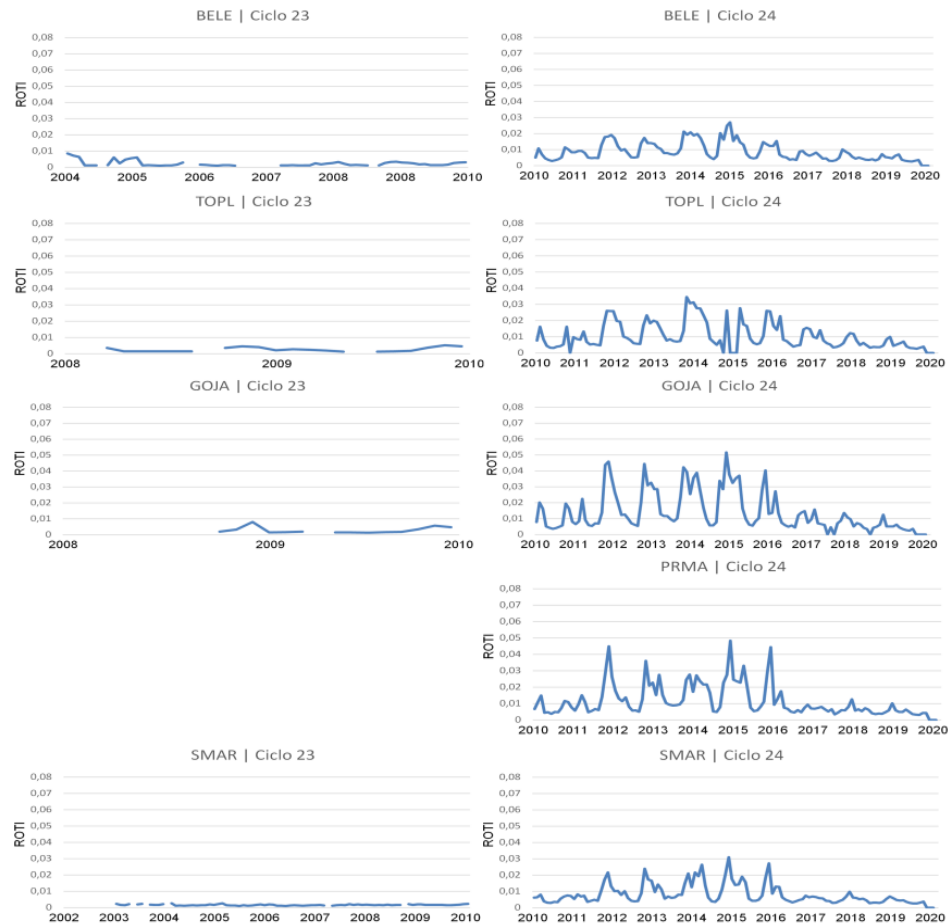
O Ion_Index utiliza a infraestrutura já existente de dados GNSS de redes ativas públicas, como a RBMC, a GNSS-SP e a INCT GNSS-NavAer. Mais informações sobre o programa e possíveis aplicações, consultar Pereira e Camargo (2016).

EXPERIMENTO, RESULTADOS E ANÁLISES

Os experimentos realizados tiveram como finalidade a identificação, delimitação e intensidade das irregularidades ionosféricas para os ciclos solares 23 e 24, a variação sazonal, a identificação do ápice e declínio dos ciclos e variação com a região geográfica.

As estações RBMC selecionadas para o monitoramento das irregularidades foram: BELE (-1,40;-48,46), GOJA (-17,88;-51,72), PRMA (-23,40;-51,93), SMAR (-29,71; -53,71), TOPL (-10,17;-48,33), sendo o Ion_Index o programa utilizado para a obtenção de tais dados, sendo selecionados todos os dias 21 de cada mês, de 2000 até 2019. Foi estimado o índice de irregularidades ROTI, considerando máscara de elevação de 35° e altura média da camada ionosférica de 350 km. A partir das estimativas com resolução temporal de 5 minutos foram determinadas as médias diárias, resultando nos gráficos da Figura 3.

Figura 3 – Médias diárias de ROTI das estações selecionadas referente aos ciclos 23 e 24



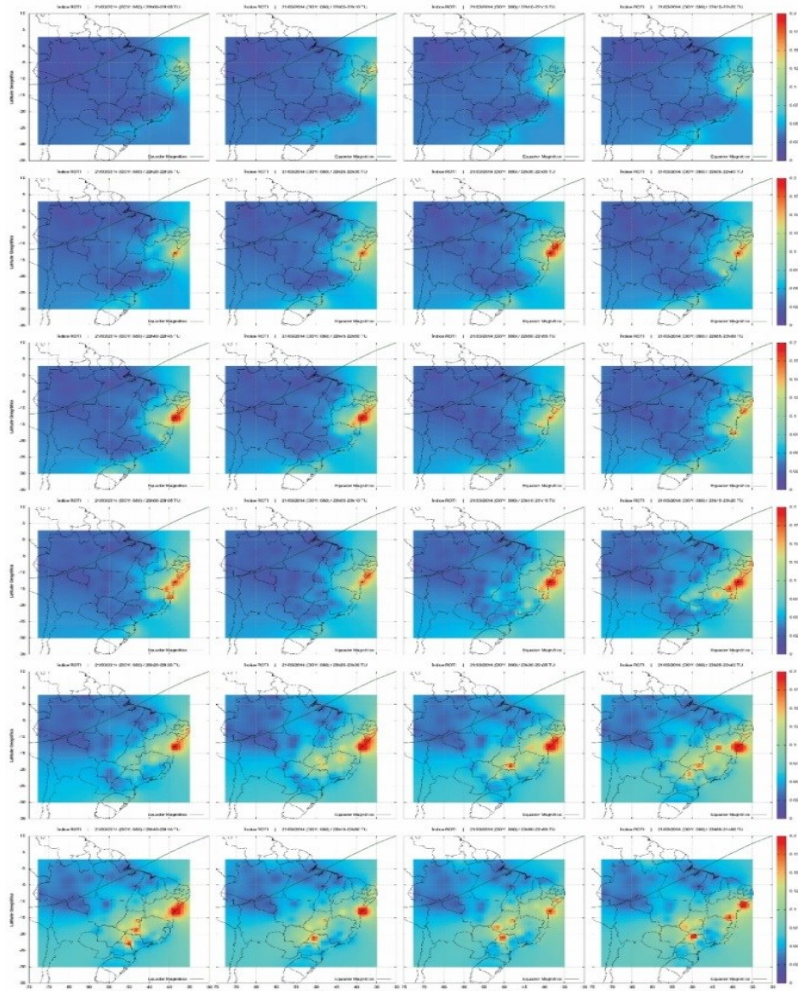
Fonte: Autoria própria (2020).

