

MARÍLIA SANGLARD ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS DE ORDEM SUPERIOR NO
DOMÍNIO DAS OBSERVAÇÕES E DO POSICIONAMENTO GNSS NO CICLO
SOLAR 24**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447i
2021 Almeida, Marília Sanglard, 1989-
Influência dos efeitos ionosféricos de ordem superior no domínio das observações e do posicionamento GNSS no ciclo solar 24 / Marília Sanglard Almeida. – Viçosa, MG, 2021.
101 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Ionosfera.
3. Tempestade magnética. 4. Bernese (Software). 5. Densidade eletrônica da ionosfera. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 526.6

MARÍLIA SANGLARD ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS DE ORDEM SUPERIOR NO
DOMÍNIO DAS OBSERVAÇÕES E DO POSICIONAMENTO GNSS NO CICLO
SOLAR 24**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de maio de 2021.

Assentimento:



Marília Sanglard Almeida
Autora



William Rodrigo Dal Poz
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela capacidade de pensar e refletir.

Aos meus pais Hermes e Luzia (*in memoriam*), que sempre priorizaram minha educação e acreditaram em mim. Às minhas irmãs pela força e incentivo. Aos meus queridos sobrinhos pelos momentos de descontração e carinho sincero.

Ao meu esposo Gabriel por sua doação e contribuição, sempre ao meu lado me apoiando nos momentos difíceis e aplaudindo minhas conquistas.

A Universidade Federal de Viçosa pelo incentivo que, através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, disponibilizou equipamentos, instalações e aplicativos computacionais.

Aos professores e secretários do DEC, sempre amigos e solícitos.

Aos professores Joel Gripp, Éder Marques e toda a equipe de cadastro, que se mobilizaram para a aquisição do *software* Bernese GNSS.

Aos amigos da pós, pelos dias cansativos e ao mesmo tempo felizes que vivenciamos juntos!

Ao professor e orientador William pela imensurável paciência, dedicação, ensinamentos e contribuições para este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Todo conhecimento é inacabado, isto é, um processo que se desenvolve continuamente, incorporando novos elementos e jamais deixando de questionar a si mesmo”.

Paulo Freire

“É preciso estudar muito para saber um pouco”.

Montesquieu

RESUMO

ALMEIDA, Marília Sanglard, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2021. **Influência dos efeitos ionosféricos de ordem superior no domínio das observações e do posicionamento GNSS no ciclo solar 24.** Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

O presente trabalho teve como objetivos a investigação dos efeitos de ordem superior da ionosfera (*higher-order ionospheric effects* - HOI) e seus impactos no posicionamento pelo *Global Navigation Satellite System* (GNSS) no ciclo solar 24. Na primeira etapa deste trabalho, a influência dos efeitos HOI no posicionamento GNSS foi analisada sazonalmente em períodos de baixa e alta atividade ionosférica ao longo do ciclo solar 24 (janeiro, abril, julho e outubro nos anos de 2010, 2013, 2014 e 2018). Os valores obtidos para o erro devido a não consideração dos efeitos HOI também foram analisados por regiões ionosféricas. Os valores máximos observados foram cerca de 0,004 m (na região equatorial). Além disso, a partir das análises de correlações por médias mensais, resultados demonstraram uma relação direta entre o número de manchas e fluxo solar na ionosfera e o erro. Na segunda parte, os efeitos HOI nas observações foram estimados para a data da tempestade geomagnética mais intensa do ciclo 24, ocorrida em 17 de março de 2015. O efeito de segunda ordem atingiu valor máximo próximo a 0,050 m (para a frequência L_2 utilizando o código). Além disso, foram verificados os efeitos HOI no posicionamento pelo Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e pelo Posicionamento Relativo Estático (PRE). No PPP, o erro alcançou valor máximo e média em torno de 0,011 m e 0,005 m na planimetria e 0,007 m e 0,002 m na altimetria, obtidos na fase principal da tempestade. No PRE, o valor máximo do erro foi cerca de 0,009 m e média 0,001 m, na planimetria e na altimetria. As investigações deste trabalho apontam que a importância do erro devido a não consideração dos efeitos HOI consiste em sua associação ao posicionamento de alta precisão a nível milimétrico, principalmente em períodos de alta atividade solar ou durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Palavras-chave: Bernese GNSS. Ionosfera. Tempestade Geomagnética. TEC. PPP-GPS.

ABSTRACT

ALMEIDA, Marília Sanglard, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2021. **Influence of higher-order ionospheric effects in the domain of observations and GNSS positioning in the solar cycle 24.** Adviser: William Rodrigo Dal Poz.

The present work had as objectives the investigation of higher-order ionospheric (HOI) effects and its impacts on Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning in the solar cycle 24. In the first stage of this work, the influence of HOI effects on GNSS positioning was analyzed seasonally in periods of low and high ionospheric activity throughout the solar cycle 24 (January, April, July and October for the years 2010, 2013, 2014 and 2018). The values obtained for the error due to non-consideration of HOI effects were also analyzed by ionospheric regions. The maximum values obtained for the error were around 0.004 m (in the equatorial region). In addition, from the analysis of correlations by monthly averages, results demonstrated a direct relationship between the number of spots and solar flux in the ionosphere and the error. In the second part, the HOI effects in the observations domain were estimated for the date of the biggest solar storm that occurred in cycle 24, which occurred on March 17, 2015. The second order effect reached a maximum value close to 0.050 m (for the L₂ frequency using the code). In addition, the HOI effects in the positioning domain was verified by Precise Point Positioning (PPP) and by Static Relative Positioning (PRE). In the PPP, the error reached maximum and average value around 0.011 m and 0.005 m in planimetry and 0.007 m and 0.002 m in altimetry, obtained in the main phase of the storm. In the PRE, the maximum error value was about 0.009 m and average about 0.001 m, in planimetry and altimetry. The investigations of this work point out that the importance of the error due to the non-consideration of the HOI effects consists of its association with the positioning of high precision at the millimeter level, mainly in periods of high solar activity or during the occurrence of geomagnetic storms.

Keywords: Bernese GNSS. Ionosphere. Geomagnetic Storm. TEC. PPP-GPS.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Histórico do número de manchas solares (ciclos solares)	32
Figura 2 – Fluxo solar observado, suavizado e predito.....	33
Figura 3 - Número de manchas solares e fluxo solar, por meio de médias mensais, nos períodos de alta e baixa atividade do ciclo solar 24, nos meses de janeiro, abril, julho e outubro.....	33
Figura 4 – Estações utilizadas nos processamentos a partir do método PPP.....	35
Figura 5 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações RBMC.....	36
Figura 6 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações RBMC.....	37
Figura 7 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações RBMC.....	37
Figura 8 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações RBMC.....	37
Figura 9 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações RBMC.....	38
Figura 10 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações RBMC.....	38
Figura 11 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações RBMC.....	38
Figura 12 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações RBMC.....	39
Figura 13 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações CORS/CACS.....	40
Figura 14 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações CORS/CACS.....	40
Figura 15 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações CORS/CACS.....	40
Figura 16 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações CORS/CACS.....	40
Figura 17 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações CORS/CACS.....	41
Figura 18 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações CORS/CACS.....	41
Figura 19 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações CORS/CACS.....	41

Figura 20 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações CORS/CACS.....	41
Figura 21 - Regiões Ionosféricas.....	43
Figura 22 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2010, agrupados em regiões ionosféricas.....	44
Figura 23 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2013, agrupados em regiões ionosféricas.....	44
Figura 24 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2014, agrupados em regiões ionosféricas.....	44
Figura 25 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2018, agrupados em regiões ionosféricas.....	44
Figura 26 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2010, agrupados em regiões ionosféricas.....	45
Figura 27 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2013, agrupados em regiões ionosféricas.....	45
Figura 28 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2014, agrupados em regiões ionosféricas.....	46
Figura 29 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2018, agrupados em regiões ionosféricas.....	46
Figura 30 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de altas latitudes.....	46
Figura 31 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de latitudes médias....	47
Figura 32 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região equatorial.....	47
Figura 33 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de altas latitudes.....	47
Figura 34 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de latitudes médias....	47
Figura 35 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região equatorial.....	48
Figura 36 – Coeficientes de correlação para cada estação, entre as médias mensais do erro em resultantes planimétricas, número de manchas solares e fluxo solar.....	49
Figura 37 – Coeficientes de correlação para cada estação, entre as médias mensais do erro em componentes altimétricas, número de manchas solares e fluxo solar.....	49

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Camada da ionosfera e o vetor indução geomagnética B.....	58
Figura 2 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982.....	61
Figura 3 – Índice Dst para o mês de março do ano 2015.....	62
Figura 4 - Mapas do TEC para os dias 16, 17 e 18 de março de 2015, às 16:30h UTC	62

