

## **ANÁLISE DO EFEITO IONOSFÉRICO NO POSICIONAMENTO NO PERÍODO DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR NO CICLO 24**

### *Analysis of the Ionospheric Effect on Positioning in the Period of High and Low Solar Activity in the Cycle 24*

**Samara Sunny dos Anjos Cereja**  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA  
Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura  
samarasunny98@gmail.com

**Júlio Anderson Araújo Pereira**  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA  
Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura  
ojulioaraujo@gmail.com

**Mayara Cobacho Ortega Caldeira**  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA  
Instituto Ciberespacial - ICIBE  
mayara.caldeira@ufra.edu.br

**Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira**  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA  
Instituto Ciberespacial - ICIBE  
carlos.caldeira@ufra.edu.br

#### **Resumo**

Tendo em vista que o erro associado à ionosfera afeta os sinais GNSS uma vez que depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC) presentes ao longo da trajetória do sinal, as diversas variações que ocorrem em algumas regiões da ionosfera afetam a densidade de elétrons na camada e prejudicam as frequências emitidas por satélites. Como a distribuição do TEC na camada não é homogênea, ocorrem variações de curto período conforme o movimento de subida e descida do plasma de acordo com o nível de radiação solar na camada. Tendo em vista as variações e perdas no sinal recebido por receptores GNSS devido a irregularidades ionosféricas, o presente trabalho objetiva analisar a variabilidade do TEC no posicionamento GNSS considerando a variabilidade sazonal e diária em período de alta e baixa atividade solar do ciclo 24 para as estações de referência CHPI (Latitude: -22°41'13,72659"; Longitude: -44°59'6,56989"), SALU (Latitude: -02°35'36,45410"; Longitude: -44°12'44,92406") e SMAR (Latitude: -29°43'8,12599"; -53°42'59,73531"), que se encontram em diferentes regiões brasileiras, para estudos relativos ao posicionamento por ponto preciso. Os resultados apresentados mostraram que o posicionamento GNSS pode ser bastante afetado por altos gradientes espaciais do TEC em regiões brasileiras conforme o decorrer do dia e a época do ano.

**Palavras-chave:** Posicionamento GNSS; Ionosfera; TEC.

#### **Abstract**

Considering that the error associated with the ionosphere affects the GNSS signals since it depends on the Total Electron Content (TEC) present along the signal path, the various variations that occur in some regions of the ionosphere affect the density of electrons in the layer and affect the frequencies emitted by satellites. As the TEC distribution in the layer is not homogeneous, there are short-term variations depending on the up and down plasma movement according to the level of solar radiation in the layer. In view of the variations and losses in the signal received by GNSS receivers due to ionospheric irregularities, the present work aims to analyze the TEC variability

in the GNSS positioning considering the seasonal and daily variability in the period of high and low solar activity of cycle 24 for the reference stations of CHPI (Latitude:  $-22^{\circ}41'13.72659''$ ; Longitude:  $-44^{\circ}59'6.56989''$ ), SALU (Latitude:  $-02^{\circ}35'36.45410''$ ; Longitude:  $-44^{\circ}12'44.92406''$ ) and SMAR (Latitude:  $-29^{\circ}43'8.12599''$ ; Longitude:  $-53^{\circ}42'59.73531''$ ), which are located in different Brazilian regions, for studies related to precise point positioning. The results presented showed that the GNSS positioning can be greatly affected by high spatial gradients of TEC in Brazilian regions throughout the day and the time of the year.

**Keywords:** GNSS Positioning; Ionosphere; TEC.

## 1. INTRODUÇÃO

A magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende diretamente do Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera (MATSUOKA, 2007) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência (MONICO, 2008). No entanto, o TEC e consequentemente o erro variam no tempo e espaço, e sofrem diversas influências, como, ciclo solar (aproximadamente 11 anos), época do ano, hora local, localização geográfica, atividade solar e campo geomagnético, entre outros (FEDRIZZI, 2003).

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em algumas regiões da ionosfera, que por sua vez desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons causados pela ausência da radiação solar. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da Hora Local (HL), sendo que seu valor máximo ocorre entre 15 e 19 UTC, com pico próximo às 14 HL (MATSUOKA, 2007; DAL POZ, 2010; RIBEIRO, 2016).