Comparando os ciclos solares 23 e 24 a partir da Figura 3, as maiores intensidades das irregularidades acontecem no ciclo 24 nos anos de 2012 até 2016, contendo os maiores valores nos anos de 2014 e 2015 (picos corresponde aos solstícios de verão), que foi o ápice do ciclo. Já a partir de 2015 ocorreu um declínio. Observa-se que os menores valores em cada ano ocorreram nos meses de junho, que corresponde ao solstício de inverno. Esta variabilidade no mesmo ano (maior intensidade das irregularidades no solstício de verão e nos equinócios e menor intensidade no solstício de inverno) caracteriza a variação sazonal.

Analisando a variação da região geográfica e, de acordo com a Figura 1, a estação GOJA tem uma alta variação, pois está localizada próxima à crista sul da Anomalia de Ionização Equatorial, já a TOPL e PRMA tem uma variação moderada, e as estações BELE (localizada próximo ao equador magnético) e SMAR (região de médias latitudes) apresentam uma baixa variação.

Com o objetivo de verificar os horários de ocorrência e a área de abrangência das irregularidades são apresentadas na Figura 4 os mapas de ROTI referente ao dia 21 de março de 2014, para o período das 22h às 24h TU (Tempo Universal). Salienta-se que foram utilizadas todas as estações da RBMC disponíveis no dia.

Figura 4 – Mapas de ROTI das 22-24h TU para o dia 21/03/2014



Fonte: Autoria própria (2020).

Analisando a Figura 4 nota-se que o início das gerações das irregularidades ocorre após o por do Sol, aproximadamente às 22h TU, e desloca-se de leste para oeste, ao sul do equador magnético, atingindo os estados das regiões Nordeste, Sudeste e Sul (relacionada com atividade da Anomalia de Ionização Equatorial).

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que em determinados períodos há uma maior intensidade de irregularidades ionosféricas, principalmente durante o ápice do ciclo solar 24, e em outros períodos uma menor intensidade. Tal identificação ocorre em decorrência da variação sazonal, da localização geográfica e do ciclo solar, o qual ocorre a cada 11 anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores do projeto agradecem à Fundação Araucária pela bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), à UTFPR campus Santa Helena pelo ambiente de trabalho, e ao IBGE e IGS pelo fornecimento dos arquivos RINEX e efemérides precisas.

REFERÊNCIAS

AMENDOLA, G. V. **Análise do comportamento da ionosfera a partir de medidas em HF**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003. 105p.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. 191p.

CHU, F. D.; LEE, C. C.; CHEN, W. S.; LIU, J. Y. A study of long-term climatology of ionospheric irregularities by using GPS phase fluctuations at the Brazilian longitudes. **Advances in Space Research**, v. 41, 2008. pp. 645-649

FEDRIZZI, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. 142p.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 176p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer- Verlag Wien, 2008. 516p.

IBGE. **Dados diários e situação operacional**, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/%20rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss%20-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

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, 2004. pp. 14-27

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, 2009. pp. 565-582

McNAMARA, L. F. **The ionosphere**: communications, surveillance, and direction finding. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2ª ed. São Paulo: Ed. da UNESP, 2008. 476p.

OLADIPO, O. A.; SCHÜLER, T. Equatorial ionospheric irregularities using GPS TEC derived index. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 92, 2013. pp. 78-82

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GNSS de redes ativas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 19, n. 3, 2013. pp. 374-390

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera: IROT e ROTI. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 5., 2014, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2014.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, 2016. pp. 282-302

PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Procedimento geral para o desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS e principais modelos existentes. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA E II JORNADAS LUSÓFONAS SOBRE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 4., 2017, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2017.

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 18, 1997. pp. 2283-2286

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2nd ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SHAN, S. J.; LIU, J. Y.; KUO, F. S.; LIU, C. C.; TSAI, H. F. GPS phase fluctuations observed along the American sector during low irregularity activity months of 1997-2000. **Earth Planets Space**, vol. 54, n. 2, 2002. pp. 141-152

WANNINGER, L. **Ionospheric monitoring using IGS data**. Proceedings of the 1993 IGS Workshop, Berne, 1993. pp. 351-360

WEBSTER, I. **A regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System.** Thesis MSc in Science, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, 1993