Figura 5 – Localização das estações utilizadas nos processamentos a partir do PPP.....	63
Figura 6 – Localização das estações utilizadas nos processamentos a partir do PRE.....	64
Figura 7 – Variação diária do efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando o código P durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.....	65
Figura 8 – Variação diária do efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando a fase durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.....	65
Figura 9 – Variação diária do efeito de terceira ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando o código P durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.....	66
Figura 10 – Variação diária do efeito de terceira ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando a fase durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.....	67
Figura 11 – Variação diária do efeito de segunda ordem para a frequência L_2 com o código para o dia 17 de março de 2015 para estações AMTE, RSCL, MAPA, UBA1	67
Figura 12 – Variação diária do efeito de terceira ordem para a frequência L_2 com o código para o dia 17 de março de 2015 para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.....	68
Figura 13 – Médias, mínimos e máximos em resultantes planimétricas a partir do PPP..	69
Figura 14 – Médias, mínimos e máximos em componentes altimétricas com o PPP.....	70
Figura 15 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 16 e 18h, utilizando o PPP.....	71
Figura 16 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 18 e 20h, utilizando o PPP.....	71
Figura 17 – Médias, mínimos e máximos das resultantes planimétricas (A) e componentes altimétricas (B), para o dia 10 de março, das estações RBMC a partir do método PPP	72
Figura 18 – Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre, para os dias 10, 16, 17 e 18 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas, das estações RBMC a partir do método PPP.....	74
Figura 19 – Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre, para os dias 10, 16, 17 e 18 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas, das estações RBMC a partir do método PPP.....	75
Figura 20 – Localização das estações RBMC, CORS e CACS.....	76
Figura 21 – Gráficos <i>boxplot</i> do erro em resultantes planimétricas ao longo do dia 17 de março, nas estações pertencentes as redes RBMC, CORS e CACS.....	77
Figura 22 – Gráficos <i>boxplot</i> do erro em componentes altimétricas ao longo do dia 17 de março, nas estações pertencentes as redes RBMC, CORS e CACS.....	77
Figura 23 – Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre nas estações CORS/CACS para o dia 17 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas.....	78
Figura 24 –Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre nas estações CORS/CACS para o dia 17 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas.....	78
Figura 25 – Médias, mínimos e máximos em resultantes planimétricas, a partir PRE...	79
Figura 26 – Médias, mínimos e máximos em componentes altimétricas a partir PRE	79

Figura 27 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 18 e 20h, utilizando o PRE.....	80
Figura 28 – Gráficos <i>boxplot</i> do erro em resultantes planimétricas e componentes altimétricas ao longo dos dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE utilizando estações RBMC.....	81
Figura 29 - Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre, para os dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE, nos intervalos de 0 a 14h e 14 a 24h	82
Figura 30 – Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre, para os dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE, nos intervalos de 0 a 14h e 14 a 24h.....	83

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Coordenadas geodésicas e geomagnéticas das estações utilizadas neste trabalho, de acordo com a região ionosférica à qual pertencem 35

Tabela 2 - Coeficientes de correlação entre as médias mensais do erro e as médias mensais do número de manchas solares e do fluxo solar, agrupados por regiões ionosféricas48

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Classificação de uma tempestade geomagnética segundo o índice Dst..... 61

Tabela 2 - Comprimento das linhas de base utilizadas nos processamentos pelo PRE.. 64

Tabela 3 – Efeitos de segunda ordem máximos e mínimos (absolutos) obtidos para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1..... 68

Tabela 4 – Efeitos de terceira ordem máximos e mínimos obtidos para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1..... 68

Tabela 5 – Coeficientes de correlação do erro em resultantes planimétricas entre o dia 10 e os dias 16, 17 e 18 de março, das estações RBMC a partir do método PPP..... 72

Tabela 6 – Coeficientes de correlação do erro em componentes altimétricas entre o dia 10 e os dias 16, 17 e 18 de março, das estações RBMC a partir do método PPP..... 73

Tabela 7 – Valores de erro máximo e médias máximas obtidas a partir dos métodos PPP e PRE utilizando estações RBMC..... 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE - *Auroral Electrojet Index*
AMAS - Anomalia Magnética do Atlântico Sul
CACs - *Canadian Active Control System*
CODE - *Center for Orbit Determination in Europe*
CORS - *Continuously Operating Reference Station*
CME – *Coronal Mass Ejection*
DOY - *Day of Year*
Dst - *Disturbance Storm-Time*
EPB - *Equatorial Plasma Bubble*
EUREF - *EUREF Permanent Network*
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
GLONASS - *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GPS - *Global Positioning System*
HOI – *Higher-Order effects of the Ionosphere*
HSSWS – *High Speed Solar Wind Streams*
IAGA - Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS - *International Earth Rotation and Reference System*
IGRF - *International Geomagnetic Reference Field*
IGS - *International GNSS Service*
ISGI - *International Service of Geomagnetic Indices*
ISR - *Arecibo Incoherent Scatter Radar*
ITRF - *International Terrestrial Reference Frame*
Kp - *Planetarische Kennziffer*
NGS - *National Geodetic Survey*
NOAA - *National Oceanics and Atmospheric Administration*
PPP - Posicionamento por Ponto Preciso
PRE – Posicionamento Relativo Estático
RAL - Região de Altas Latitudes
RB - *Ray Bending*
RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RE - Região Equatorial
RINEX - *Receiver Independent Exchange Format*
RLM - Região de Latitudes Médias
SCA - Sistemas de Controle Ativo
SDF – *Sudden Disappearing Filaments*
s.f.u - *solar flux unit*
TEC - *Total Electron Content*
UFV – Universidade Federal de Viçosa
UTC - *Universal Time Coordinated*
ZWD - *Zenith tropospheric Wet Delay*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO	15
2. OBJETIVOS	23
3. CONTEÚDO DO TRABALHO	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO 1. EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA IONOSFERA DURANTE O CICLO SOLAR 24 E SUA INFLUÊNCIA NO POSICIONAMENTO GNSS DE ACORDO COM AS REGIÕES IONOSFÉRICAS.....	30
1. INTRODUÇÃO	31
2. VARIAÇÕES TEMPORAIS DA IONOSFERA	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4. RESULTADOS E ANÁLISES	36
4.1 Análise sazonal e ao longo do ciclo 24 das estações do hemisfério Sul	36
4.2 Análise sazonal e ao longo do ciclo 24 das estações do hemisfério Norte.....	39
4.3 Resultados e análises por regiões ionosféricas	42
4.3.1 Correlação entre médias mensais por estação, nº de manchas solares e fluxo solar	4
9	
5. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO 2. EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA IONOSFERA DURANTE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA NO DIA 17 DE MARÇO DE 2015 E SUA INFLUÊNCIA NO POSICIONAMENTO GNSS NO BRASIL	55
1. INTRODUÇÃO	56
2. EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA IONOSFERA	57
3. DISTÚRBIOS MAGNÉTICOS	60
4. TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA NO DIA 17 DE MARÇO DE 2015.....	61
5. EXPERIMENTOS E RESULTADOS	62
5.1 Materiais e Métodos	62
5.2 Avaliação dos efeitos HOI no domínio das observações	64
5.3 Resultados e análises a partir do método PPP.....	69

5.4 Resultados e análises a partir do método PRE.....	79
6. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85
CONCLUSÕES GERAIS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICES	95
a) Estratégia de processamento de dados no Bernese GNSS (Capítulos 1 e 2)	95
b) Obtenção dos resultados em Resultantes Planimétricas e Componentes Altimétricas (Capítulos 1 e 2)	96
Capítulo 1	97
a) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Altas Latitudes	97
b) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Latitudes Médias	97
c) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região Equatorial	98
d) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Altas Latitudes	98
e) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Latitudes Médias	99
f) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região Equatorial	99
g) Coeficientes de correlação de Spearman entre as médias mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI e as variáveis ‘número de manchas solares’ e ‘fluxo solar’, por estação	100
Capítulo 2	101
a) Valores máximos mínimos e médias para os erros de segunda e terceira ordens no domínio das observações	101

INTRODUÇÃO GERAL

1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO

Fundamentalmente, o posicionamento utilizando o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) pode ser realizado nas formas absoluta (por ponto) e relativa. No posicionamento por ponto, onde se necessita de apenas um receptor, destaca-se o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Nesse método, se empregam as observações da pseudodistância e da fase da onda portadora, além de fazer uso de efemérides precisas e correções para os relógios dos satélites (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Por outro lado, tem-se também o método de posicionamento relativo, onde geralmente são utilizadas as equações de duplas diferenças da fase da onda portadora. Para isso, é necessário dispor de no mínimo dois receptores, sendo que um deles deve ocupar uma estação de referência com coordenadas conhecidas no referencial de interesse (estação base) e o outro a estação de interesse, formando as linhas de base (LEICK, 2004).