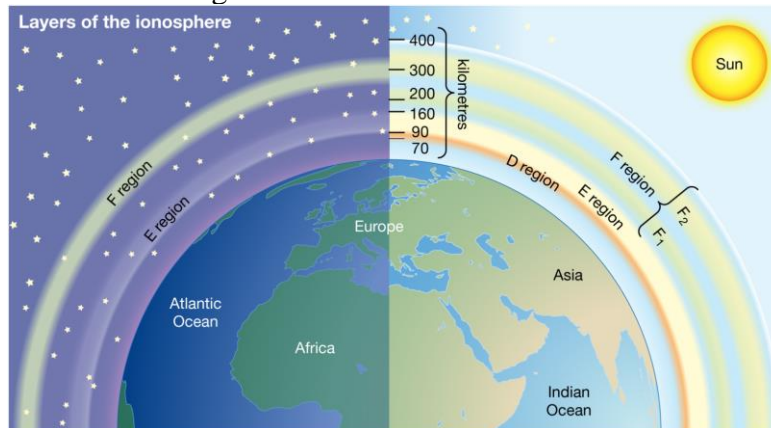
A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano devido a variação sazonal do ângulo zenital do Sol, bem como a intensidade do fluxo de ionização. No hemisfério sul, valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de equinócio, sendo eles, março, abril, setembro e outubro. Os valores mínimos ocorrem nos meses de solstícios de inverno e verão, porém com maior destaque os meses referentes ao inverno, como junho e julho (MONICO, 2008; MATSUOKA, 2007; MARQUES et al., 2014).

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. Segundo Rodrigues (2000), as manchas solares são regiões mais frias e escuras que aparecem na superfície do Sol, podendo aumentar e diminuir quantitativamente conforme o ciclo solar. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Com isso, o aumento do número de manchas solares intensifica a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (LANGLEY, 2011). Estes ciclos são definidos com relação ao número de manchas solares e, atualmente, se encontra o início do ciclo solar 25. Outro aspecto importante é que, durante a atividade solar máxima e para satélites próximos ao horizonte, o erro pode ser maior que 100m, devido à redução na velocidade de grupo das frequências emitidas pelos satélites GPS (MATSUOKA, 2007).

Vale ressaltar que a estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude geomagnética, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar. As camadas ionosféricas são divididas em regiões conforme a densidade de elétrons em função da altura e de suas intensidades de ionização, conforme pode ser visto na Figura 1. As regiões equatoriais delimitadas aproximadamente pelas latitudes  $20^{\circ}$  S e  $20^{\circ}$  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, entre a latitude de  $\pm 60^{\circ}$  a  $\pm 90^{\circ}$ ,

não são muito previsíveis (WEBSTER, 1993; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007).

Figura 1 – Camadas Ionosféricas



Fonte: Encyclopedia Britannica, 2012. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere>. Acesso em: 15 de outubro de 2020

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 (OLIVEIRA, 2003; SILVA, 2018). 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 (MATSUOKA, 2007; AGUIAR, 2010; OLIVEIRA, 2003). Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  de latitude geomagnética, denominadas de baixas latitudes. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial. Como resultado para o posicionamento GNSS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de baixas latitudes, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo (MORAES et al., 2012; AQUINO et al., 2006).

Além disso, 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). 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.

Ademais, é preciso compreender que por se tratar de um meio dispersivo, o sinal se comporta diferente para frequências distintas, e nesse sentido os receptores de dupla frequência possuem suas vantagens já que minimizam os efeitos de primeira ordem da ionosfera, por meio

da combinação *Ion-free* (MONICO, 2008). No entanto, os efeitos de segunda e terceira ordem não são eliminados, conforme visto por Marques et al. (2014), e a não correção desses efeitos poderia acarretar em erros residuais em coordenadas geodésicas em levantamentos que precisariam ser acurados e precisos.

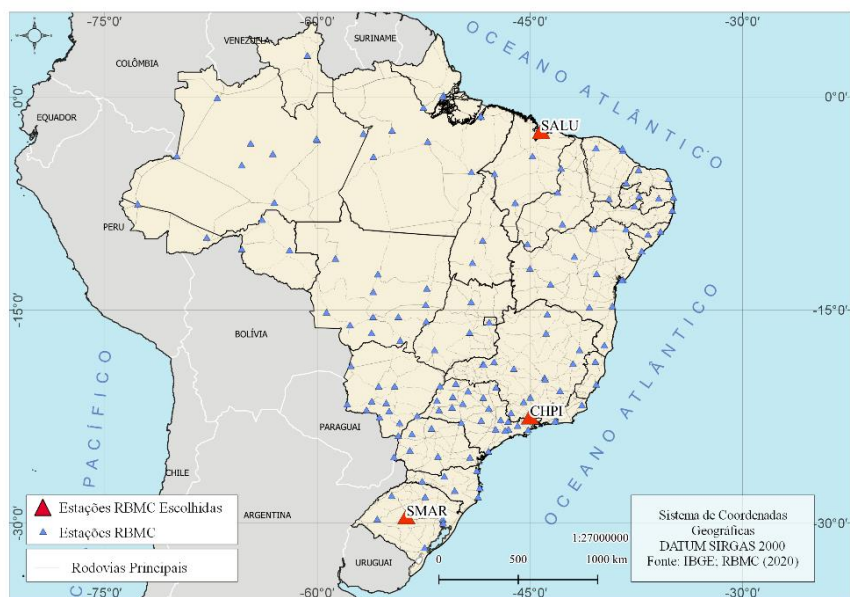
Outro ponto a ser destacado é que os receptores de dupla frequência possuem elevado custo, fazendo com que receptores de simples frequência sejam mais empregados mesmo em condições não adequadas (CAMARGO, 1999). Assim, tanto para o posicionamento por ponto quanto para bases médias e longas no posicionamento relativo, a precisão pode ser afetada pelo efeito sistemático proveniente da ionosfera (MATSUOKA, 2007). Por isso, vários modelos foram e ainda vêm sendo desenvolvidos para mitigar estes efeitos a fim de melhorar a acurácia do posicionamento, como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1996), NeQuick (RADICELLA, 2009), os GIMs (*Global Ionosphere Maps* - Mapas Globais da Ionosfera), modelos regionais (CAMARGO, 1999 – Mod\_Ion), modelos de Grade (AGUIAR, 2010), entre outros.

Desse modo, esta pesquisa tem por objetivo analisar a variabilidade do TEC no posicionamento GNSS, considerando a análise diária, sazonal (mês de junho e outubro) em período de alta (2014) e baixa (2010) atividade solar do ciclo 24. Para tal objetivo, foi empregado dados GNSS de três estações de referência com influência ionosférica distintas, CHPI (baixa latitude, localizada em Cachoeira Paulista - SP), SALU (próximo ao equador geomagnético, localizada em São Luiz - MA) e SMAR (próxima a latitudes médias, localizada em Santa Maria - RS) para realizar estudos relativos aos efeitos ionosféricos no posicionamento por ponto preciso.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos deste trabalho, foram realizados experimentos de forma que fosse possível avaliar a variação temporal (sazonal e diária) e espacial do TEC em período de alta e baixa atividade solar do ciclo 24. Para tais fins, foram selecionados dias de junho (baixa densidade de elétrons – dia 05/06) e outubro (alta densidade de elétrons – 24/10), empregando estações pertencentes a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) em diferentes regiões do Brasil, sendo elas: SALU (São Luiz - MA, localizada nas proximidades do equador geomagnético), SMAR (Santa Maria - RS, localizada no Sul do País, região isenta dos efeitos ionosféricos) e CHPI (Cachoeira Paulista - SP, localizada em regiões de irregularidades ionosféricas, como anomalia equatorial, cintilação ionosférica). Na Figura 2 estão destacadas as estações analisadas neste trabalho.

Figura 2 – Estações Seleccionadas da RBMC.



Fonte: Autores

E ainda, com objetivo de estudar a intensificação do efeito do eletrojato no equador geomagnético em período de alta atividade solar, foram analisados dois anos diferentes de dados: 2010 (ascensão do Ciclo 24) e 2014 (pico do ciclo 24).

Posteriormente, foi utilizado o software de Posicionamento Por Ponto (PPP) da *NRCan* por meio do *script call\_nrcan* onde são inseridos o dia do ano, a semana GPS, o ano, a estação, bem como as configurações do processamento, como o modo de processamento, as observáveis, os modelos ou correções utilizados, entre outras informações necessárias. Vale ressaltar que para melhor análise, foi estabelecido processamento cinemático. E nos experimentos são apresentadas comparações entre os resultados obtidos, por meio de duas estratégias:

- Utilizando apenas L1, sem correção ionosférica;
- Utilizando combinação *Ion Free*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, sendo apresentado em duas partes, cada parte referente a uma estratégia específica. Além disso, como o enfoque é realizar estudos relativos aos efeitos ionosféricos no posicionamento por ponto preciso, foi avaliado as precisões em latitude, longitude e altitude geométrica (SLat, SLong, SAlt), assim como, as discrepâncias (dLat, dLong, dAlt) entre as coordenadas geodésicas determinadas e a coordenada conhecida, onde a mesma foi previamente atualizada do referencial vigente e época do rastreo.

#### 3.1. Resultados: processamento – L1

As figuras 3 a 6 apresentam as precisões e as discrepâncias, época por época, das coordenadas das estações de estudo.

Figura 3: Discrepância e desvio padrão das coordenadas das estações CHPI, SALU e SMAR para o dia 05/06/2020.