Com o surgimento dos Sistemas de Controle Ativo (SCA) tornou-se desnecessário ocupar as estações base, o que implica na possibilidade de se utilizar apenas um receptor para realizar o posicionamento relativo. A principal rede de referência ativa no Brasil é a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Atualmente, a RBMC conta com 152 estações ativas, sendo que em janeiro de 2020 foram lançadas 3 novas estações. A maioria dos receptores da RBMC possui a capacidade de rastrear satélites do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) e *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), e poucos rastreiam apenas GPS (IBGE, 2021).

Assim como a RBMC no Brasil, existem vários SCA espalhados pelo mundo com dados disponibilizados gratuitamente, onde destacam-se as redes *Continuously Operating Reference Station* (CORS) gerenciada pela *National Geodetic Survey* (NGS), *EUREF Permanent Network* (EUREF) e a *Canadian Active Control System* (CACS). Dessa forma, perante a volumosa disponibilidade de dados de estações, nota-se a possibilidade da realização de estudos sobre a influência da ionosfera no posicionamento GNSS, sem a necessidade de coleta de dados em campo.

No que concerne as maiores fontes de erros associados à propagação dos sinais GNSS, aqueles advindos da ionosfera são um dos mais importantes a serem considerados para a realização do posicionamento geodésico com acurácia milimétrica. Os satélites GNSS em sua concepção original, transmitem sinais de rádios em duas frequências, cujo objetivo principal é permitir a correção dos efeitos de primeira ordem da ionosfera, o que pode ser feito a partir da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*ionfree*). Contudo, os efeitos de segunda e terceira ordens da ionosfera (efeitos de ordem superior da ionosfera, ou *higher order effects of the ionosphere* - HOI) geralmente são negligenciados no processamento dos dados GNSS, o que acarreta em efeitos residuais na estimativa das coordenadas geodésicas (FRITSCHÉ et al., 2005; IERS, 2010; MARQUES, MONICO, AQUINO, 2014).

Na ionosfera, destaca-se a presença de anomalias e irregularidades que afetam a propagação dos sinais GNSS, como a anomalia equatorial (APPLETON, 1946), tempestades geomagnéticas, bolhas ionosféricas e a cintilação ionosférica. Dentre os diversos efeitos que a ionosfera causa nesses sinais, dois dos mais significativos são devido ao avanço da fase e retardo do código (WANNINGER, 1993; KLOBUCHAR, 1996).

O atraso no sinal, causado pelo efeito de primeira ordem, representa em torno de 99,9% do efeito total, ficando o restante a cargo dos efeitos HOI. Logo, para muitos tipos de aplicações práticas, os efeitos HOI não representam maiores problemas, porém, para aplicações científicas ou que requeiram resultados com alta precisão, tal como a materialização de referenciais geodésicos, a não correção desses efeitos implica em efeitos residuais nas coordenadas da ordem de milímetros, podendo chegar a centímetros (FRITSCHÉ et al., 2005).

Com base nas principais pesquisas realizadas ao redor do mundo, o *International Earth Rotation and Reference System* (IERS) recomenda, de acordo com o *IERS Conventions* (2010) (PETIT e LUZUM, 2010) que os centros de processamento de dados do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) apliquem as correções dos efeitos HOI. Neste sentido, pesquisas a nível internacional tem sido conduzidas nos últimos anos visando o estudo e a forma adequada de modelar os efeitos HOI, onde destacam-se: Kedar et al. (2003); Fritsche et al. (2005); Hoque e Jakowski (2007 e 2008); Hernández-Pajares et al. (2005 e 2007); Petrie, King e Moore (2010); Marques, Monico e Aquino (2011); Petrie et al. (2011); Elmas et al. (2011); Hoque e Jakowski (2012); García-Fernández,

Desai e Butala (2013); Hernández-Pajares et al. (2014); Jiang, Deng e Li (2015); Qu et al. (2015); Liu et al. (2016); Li e Jin (2017); Banville et al. (2017); Deng et al. (2017); Hadas et al. (2017); Zhang, Guo e Zhang (2018); Cai et al. (2019); Zhang et al. (2020); Yang et al. (2020); Qi et al. (2021); Xi e Wang (2021) entre outros.

Kedar et al. (2003), implementaram a correção de segunda ordem sugerida por Bassiri e Hajj (1993) e investigaram seu efeito nas posições de estações no posicionamento absoluto por GPS. Concluíram que as correções dos efeitos HOI são importantes para a interpretação adequada dos movimentos da estação pois quando não corrigidos, podem se transformar em movimentos de estação diurnos, sazonais e interanuais, que podem ser erroneamente interpretados como efeitos de maré e deformação crustal. Fritsche et al. (2005) apresentaram resultados, a nível centimétrico, de alterações das posições de satélites ao se aplicar os termos de correção de ordem superior. Kedar et al. (2003) e Fritsche et al. (2005) não utilizaram o *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) para a representação do campo magnético da Terra no cálculo da correção dos efeitos de segunda ordem da ionosfera, porém sugerem que isso seja feito. Além disso, não avaliaram os impactos dos efeitos HOI na estimativa de coordenadas pelo PPP bem como pelo posicionamento relativo.

Hernández-Pajares et al. (2007), analisaram os diferentes impactos dos efeitos de segunda ordem da ionosfera e sua influência em estimativas de coordenadas geodésicas, através do posicionamento pelo PPP e propuseram um método para corrigir os efeitos HOI no domínio das observações GPS. Não avaliaram o efeito de terceira ordem.

Marques et al. (2009) analisaram os efeitos HOI no posicionamento GNSS no Brasil em períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Nesse trabalho, o PPP foi realizado com solução diária envolvendo os anos de 2006 a 2008,5 e a correção dos efeitos HOI provocou diferenças máximas da ordem de 4 mm nas coordenadas. Foi utilizada a estação BRFT (RBMC) no processamento pelo PPP. No caso do Posicionamento Relativo Estático (PRE), foram processadas quatro linhas de base. As diferenças nas coordenadas devido à correção dos efeitos HOI atingiram aproximadamente 3 mm. No posicionamento relativo cinemático, essas diferenças alcançaram valores máximos da ordem de 7 mm em latitude e longitude. Para a componente altimétrica, as diferenças máximas foram da ordem de 15 mm. Concluíram que para o posicionamento que requer alta acurácia, é necessário aplicar correção desses efeitos.

Rosa, Monico e Chaves (2010), analisaram séries temporais de coordenadas estimadas com GPS para detecção, remoção e recuperação de efeitos sazonais. Nesse trabalho, foram estimadas diariamente coordenadas de duas estações pertencentes à RBMC, com o PPP. Foi realizada uma análise dos efeitos de segunda ordem da ionosfera para os dados da estação BRFT, em que foi apresentada a série temporal resultante das diferenças entre as séries temporais da componente vertical, obtida de dados não corrigidos e corrigidos dos efeitos de segunda ordem da ionosfera. Os efeitos semi-anuais, presentes nas séries temporais não corrigidas dos efeitos de segunda ordem da ionosfera, apresentaram influências de até 2 mm. Concluíram que a correção desse efeito é necessária quando se deseja alta precisão.

Hernández-Pajares et al. (2014) realizaram estudos envolvendo os efeitos HOI aliados a produtos GNSS precisos, como posição e relógio do receptor, atraso troposférico, deslocamento do geocentro e posição e relógio de satélites GNSS. Como resultados, mostraram que o termo ionosférico de segunda ordem se destaca entre os principais efeitos na faixa L, com valores de pico de até 2 cm. Seus impactos, combinados aos produtos precisos dos satélites GNSS, afetam as coordenadas Z do satélite em até 1 cm. Outros produtos precisos foram afetados a nível milimétrico. Após a correção, o impacto em todos os produtos GNSS precisos foi reduzido para menos de 5 mm. No PPP, mostraram que o impacto dos efeitos HOI foi menor do que as incertezas das próprias soluções PPP, após a correção dos efeitos HOI nas órbitas de satélite e relógios. Dentre as conclusões, destaca-se a afirmativa de que os efeitos HOI são um dos principais fatores limitantes no posicionamento que demanda acurácia milimétrica.

Marques, Monico e Aquino (2014) analisaram os efeitos HOI no ciclo solar 24 (2006 a 2013,8) e sua influência no PPP. Neste trabalho, foi utilizada a estação RECF, pertencente à RBMC. No PPP estático, os efeitos HOI provocaram efeito máximo de aproximadamente 1,5 cm nas coordenadas da estação. No PPP cinemático, o efeito máximo foi cerca de 5 mm. Jiang, Deng e Li (2015) analisaram os efeitos HOI em séries temporais de coordenadas GPS. Não foram analisados os impactos no PPP e no PRE. Concluíram que quando não corrigidos os efeitos HOI, provocam estimativa tendenciosa das coordenadas das estações, atingindo a ordem de milímetros podendo chegar a centímetros.

Banville et al. (2017) estudaram a estimação e aplicação de correções do efeito de segunda ordem no PPP. Deng et al. (2017), estudaram os efeitos HOI em séries temporais

de coordenadas GPS. Foram utilizados dados de 104 estações do *International GNSS Service* (IGS) distribuídas globalmente, entre os anos de 1999 a 2003. Não foi avaliada a influência desses efeitos no domínio do posicionamento GNSS.