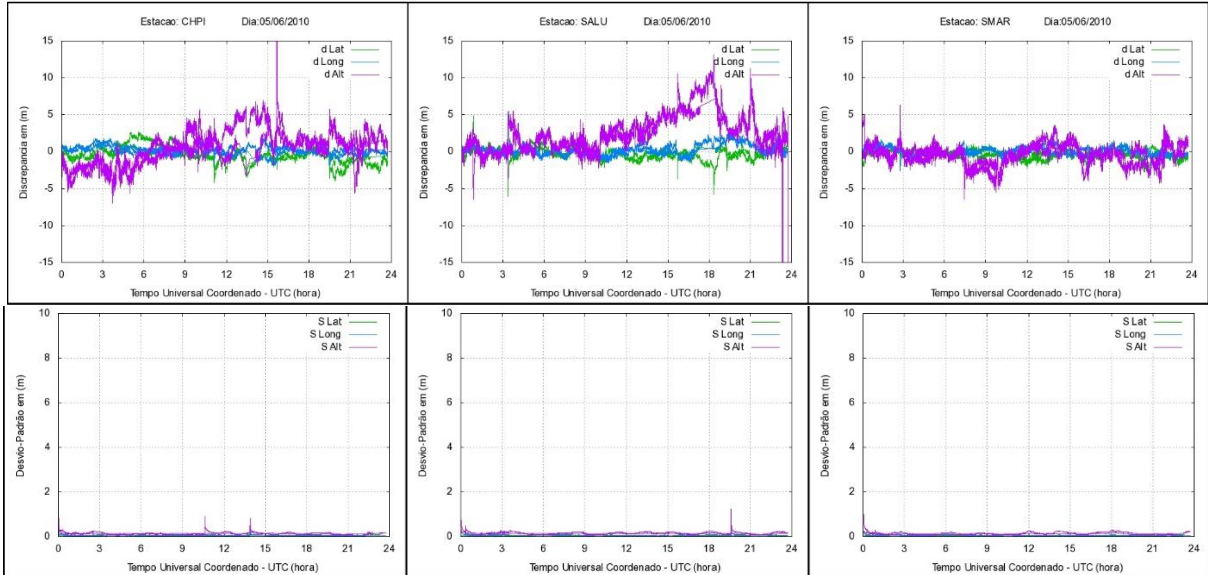


Figura 4: Discrepância e desvio padrão das coordenadas das estações CHPI, SALU e SMAR para o dia 05/06/2014.

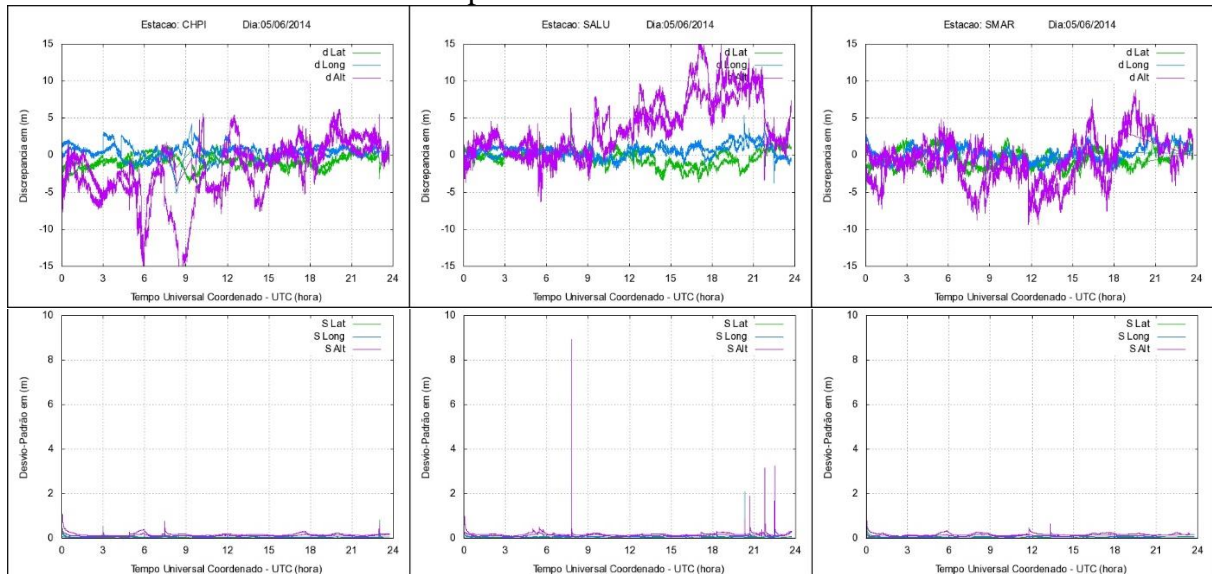


Figura 5: Discrepância e desvio padrão das coordenadas das estações CHPI, SALU e SMAR para o dia 24/10/2010.