Zhang et al (2018) e Zhang, Guo e Zhang (2020) investigaram os efeitos HOI no atraso troposférico do GPS e os impactos dos atrasos ionosféricos de segunda ordem na estimativa do atraso úmido troposférico zenital (*Zenith tropospheric Wet Delay – ZWD*). Foram utilizadas observações de mais de 100 estações com cobertura global. Os resultados dos experimentos mostram que os efeitos HOI têm um impacto significativo (a nível milimétrico) nos parâmetros troposféricos estimados, e a influência do HOI depende da localização das estações. As diferenças máximas das estimativas de ZWD chegam a mais de 20 mm durante períodos de alta atividade solar, como em tempestades geomagnéticas. Concluíram que o componente do gradiente troposférico é mais afetado para estações de baixa latitude durante o dia.

Os trabalhos apresentados demonstram um crescente interesse da comunidade geodésica pelo estudo dos efeitos HOI e seus impactos no posicionamento. Alguns deles, avaliaram a influência desses efeitos no PPP e outros avaliaram a influência no posicionamento relativo. Alguns trabalhos avaliaram os impactos nos dois métodos, porém, em ciclos solares anteriores ao ciclo 24. Além disso, na maioria dos trabalhos apresentados, não foi realizado um estudo dos efeitos HOI compreendendo estações pertencentes às três regiões ionosféricas, bem como a utilização do modelo geomagnético IGRF-12 no cálculo da correção dos efeitos de segunda ordem da ionosfera.

O modelo do IGRF consiste de um conjunto de coeficientes harmônicos esféricos globais, os quais são válidos para um período de 5 anos. Dessa forma, o modelo disponibilizado a partir de 2015, o IGRF-12, é válido até o ano de 2020. Outras informações relevantes sobre os modelos do IGRF podem ser encontradas em <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html/>, e mais especificamente sobre o IGRF-12 (suas formulações, coeficientes, mapas e outras especificações), em Thebault et al. (2015).

O campo geomagnético da Terra pode ser alterado em decorrência de eventos solares, como explosões solares (*solar flares*), ejeções de massa coronal (*Coronal Mass Ejections - CME*), correntes de vento solar de alta velocidade (*High Speed Solar Wind Streams - HSSWS*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (*Sudden Disappearing Filaments -SDF*). Dessa forma, quando algum evento solar ocorre, as linhas de força do

campo geomagnético podem ser comprimidas de forma significativa, fazendo com que ocorram as denominadas tempestades geomagnéticas (MCNAMARA, 1991).

As tempestades geomagnéticas podem alterar a densidade de elétrons na ionosfera, afetando dessa forma o comportamento do Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* -TEC) e, conseqüentemente, o posicionamento GNSS. Dessa maneira, estudos envolvendo a influência de tempestades geomagnéticas na ionosfera e/ou no posicionamento GNSS, tem sido realizados ao redor do mundo.

No Brasil, Yamashita (1999) por exemplo, estudou o efeito das tempestades geomagnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude. Dal Poz e Camargo (2006) apresentaram as conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores de simples frequência. Matsuoka et al. (2013) analisaram a influência de uma tempestade geomagnética na região brasileira (ocorrida no dia 20 de novembro de 2003), na ionosfera e no posicionamento por ponto, utilizando dados GPS. Rocha (2015) avaliou os efeitos ionosféricos no PPP utilizando dados GNSS no Brasil, em períodos de alta e baixa atividade solar para os anos de 2010 a 2013.

Outros estudos relacionados às tempestades bem como seus impactos merecem destaque como, por exemplo, Skone (2001); Becker-Guedes et al. (2007); Rama Rao et al. (2009); Morton, Zhou e Van Graas (2009); Elmas et al. (2011); Jacobsen e Schäfer (2012); Astafyeva (2014); Cherniak e Zakharenkova (2015); Carter et al. (2016); Jacobsen e Andalsvik (2016); Nava et al. (2016); Yao et al. (2016); Horozovic, Natras e Mulic (2018), Xiaomin et al. (2018) e Cai et al. (2019).

Morton, Zhou e Van Graas (2009) analisaram os efeitos de segunda ordem da ionosfera em observáveis GPS usando medidas *Arecibo incoherent scatter radar* (ISR). Neste trabalho, é discutida também a relação entre atividades geomagnéticas e o efeito de segunda ordem. Contudo, não se discute a respeito de seus impactos no PPP e no PRE.

Elmas et al. (2011), estudaram a influência de tempestades geomagnéticas sob os efeitos HOI nas observações e no posicionamento GNSS para a região europeia. Nesse trabalho, foram analisados seus impactos no PPP para 4 estações pertencentes ao IGS. Os dados analisados são de outubro e novembro dos anos de 2001, 2003 e 2006. Concluíram que durante o período de alta atividade solar e com perturbações insignificantes no campo geomagnético em 2001, as estações de alta latitude tiveram correções com cerca de 2 a 3 mm e as estações de latitude média, cerca de 1 cm. No decorrer do período pós-pico do ciclo solar com perturbações no campo geomagnético, durante a chamada Tempestade de

Halloween em 2003, em geral as correções dos efeitos HOI tiveram magnitudes, em sua maior parte, ao nível milimétrico e poucas ao nível centimétrico. Considerando o período de baixa atividade solar com condições geomagnéticas calmas em 2006, concluíram que, sob tais condições, os resultados do PPP não mostraram diferenças significativas ao se corrigir os efeitos HOI. Além disso, concluíram que embora a observável *ionfree* possa fornecer precisão suficiente para a maioria das aplicações GNSS, os efeitos HOI precisam ser considerados para aplicações que exigem maior precisão, especialmente em períodos de alta atividade solar.

Horozovic, Natras e Mulic (2018) investigaram os efeitos de eventos climáticos espaciais severos (tempestades geomagnéticas) na estimativa de coordenadas usando o PPP, na região de latitude média (Sarajevo, Bósnia e Herzegovina) e sua relação com os efeitos HOI.

No mesmo ano, Xiaomin et al. (2018) publicaram um estudo tocante à avaliação do desempenho do posicionamento pelo PPP, utilizando dados GPS relativos a períodos de ocorrência de tempestades geomagnéticas, durante o ciclo solar 24. Neste trabalho, foi apresentado o desempenho do PPP, sob condições de tempestades moderadas, intensas e muito intensas durante o ciclo solar 24. Foi utilizado um conjunto de dados de estações IGS distribuídas pelo mundo. Concluíram que as estações com desempenho degradado (pior discrepância) estão distribuídas principalmente em regiões de alta latitude, e o nível de degradação geralmente depende da intensidade da tempestade. Neste trabalho, não foi avaliado o desempenho do posicionamento pelo PRE e não informado qual foi o modelo geomagnético utilizado na estimativa do efeito de segunda ordem da ionosfera.

Cai et al. (2019) analisaram os efeitos HOI na multi-constelação GNSS no domínio do posicionamento, durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas. Os resultados indicam que as correções dos efeitos HOI podem influenciar as soluções de posição tridimensional utilizando o PPP em um máximo de 6 mm em períodos de alta atividade solar. Em contrapartida, o efeito não excede 4 mm sob a baixa atividade solar. Concluíram que a ocorrência de tempestades geomagnéticas aumenta ainda mais os efeitos HOI a nível milimétrico.

Em alguns trabalhos acima apresentados, foi analisada a influência de tempestades geomagnéticas na ionosfera. Em outros, sua influência no posicionamento GNSS absoluto, pelo PRE ou pelo PPP. Determinados trabalhos abrangeram até mesmo análises dos efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas. Dentre todos os

estudos anteriormente citados, nota-se que a investigação da influência dos efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas e seu impacto no posicionamento GNSS vem se tornando cada vez mais assunto de interesse.

O *software* Bernese GNSS, a partir da versão 5.2 (DACH et al., 2015), tornou possível investigar e corrigir os efeitos HOI no processamento de dados GPS e GLONASS. Salienta-se que o referido *software* possui implementado em seu algoritmo, o modelo geomagnético considerado mais próximo do real, o IGRF-12.

Nenhum dos trabalhos supracitados apresentou uma análise integrada dos efeitos HOI, contemplando o ciclo 24, no PRE e PPP, incluindo dados de redes ativas das três regiões ionosféricas, eivados dos efeitos de tempestades geomagnéticas, com uso do programa científico de processamento de dados Bernese. Um grande número de estações da RBMC foi utilizado neste trabalho (mais de cem estações), já que a região brasileira se destaca pela sua extensão em área e complexidade de análise por pertencer à região equatorial, caracterizada por um alto nível de densidade de elétrons e por vários fenômenos ocorrerem nessa região e, por isso merece estudos mais aprofundados (WEBSTER, 1993).

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em investigar os efeitos HOI no ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GPS.

Dessa forma, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- i. Analisar o comportamento sazonal dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo método PPP, em períodos de alta e baixa atividade solar ao longo do ciclo solar 24, utilizando dados envolvendo os meses de janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018.
- ii. Analisar o comportamento sazonal dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo método PPP no ciclo solar 24, em diferentes regiões ionosféricas, com ênfase na região brasileira. Para tanto, utilizou-se dados de estações ativas pertencentes a RBMC, CORS e CACS, o que permitiu a obtenção de amostras nas regiões equatorial, de latitudes médias e altas latitudes.
- iii. Quantificar as médias mensais dos efeitos HOI no domínio do posicionamento, por meio de resultantes planimétricas e componentes altimétricas, além de correlacionar essas médias com o número de manchas solares e com o fluxo solar na ionosfera.
- iv. Obter e analisar os efeitos HOI no domínio das observações, discriminados em segunda e terceira ordens, durante a ocorrência da maior tempestade geomagnética ocorrida no ciclo solar 24.
- v. Analisar e comparar os impactos dos efeitos HOI no PPP e no PRE, durante a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015, determinando o “erro” devido a não consideração dos efeitos HOI, em resultantes planimétricas e componentes altimétricas (médias, mínimos e máximos).
- vi. Quantificar e comparar os efeitos HOI no domínio do posicionamento durante a tempestade ocorrida no dia 17 de março de 2015 na região brasileira, através das estações pertencentes a RBMC, frente à região norte americana, utilizando estações pertencentes as redes CORS e CACS.

3. CONTEÚDO DO TRABALHO

Visando alcançar os objetivos propostos neste trabalho, o mesmo foi estruturado em quatro tópicos, conforme segue:

INTRODUÇÃO GERAL – apresenta as considerações e motivação, contendo a importância, justificativa e contextualização do estudo dos efeitos ionosféricos de ordem superior ao longo das últimas décadas no Brasil e no mundo. O tópico também contempla os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

CAPÍTULO 1: *Efeitos de ordem superior da ionosfera durante o ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GNSS de acordo com as regiões ionosféricas* – verificar em quais épocas do ciclo solar 24 e regiões ionosféricas os efeitos HOI influenciaram de maneira mais significativa no domínio do posicionamento pelo PPP. Além disso, verificar a correlação entre os efeitos HOI, o número de manchas solares e o fluxo solar.

CAPÍTULO 2: *Efeitos de ordem superior da ionosfera durante a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 e sua influência no posicionamento GNSS no Brasil* – tem como objetivos verificar a influência dos efeitos HOI, tanto no domínio das observações quanto no domínio do posicionamento, durante a maior tempestade geomagnética ocorrida no ciclo solar 24, com ênfase na região brasileira.

CONCLUSÕES GERAIS – expõe as conclusões gerais deste trabalho, as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLETON, E.V. **Two anomalies in the ionosphere**. Nature, v.157, 691, 1946.

ASTAFYEVA, E.; YASYUKEVICH, Y.; MAKSIKOV, A.; ZHIVETIEV, I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. **Space Weather** 2014, 12, 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>.

BANVILLE, S.; SIERADZKI, R.; HOQUE, M.; WEZKA, K.; HADAS, T. (2017). On the estimation of higher-order ionospheric effects in precise point positioning. **GPS Solutions**, 21(4), 1817–1828.

BASSIRI, S.; HAJJ, GA. 1993. **Higher-order ionospheric effects on the global positioning systems observables and means of modeling them**. *Manuscr. Geod.*, 18: 280–289.

BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; ESPINOZA, E. S.; PILLAT, V. G.; LIMA, W. L. C.; BASU, SU.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MACKENZIE, E. M.; PI, W.; BITTENCOURT, J. A. The ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003. *Annales Geophysicae*, v 25. p 863-873, 2007.

CAI, C.; LIU, G.; YI, Z.; CUI, X.; KUANG, C. (2019). Effect analysis of higher-order ionospheric corrections on quad-constellation GNSS PPP. *Meas. Sci. Technol.* 30 02400.1

CARTER, B.A.; YIZENGAW, E.; PRADIPTA, R.; RETTERER, J.M.; GROVES, K.; VALLADARES, C.; CATON, R.; BRIDGWOOD, C.; NORMAN, R.; ZHANG, K. Global equatorial plasma bubble occurrence during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. Geophys. Res. A Space Phys.* 2016, 121, 894–905. <https://doi.org/10.1002/2015JA022194>.

CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: a case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. *Earth Planet Sp* 67, 151 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0316-x>.

DACH, R. S.; LUTZ, P.; WALSER, P. FRIDEZ (Eds); 2015: **Bernese GNSS Software Version 5.2**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.

DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O. (2006). Consequências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência *Boletim de Ciências Geodésicas*, sec. Artigos, Curitiba, v. 12, no 2, p.275-294, jul-dez, 2006.

DENG, L.; JIANG, W.; CHEN, H.; ZHU, Z.; ZHAO, W. (2017). Study of the effects on GPS coordinate time series caused by higher-order ionospheric corrections calculated using the DIPOLE model. *Geodesy and Geodynamics*, 8(2), 111-119.

ELMAS, Z. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G. Higher order ionospheric effects in GNSS positioning in the European region. *Ann. Geophys.*, 29, 1383–1399, DOI:10.5194/angeo-29-1383-2011, 2011.

FRITSCH, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates, *Geophysical Research Letters*, v. 32, L23311, DOI:10.29/2005GL024342, 2005.

GARCÍA-FERNÁNDEZ, M., S. D.; DESAI, M. D.; BUTALA, A. K. (2013). Evaluation of different approaches to modeling the second-order ionospheric delay on GPS measurements, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 118, doi:10.1002/2013JA019356.

HADAS, T.; KRYPIAK-GREGORCZYK, A.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; KAPŁON, J.; PAZIEWSKI, J.; WIELGOSZ, P.; GARCÍA-RIGO, A.; KAZMIERSKI, K.; SOŚNICA, K.; KWASNIAK, D.; et al. Impact and Implementation of Higher-Order Ionospheric Effects on Precise GNSS Applications. **J. Geophys. Res. Solid Earth** 2017, 122, 9420–9436

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, À.; DEFRAIGNE, P.; BERGEOT, N.; PRIETO-CERDEIRA, R.; GARCÍA-RIGO, A. (2014). Distribution and mitigation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS processing. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 119(4), 3823-3837.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J.; ORÚS, R.; SALAZAR, D. 2005. **Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning** (Summary). Barcelona, Spain. Research group of Astronomy and Geomatics – Technical University of Catalonia, 23 p.

HERNÁNDEZ-PAJARES, H. M.; JUAN, J.; SANZ, J.; ORÚS, R.: Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates, **Journal Geophys. Res.**, Vol. 112, B08417, doi:10.1029/2006JB004707, 2007.

HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning, **Radio Science**, 43, 1-15, RS5008, doi:10.1029/2007RS003817, 2008.

HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. **J Geod** (2007) 81: 259. doi:10.1007/s00190-006-0106-0.

HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. New correction approaches for mitigating ionospheric higher order effects in GNSS applications, paper presented at 25th **International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation**, Nashville TN, September 17–21, 2012.

HOROZOVIC, D.; NATRAS, R.; MULIC, M. Impact of geomagnetic storms and ionospheric disturbances on mid-latitude station's coordinates using static and kinematic PPP. **EGUGA**, p. 9009, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Rio de Janeiro, RJ .2020. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: janeiro de 2021.

JACOBSEN, K.S.; ANDALSVIK, Y.L. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK. and PPP positioning in Norway. **J. Space Weather Space Clim**. 2016, 6, A9. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016004>.

JACOBSEN, K.S.; SCHÄFER, S. Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes. **J. Space Weather Space Clim.** 2012, 2, A13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2012013>.

JIANG, W.; DENG, L.; LI, Z. (2015). High-order Ionospheric Effects on GPS Coordinate Time Series. In: **Satellite Positioning-Methods, Models and Applications. InTech.**

KEDAR, S.; HAJJ, A.; WILSON, B. D.; HEFLIN, M. B. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, **Geophys. Res. Lett.**, 30(16):1829, 2003.

KLOBUCHAR, J.A. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr., J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications.** Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

LEICK, A. **GPS satellite surveying.** 3.ed. United States: John Wiley, 2004.

LI, J.; JIN, S. (2017). High-order ionospheric effects on electron density estimation from Fengyun-3C GPS radio occultation. In: **Annales Geophysicae** (Vol. 35, No. 3, p. 403). Copernicus GmbH.

LIU, Z.; LI, Y.; GUO, J.; LI, F. (2016) Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning. **Geodesy and Geodynamics.** <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.005>.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. (2014). Análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, 20(4), 879-901.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. (2011). RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. **GPS Solutions**, 15(3), 305–314. doi:10.1007/s10291-011-0220-1.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; ROSA, G. P. S. Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil. **Rev. Bras. Geof.** Vol. 27, n 3, 2009.