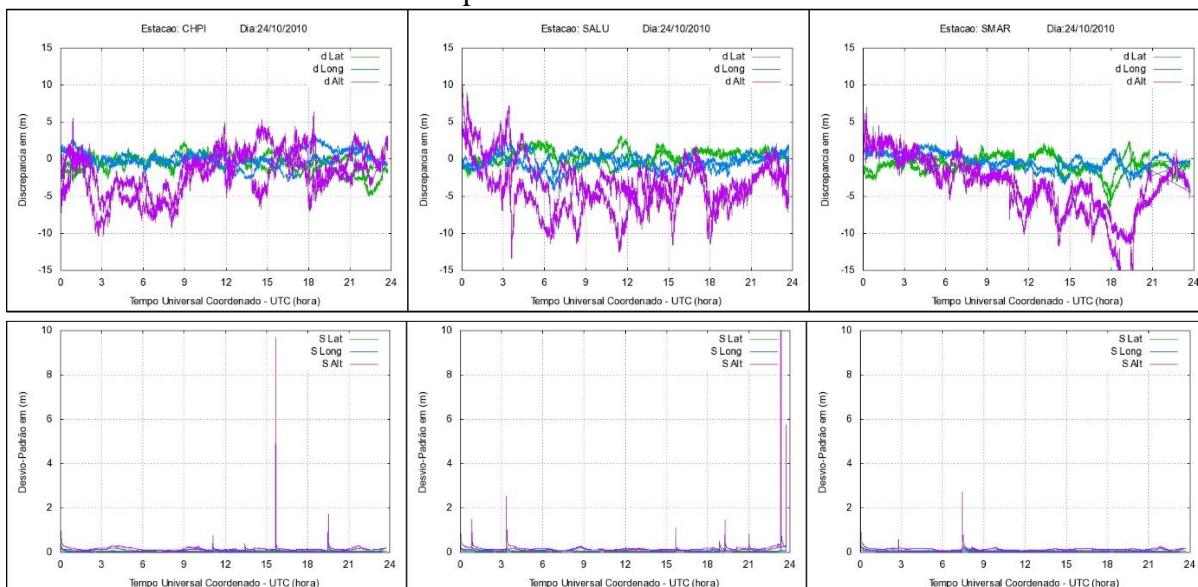
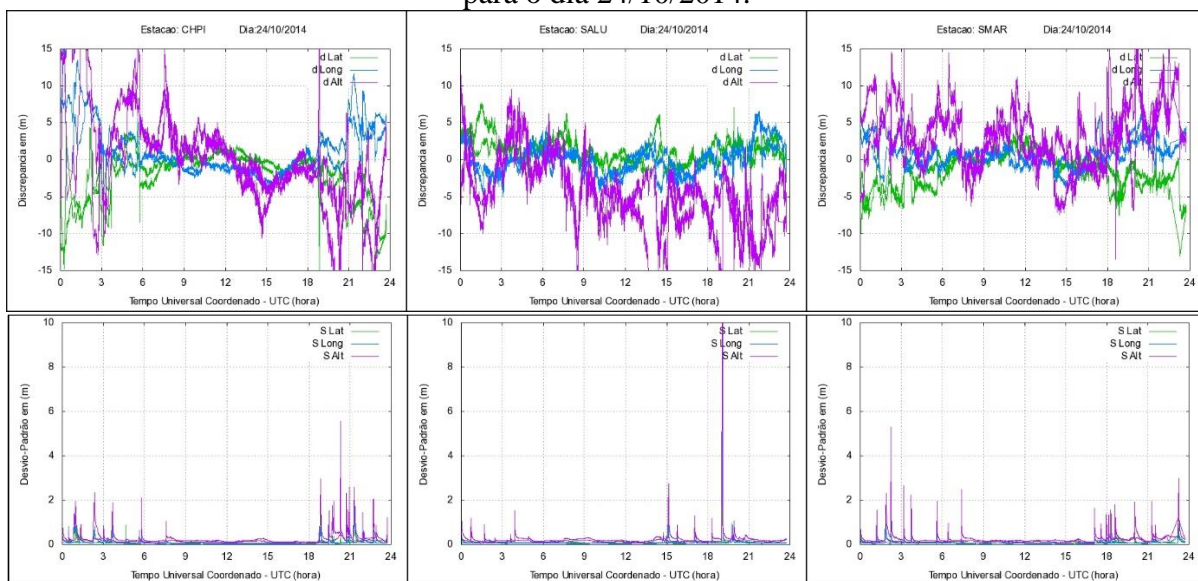


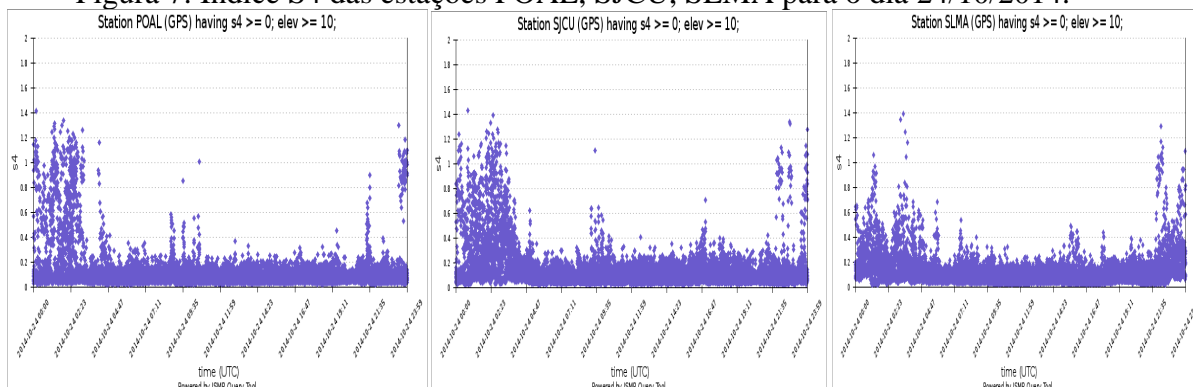
Figura 6: Discrepância e desvio padrão das coordenadas das estações CHPI, SALU e SMAR para o dia 24/10/2014.