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, n. 1 (2013).

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.** São Paulo: Editora Unesp, 476 p., 2008.

MORTON, Y. T.; ZHOU, Q.; VAN GRAAS, F. (2009) Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements, **Radio Sci.**, 44, RS1002, doi:10.1029/2008RS003888.

NAVA, B.; RODRÍGUEZ-ZULUAGA, J.; ALAZO-CUARTAS, K.; KASHCHEYEV, A.; MIGOYA-ORUÉ, Y.; RADICELLA, S. M.; AMORY-MAZAUDIER, C.; FLEURY, R. Middle- and low-latitude ionospheric response to 2015 St.Patrick's Day. **J. Geophys. Res. Space Phys.** 2016, 121, 3421–3438. <https://doi.org/10.1002/2015JA022299>.

PETIT, G; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6 Disponível em: <http://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#official_target>. Acesso em: maio de 2021.

PETRIE, E. J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; SPALLA, P.; MOORE, P.; KING, M. A. A review of higher order ionospheric refraction effects on dual frequency GPS, **Surv Geophys** 32 (2011) 197e253, <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-010-9105-z>.

PETRIE, E.J.; KING, M. A.; MOORE, P. D. A. Lavallée, Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities, **J Geophys Res** 115 (2010) B03417, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006677>.

QI, L.; GUO, J.; XIA, Y.; YANG, Z. Effect of Higher-Order Ionospheric Delay on Precise Orbit Determination of GRACE-FO Based on Satellite-Borne GPS Technique. In **IEEE Access**, vol. 9, pp. 29841-29849, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059296.

QU, X.; LI, Z.; AN, J.; DING, W. (2015). Characteristics of second-order residual ionospheric error in GNSS radio occultation and its impact on inversion of neutral atmospheric parameters. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 130, 159-171.

RAMA RAO, P. V. S.; GOPI KRISHNA, S.; VARA PRASAD, J.; PRASAD, S. N. V. S.; PRASAD, D. S. V. V. D.; NIRANJAN, K.: Geomagnetic storm effects on GPS based navigation, **Ann. Geophys.**, 27, 2101–2110, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2101-2009>, 2009.

ROCHA, G. D. C. **Avaliação e mitigação dos efeitos ionosféricos no posicionamento por ponto preciso GNSS no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2015.

ROSA, G. P. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para detecção, remoção e recuperação de efeitos sazonais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 1, 2010.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd. Ed., Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SKONE, S. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance. **Journal of Geodesy** 75, 457–468 (2001). <https://doi.org/10.1007/s001900100198>.

THEBAULT, E.; FINLAY, C. C.; BEGGAN, C. D.; et al. (2015) International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. **Earth, Planets and Space** (2015) 67:79 DOI 10.1186/s40623-015-0228-9

WANNINGER, L. Effects of the equatorial ionosphere on GPS. **GPS World**, v. 4, n. 7, Jul, 1993.

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

XIAOMIN, L.; SHENGFENG, GU; YIDONG, L.; CHAO, X.; BIYAN, C.; XUEYUAN, J. Assessing the Performance of GPS Precise Point Positioning Under Different Geomagnetic Storm Conditions during Solar Cycle 24. **Sensors (Basel)**. 2018 Jun; 18(6): 1784. Published online 2018 Jun 1. doi: 10.3390/s18061784.

XI, K.; WANG, X. Higher order ionospheric error correction in BDS precise orbit determination. **Advances in Space Research**, 2021, ISSN 0273-117. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.002>.

YANG, H.; YANG, X.; ZHANG, Z.; SUN, B.; QIN, W. Evaluation of the Effect of Higher-Order Ionospheric Delay on GPS Precise Point Positioning Time Transfer. **Remote Sens**. 2020, 12, 2129. <https://doi.org/10.3390/rs12132129>.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

YAO, Y.; LIU, L.; KONG, J.; ZHAI, C. Analysis of the global ionospheric disturbances of the March 2015 great storm. **J. Geophys. Res. Space Phys**. 2016, 121, 12157–12170. <https://doi.org/10.1002/2016JA023352>.

ZHANG, S.; FANG, L.; WANG, G.; LI, W. The impact of second-order ionospheric delays on the ZWD estimation with GPS and BDS measurements. **GPS Solut**. 2020, 24, 1–11.

ZHANG, Z.; GUO, F.; ZHANG, X. The Effects of Higher-Order Ionospheric Terms on GPS Tropospheric Delay and Gradient Estimates. **Remote Sens**. 2018, 10, 1561.

Capítulo 1: Efeitos de ordem superior da ionosfera durante o ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GNSS de acordo com as regiões ionosféricas

Higher-order ionospheric effects during the solar cycle 24 and its influence on GNSS positioning according to the ionospheric regions

Resumo: As variações temporais da ionosfera estão associadas a fatores que influenciam diretamente na densidade de elétrons na ionosfera e compreendem variações diurnas, sazonais, por localização geográfica e ciclos de longos períodos (ciclos de manchas solares). Nos últimos anos, os efeitos de ordem superior da ionosfera (*Higher-Order Ionospheric - HOI*), passaram a ser considerados no posicionamento de alta acurácia. Este trabalho tem o propósito de analisar o comportamento sazonal dos efeitos HOI, bem como sua influência no posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em períodos de alta e baixa atividade solar ao longo do ciclo solar 24, em diferentes regiões ionosféricas. O processamento de dados GNSS foi realizado com uso do programa científico Bernese. Na planimetria, os valores máximos para o erro alcançaram cerca de 0,004 m na região equatorial e 0,0005 m na região de altas latitudes. A região de latitudes médias apresentou valores similares aos da região equatorial diversas vezes ao longo do ciclo 24. Na altimetria, não foi possível observar um comportamento padrão do erro nas regiões equatorial e latitudes médias. A região de altas latitudes apresentou os menores valores máximos. Notou-se certo aumento dos valores do erro na altimetria (máximo 0,003 m) nos períodos de alta atividade solar. As médias mensais do erro demonstraram, na planimetria e na altimetria, uma relação direta com o número de manchas e com o fluxo solar.

Palavras-chave: Ciclo solar 24. PPP. GNSS. Ionosfera. HOI.

Abstract: The temporal variations of the ionosphere are associated with factors that directly influence the density of electrons in the ionosphere and comprise diurnal and seasonal variations, by geographic location and cycles of long periods (sunspot cycles). In recent years, higher-order ionospheric (HOI) effects, started to be considered in the positioning of high accuracy. This work aims to analyze the seasonal behavior of HOI effects, as well as its influence on the GNSS (*Global Navigation Satellite System*) positioning in periods of high and low solar activity throughout the solar cycle 24, in different ionospheric regions. The processing of GNSS data was performed using the Bernese scientific program. In planimetry, the maximum values for the error reached about 0.004 m in the equatorial region and 0.0005 m in the region of high latitudes. The region of medium latitudes presented values similar to those of the equatorial region several times during the cycle 24. At altimetry, it was not possible to observe a standard error behavior in the equatorial regions and mid latitudes. The high latitude region had the lowest maximum values. It was noted a certain increase in the altimetry error values (maximum 0.003 m) during periods of high solar activity. The monthly averages of the error showed, in planimetry and altimetry, a direct relationship with the sunspots number and with the solar flux.

Keywords: Solar Cycle 24. PPP. GNSS. Ionosphere. HOI.

1 INTRODUÇÃO

Na trajetória do sinal entre o satélite e a antena receptora, está presente o erro associado à ionosfera nas observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que por sua vez é proporcional ao conteúdo total de elétrons (*Total Electron Content* - TEC). O TEC, e consequentemente o erro devido à ionosfera, varia constantemente no tempo e no espaço em conformidade com a hora do dia (variação diurna), a época do ano (variação sazonal), a localização geográfica (regiões ionosféricas), ao ciclo de manchas solares (variação de longo período de aproximadamente 11 anos), entre outros fatores (KOMJATHY et al., 2003).

A variação da radiação solar durante o dia é o principal fator responsável pela ocorrência das variações diurnas. Dessa forma, decorrem principalmente devido à iluminação do Sol (WEBSTER, 1993). A variação sazonal ocorre durante os meses do ano em uma determinada região e pode ser explicada pela variação sazonal do ângulo zenital do Sol e também devido às mudanças intrínsecas da camada ionosférica. Valores mínimos da densidade de elétrons ocorrem, costumeiramente, nos meses próximos de solstícios de inverno e verão e valores máximos nos meses de março, abril, setembro e outubro (próximos aos equinócios). Todavia, no hemisfério Norte ocorre a anomalia sazonal de latitudes médias, onde a densidade de elétrons é menor no verão do que no inverno (McNAMARA, 1991).

Já as variações na densidade de elétrons em ciclos de longos períodos (aproximadamente 11 anos) estão associadas às ocorrências de manchas solares (*sunspots*). Dessa forma, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar, ocasionando uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. As manchas solares possuem período de duração variável, podendo durar alguns dias ou até várias rotações solares (onde cada período de rotação é de aproximadamente 27 dias) (SCHAER, 1999). Normalmente, os ciclos solares são não-simétricos e possuem a duração da transição do período mínimo para o máximo cerca de 3 a 4 anos, enquanto que em seu declínio possui duração em torno de 7 a 8 anos (LEICK, 1995; KOMJATHY, 1997).

Quanto à variação geográfica, ressalta-se que o Brasil é uma das regiões do globo terrestre que possuem os maiores valores e variações espaciais e temporais do TEC, e desta forma, a ionosfera é uma importante fonte de erro no posicionamento GNSS nesta região (KOMJATHY et al., 2003).

Nos últimos anos, os efeitos HOI, que antes eram negligenciados, passaram a ser considerados no posicionamento de alta acurácia. A partir de pesquisas realizadas ao redor do mundo, o *International Earth Rotation and Reference System* (IERS) recomenda, de acordo com o *IERS Conventions* (2010) (PETIT e LUZUM, 2010) que os centros de processamento de dados do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) apliquem as correções dos efeitos HOI.

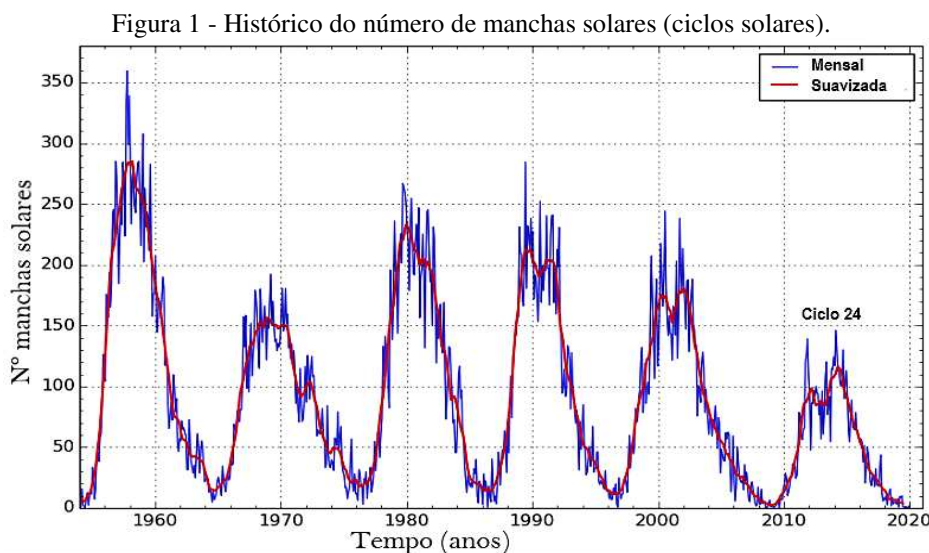
A influência da ionosfera no posicionamento GNSS tem sido o enfoque de diversos estudos realizados por pesquisadores ao redor do mundo. Dessa forma, pesquisas tem sido conduzidas nos últimos anos visando o estudo dos efeitos HOI, onde destacam-se: Kedar et al. (2003), Fritsche et al. (2005), Hoque e Jakowski (2007 e 2008), Hernández-Pajares et al. (2005 e 2007), Petrie, King e Moore (2010), Marques, Monico e Aquino (2011), Petrie et al. (2011), Hoque e Jakowski (2012), García-Fernández, Desai e Butala (2013), Hernández-Pajares et al. (2014), Jiang, Deng e Li (2015), Qu et al. (2015), Liu et al. (2016), Li e Jin (2017), Deng et al. (2017), Zhang, Guo e Zhang (2018), Zhang et al. (2020) entre outros. Neste contexto, percebeu-se a importância de estudos em busca da análise dos efeitos HOI durante o ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GNSS.

2 VARIAÇÕES TEMPORAIS DA IONOSFERA

Conforme exposto na Introdução deste capítulo, as variações temporais da ionosfera estão associadas aos principais fatores que influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera e compreendem as variações diurnas, sazonais, por localização geográfica e ciclos de longos períodos (ciclos de manchas solares).

O aumento do TEC é proporcional ao aumento do número de manchas solares, que compreendem as regiões mais escuras e frias da fotosfera solar com campos magnéticos extremamente fortes. Essas regiões são rodeadas por áreas mais brilhantes, que emitem um alto nível de radiação ultravioleta, provocando uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. Observações permitiram constatar que o aumento e a diminuição do número de manchas solares estão associados a um ciclo de aproximadamente 11 anos. (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000; HATHAWAY, 2008).

A Figura 1 ilustra o histórico dos ciclos solares (número de manchas) desde a década de 1950 até 2020. A média mensal do número de manchas solares está representada pela cor azul e as médias mensais suavizadas por 13 meses nos últimos cinco ciclos, pela cor vermelha.

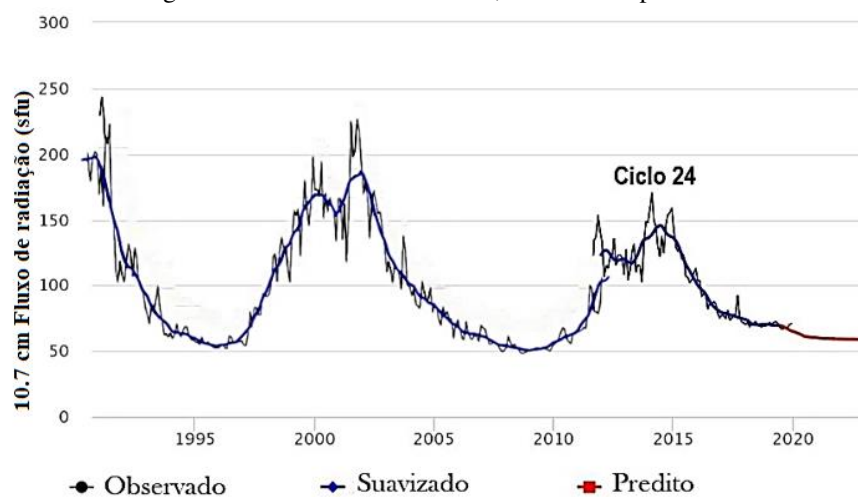


Fonte: Adaptado de SILSO (2020).

O último ciclo solar ilustrado na Figura 1 é o ciclo 24 e seu pico ocorreu no final de 2013 e início de 2014 (período de alta atividade solar). Além disso, é possível observar que o ciclo solar 24 é um dos ciclos de menor amplitude dentre os últimos ciclos apresentados. A Figura 2 ilustra o histórico do fluxo solar, em unidades de fluxo solar (*solar flux unit*– s.f.u.) desde a década de 1990 até 2020.

O ciclo 24 também pode ser visualizado através da Figura 2. A emissão de radiação solar é apresentada como proporcional à atividade das manchas solares, sendo um indicador de razoável confiabilidade do comportamento do ciclo solar.

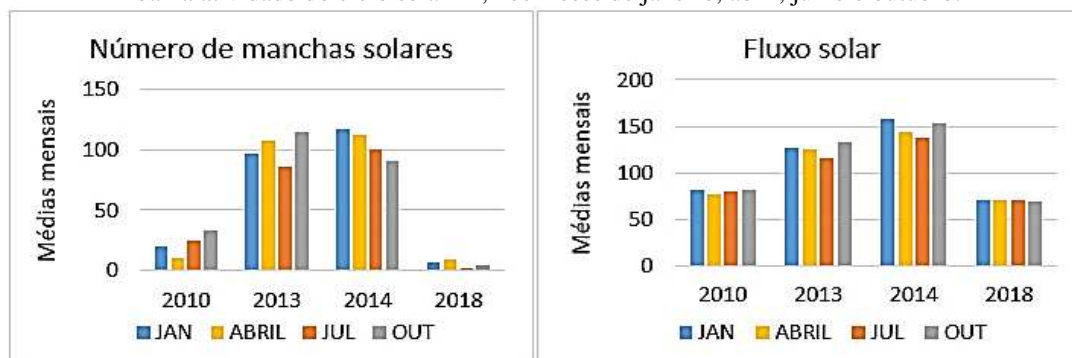
Figura 2 – Fluxo solar observado, suavizado e predito.



Fonte: Adaptado de Spaceweather (2020).

Por meio dos endereços <http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot> e <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle>, foi possível obter os valores diários e mensais do número de manchas solares e fluxo solar referentes às datas de especial interesse para a confecção deste experimento. Dessa forma, a Figura 3 ilustra os valores do número de manchas solares e fluxo solar, por meio de médias mensais.

Figura 3 - Número de manchas solares e fluxo solar, por meio de médias mensais, nos períodos de alta e baixa atividade do ciclo solar 24, nos meses de janeiro, abril, julho e outubro.



Fonte: Os autores (2021).

Dessa forma, espera-se que os efeitos causados pelas irregularidades ionosféricas sejam intensificados nos períodos de pico, devido ao aumento da atividade solar.