Nota-se com base nos gráficos da Figura 3 a 6, que como a ionosfera não foi atenuada e nem modelada, é possível verificar o seu efeito na precisão do posicionamento, onde, na maioria dos casos, a maior discrepância corresponde aproximadamente a 14-16 hora local (17-19 horas UTC) que corresponde ao pico diurno da densidade de elétrons. Além disso, pode-se notar que após o pôr do sol, principalmente no mês de outubro (Figura 5 e 6), ocorreu um segundo pico na discrepância ou no desvio-padrão, isto pode ser justificado pelos efeitos da cintilação ionosférica, pois como se sabe, no Brasil os horários de cintilação mais intensos são limitados a uma hora após o pôr do sol até, aproximadamente, a meia noite local.

Para fins de comparação e análise, a Figura 7 apresenta gráficos da cintilação ionosférica a partir de dados do índice S4 disponibilizados pelo projeto CIGALA/CALIBRA referente a estação POAL (localizada nas proximidades da estação SMAR), SJCU (localizada nas proximidades da estação CHPI) e SLMA (localizada nas proximidades da estação SALU) com máscara de elevação de 10° para o dia 24/10/2014 onde houve o pico do ciclo solar.

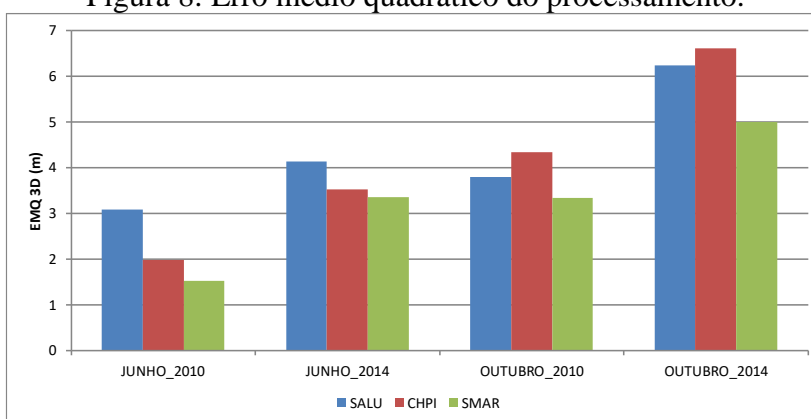
Figura 7: Índice S4 das estações POAL, SJCU, SLMA para o dia 24/10/2014.



Assim, pôde-se verificar indiretamente para as estações de estudo que a cintilação nos dias de outubro de 2014, analisados foi considerada moderada ( $0.5 < S4 < 1$ ) ou forte ( $S4 \geq 1$ ). De acordo com Conker et al. (2003) quando o índice S4 é maior que 0,707 os receptores podem perder quase ou totalmente o sinal transmitido pelos satélites.

Além disso, para analisar os resultados advindos do posicionamento por ponto foram calculados para cada dia o Erro Médio Quadrático (EMQ) utilizando 24 horas de dados. O EMQ indica a dispersão da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição de referência da estação, ou seja, representa a acurácia da posição estimada. Deste modo, o gráfico da Figura 8 apresenta o EMQ tridimensional (EMQ 3D).

Figura 8: Erro médio quadrático do processamento.



Ao analisar a Figura 8 e os gráficos das Figuras 3 a 6, fica ainda mais evidente a influência da máxima atividade solar, pois o EMQ 3D, assim como a discrepância máxima diurna, são aproximadamente 50% superiores que em períodos de mínima atividade solar (2010). Outro ponto importante é o efeito sazonal do posicionamento, pois, como pode ser observado nas

figuras anteriores, a magnitude média em Junho é aproximadamente 50% menor que no mês de alta densidade de elétrons (Outubro). Além disso, a estação localizada no sul do Brasil (SMAR), sofre menos influência dos efeitos ionosféricos, por estar na região das médias latitudes (região isenta dos efeitos ionosféricos) e distantes das anomalias equatoriais.

### 3.2. Resultados: processamento – *Ion-free*

Na sequência serão apresentados os resultados e análises do experimento utilizando a combinação linear *Ion-free*. Segundo Marques (2008), devido ao avanço e ao atraso ionosférico serem dependentes da frequência do sinal, é possível eliminar os efeitos ionosféricos de primeira ordem utilizando receptores de dupla frequência. Ao utilizar esta combinação, os efeitos da ionosfera são reduzidos consideravelmente (MONICO, 2008). Com base nestas informações, é possível verificar nos gráficos da Figura 9 que a discrepância das coordenadas foi de poucos metros para a análise época por época e centimétrica considerando EMQ final ajustado a 24 horas de dados, o que torna evidente a disparidade entre a primeira estratégia (utilizando somente L1, descrita no item 3.1).

Figura 9: Discrepância das coordenadas da estação CHPI, SALU e SMAR para Junho e Outubro de 2010/2014.

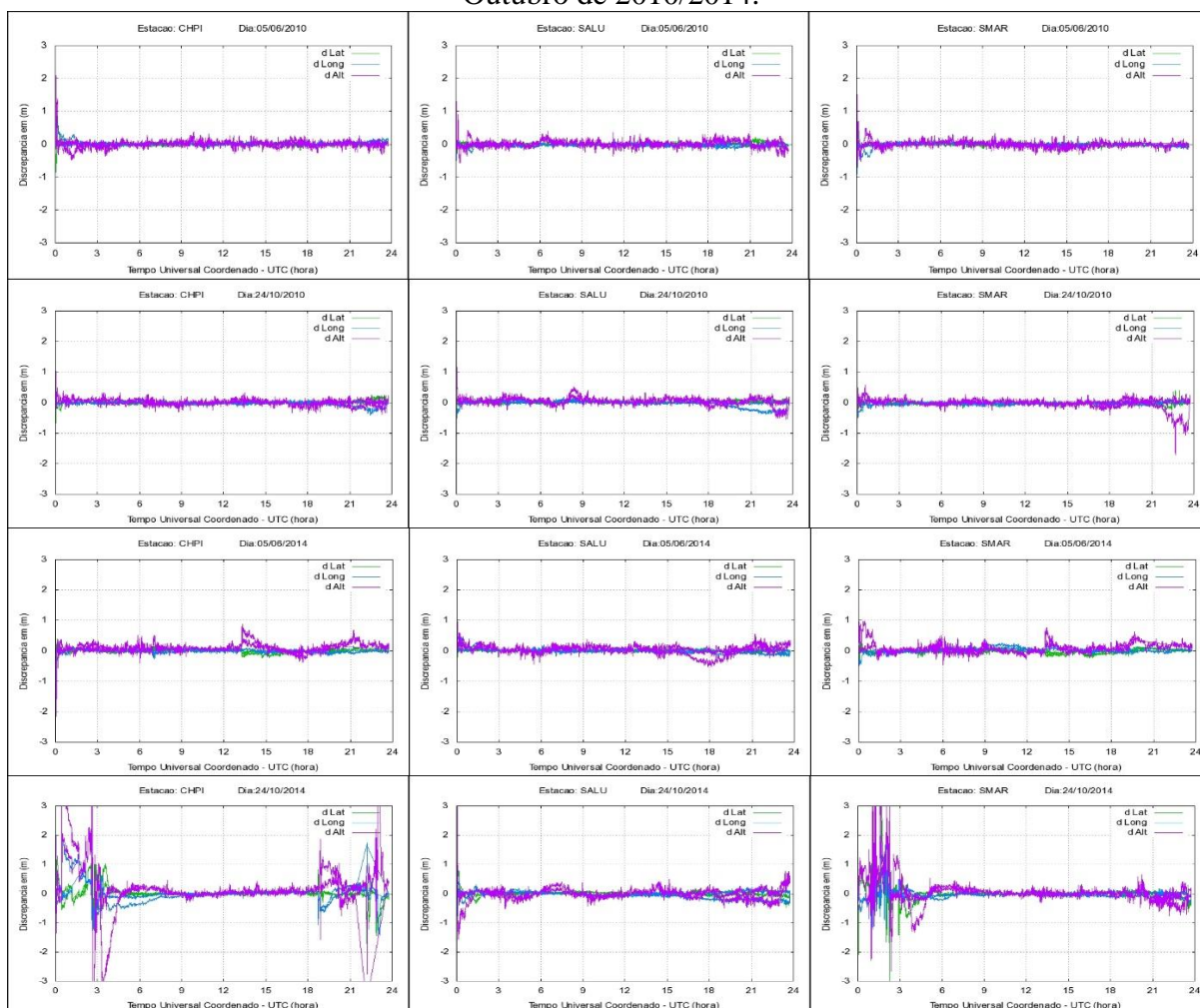
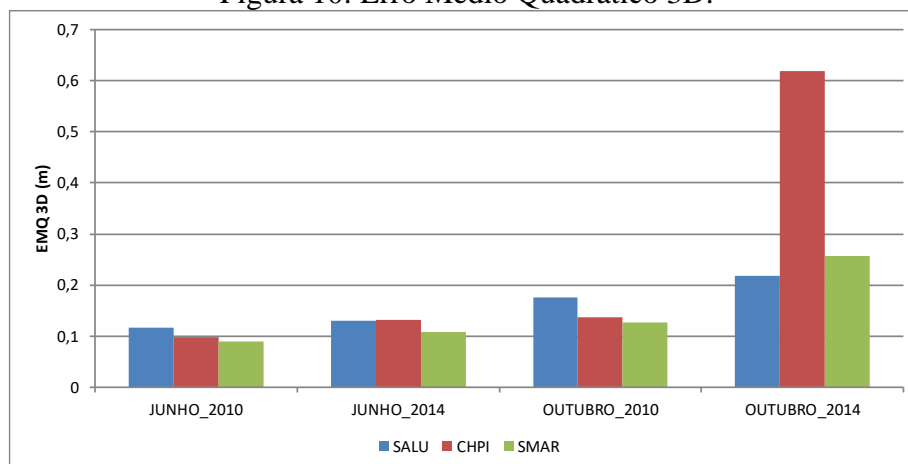


Figura 10: Erro Médio Quadrático 3D.



Analisando os valores do EMQ (Figura 10) e os gráficos época por época (Figura 9), pode-se verificar o comportamento sazonal e diurna do erro devido à ionosfera, no entanto esta percepção é mais enigmática se comparada com a estratégia 1, pois esta combinação elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Em contrapartida, segundo Monico (2008), o efeito da primeira ordem para portadora L1 é de 32,5m. Assim como análise anterior, no mês de solstício de inverno obteve-se os menores valores, e nos equinócios de primavera os maiores.

Além disso, é necessário salientar que a alta atividade ionosférica (dados 2014) intensificou o efeito do eletrojato no equador geomagnético aumentando a magnitude da anomalia equatorial, bem como as irregularidades ionosféricas, como bolhas ionosféricas, o que implica consequentemente na ocorrência de cintilação ionosférica. Esta influência da alta atividade solar fica claro ao comparar a discrepância época por época de 2010 e 2014.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que a ionosfera é a principal fonte de erro sistemático das observáveis e do posicionamento GNSS, principalmente com a utilização de receptores de uma frequência, este trabalho se propôs a colaborar com o entendimento do efeito ionosférico e do seu impacto no posicionamento por ponto. É importante ressaltar que a ionosfera não só degrada a acurácia do posicionamento GNSS como, também, reduz a sua integridade, pois existe uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas, como bolhas ionosféricas, sendo assim, também foram realizados estudos para avaliar os efeitos da cintilação ionosférica.

Baseado no que já foi abordado, estudando o comportamento do erro devido à ionosfera nas observáveis GNSS, foram desenvolvidos experimentos para avaliar as variações sazonais e diurnas do efeito da ionosfera em períodos de alta e baixa atividade solar (empregando dados de outubro e junho, de 2010 à 2014), bem como, analisar o efeito da cintilação ionosférica.

De maneira geral, os resultados desses experimentos permitem concluir que a ionosfera realmente é um fator importante a ser considerado, principalmente no posicionamento GNSS de uma frequência e em regiões afetadas por altos gradientes espaciais do TEC, como é o caso da região brasileira. Deste modo, a modelagem ionosférica é indispensável para levantamentos de alta precisão.

Em suma é possível afirmar que, os períodos mais problemáticos para o posicionamento estão entre o início da tarde entre 14 a 16 HL, onde os maiores valores e variações do TEC são

observados; e o após o pôr do sol entre as 18HL e meia-noite, devido a cintilação ionosférica.

De modo geral, com os experimentos também foi possível avaliar o comportamento sazonal ionosférico, onde pode-se verificar que os valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de equinócio e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno.

Os resultados do experimento para avaliação da atividade solar, notou-se uma relação direta entre o número de manchas solares e a densidade de elétrons na ionosfera: enquanto nos anos de alta atividade solar (maior número de manchas solares), 2014 o erro no posicionamento aumentou, e com a diminuição do número de manchas solares – e consequente diminuição da radiação solar – foi observada uma redução.

## Referências

AGUIAR, C. R. de **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente 2010.

AQUINO, M; MONICO, J. F. G.; DODSON, A; MARQUES, H. A. **Mitigating the effects of ionospheric scintillations on position estimates**. In: invited presentation to the 3rd European Space Weather Week, Brussels, 13-17 November, Proceedings... 2006.

CONKER; R. S., EL-ARINI, M. B. HEGARTY, C. J., HSIAO, T. **Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability**, Radio Science, Vol. 38. 2003.

DAL POZ, W. R. **Investigações preliminares sobre a influência do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. England: Short Run Press 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.

FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS**. 223p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

MARQUES, H. A. **A Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M. Análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. **BCG – Boletim de Ciências Geodésicas – On-line version**, 4., 2014, Curitiba, p. 879-901. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400049>.

MATSUOKA, M.T. **Influência de Diferentes Condições da Atmosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região Brasileira**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente 2007.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento por GNSS**. Descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008.

MORAES, A. O.; PAULA, E. R.; PERELLA, W. J.; RODRIGUES, F. S. On the distribution of GPS signal amplitudes during low-latitude ionospheric scintillation. **GPS Solutions (Heidelberg)**, v.10, p-1-12. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10291-012-0295-3>>.

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.

RIBEIRO, B. A. G. **Resposta ionosférica as tempestades geomagnéticas desde a região equatorial até além da crista da anomalia de ionização equatorial, durante o ciclo solar 24**. 2015. 133 f. Dissertação (Mestrado em Astronomia e Física) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, uses and evolution. *In: Annals of Geophysics*, vol. 52, n. 3-4, p. 417-422, jun./aug. 2009.

RODRIGUES, O. M. A. C. **O Ciclo Solar**. 2000. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ensino da Astronomia) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2000.

SILVA, G. A. **Anomalia equatorial de ionização e a propagação de sinais de rádio**. 2018. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

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.