O principal fenômeno da ionosfera equatorial é conhecido como Anomalia Equatorial de Ionização ou Anomalia de Appleton (APPLETON, 1946). Este fenômeno se destaca por exercer grande influência nas variações temporais e espaciais do TEC na região brasileira. A anomalia equatorial de ionização tem sua origem em um fenômeno denominado efeito fonte, que ocorre na região equatorial devido à alta radiação solar e aos campos magnético e elétrico da Terra. Informações a respeito da anomalia equatorial de Ionização podem ser encontradas em Appleton (1946); Fejer et al. (1979); Batista et al. (1996), entre outros trabalhos.

Durante a ocorrência da anomalia equatorial, o pico na densidade de elétrons que ocorre na deriva vertical próximo ao pôr do Sol, conhecido como pico pré-inversão, é fortemente dependente da atividade solar. Nos períodos de alta atividade solar este pico geralmente ocorre

em todas as estações do ano, sendo maior nos equinócios e solstício de verão e menor no solstício de inverno. Entretanto, durante períodos de baixa atividade solar o pico pré-inversão é comumente percebido somente nos equinócios, ainda tendo amplitude bem menor do que no período de alta atividade solar (FEJER et al., 1979; BATISTA et al., 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como finalidade analisar os efeitos HOI nos períodos de alta e baixa atividade solar no ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GNSS, de acordo com as regiões ionosféricas.

Para realizar os experimentos deste trabalho, a base de dados escolhida foi um conjunto de estações ativas pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), à *Continuously Operating Reference Station* (CORS) e à *Canadian Active Control System* (CACS), das quais foram utilizados os arquivos de observação (24h) no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). Os arquivos são referentes às datas de janeiro (próximo ao solstício de verão), abril (próximo ao equinócio de outono), julho (próximo ao solstício de inverno) e outubro (próximo ao equinócio de primavera) dos anos de 2010, 2013, 2014 e 2018, os quais correspondem respectivamente ao início do ciclo solar 24 (baixa atividade solar), meio do ciclo (alta atividade) e fim do ciclo (baixa atividade). Ressalta-se que os meses mencionados foram relacionados aos respectivos solstícios e equinócios dados para o hemisfério Sul. Para o hemisfério Norte as estações do ano se invertem.

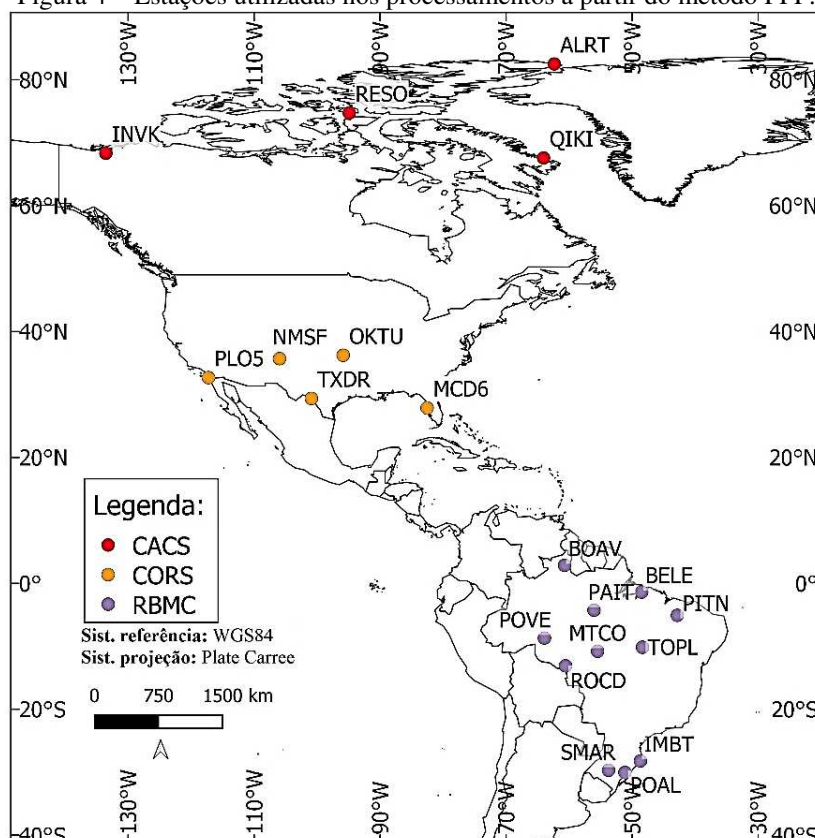
Uma breve consulta ao endereço <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>, revela que de acordo com o índice geomagnético *Disturbance Storm-Time* (Dst) não houve tempestades geomagnéticas moderadas ou intensas nas datas especificadas neste trabalho.

Cada processamento foi realizado duas vezes: uma vez corrigindo os efeitos HOI e outra vez sem realizar tal correção. As estratégias de processamento de dados GNSS foram executadas utilizando o sistema GNSS-UFV, disponível no endereço <http://gnss.ufv.br> (OLIVEIRA; DAL POZ; ALMEIDA, 2019). O GNSS-UFV utiliza o *software* Bernese GNSS, versão 5.2 (DACH et al., 2015), que por sua vez permite a realização de correções dos efeitos HOI, bem como a utilização do modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF-12) no cálculo da estimativa do efeito de segunda ordem da ionosfera. Detalhes a respeito das estratégias de processamento estão disponíveis no Apêndice.

A Figura 4 ilustra a localização das estações utilizadas no processamento de dados GPS a partir do método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), de acordo com a rede à qual pertencem.

A Tabela 1 possui as coordenadas geodésicas e geomagnéticas das estações utilizadas neste trabalho, agrupadas de acordo com a região ionosférica à qual pertencem. As coordenadas geodésicas aproximadas das estações (época 2015) foram retiradas de seus respectivos descritivos e transformadas em coordenadas geomagnéticas (IGRF), por meio do endereço <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/>. Como pode ser visto na Tabela 1, as estações utilizadas neste trabalho foram agrupadas em três regiões ionosféricas conforme sugerido por Memarzadeh (2009), sendo elas: *Polar Region* (Região Polar ou Região de Altas Latitudes - RAL), *Mid-Latitude Region* (Região de Latitudes Médias - RLM) e *Equatorial Region* (Região Equatorial - RE).

Figura 4 – Estações utilizadas nos processamentos a partir do método PPP.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 1 - Coordenadas geodésicas e geomagnéticas das estações utilizadas neste trabalho, de acordo com a região ionosférica à qual pertencem.

Regiões ionosféricas	ID	Coordenadas Geodésicas (°)		Coordenadas Geomagnéticas (°)	
		latitude	longitude	latitude	longitude
RAL	ALRT	82,483°N	62,333°W	87,16°N	152,88°E
	INVK	68,300°N	133,517°W	70,94°N	87,38°W
	RESO	74,683°N	94,883°W	82,73°N	54,01°W
	QIKI	67,550°N	64,033°W	77,22°N	14,30°E
RLM	NMSF	35,667°N	105,950°W	43,56°N	38,62°W
	OKTU	36,200°N	95,850°W	45,04°N	27,32°W
	PLO5	32,650°N	117,233°W	39,21°N	50,37°W
	TXDR	29,350°N	100,883°W	37,81°N	32,02°W
	MCD6	29,350°N	100,883°W	37,81°N	32,02°W
	SMAR	29,717°S	53,717°W	20,35°S	17,49°E
	IMBT	28,233°S	48,667°W	19,16°S	22,28°E
POAL	30,067°S	51,133°W	20,83°S	19,86°E	
RE	POVE	8,700°S	63,900°W	0,93°N	8,61°E
	ROCD	13,117°S	60,550°W	3,55°S	11,77°E
	MTCO	10,800°S	55,467°W	1,46°S	16,84°E
	TOPL	10,167°S	48,333°W	1,25°S	23,89°E
	PAIT	4,283°S	56,050°W	5,03°N	16,58°E
	PITN	5,100°S	42,800°W	3,35°N	29,74°E
	BELE	1,400°S	48,467°W	7,44°N	24,36°E
BOAV	2,833°N	60,717°W	12,29°N	12,16°E	

Fonte: Os autores (2021).

As coordenadas das estações advindas dos processamentos em que corrigiu-se os efeitos

HOI foram comparadas às coordenadas advindas dos processamentos sem tais correções. Estas diferenças foram referidas como os ‘erros’ devido a não consideração dos efeitos de 2ª e 3ª ordens da ionosfera, conforme sugerido por Marques et al. (2009), ou definidas como “erro” devido a não correção dos efeitos de ordem superior da ionosfera, de acordo com Marques, Monico e Aquino (2014). Dessa forma, a partir do ‘erro’, realizou-se a análise dos resultados em resultantes planimétricas e componentes altimétricas. A rotina para a obtenção dos resultados do erro pode ser verificada no Apêndice.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

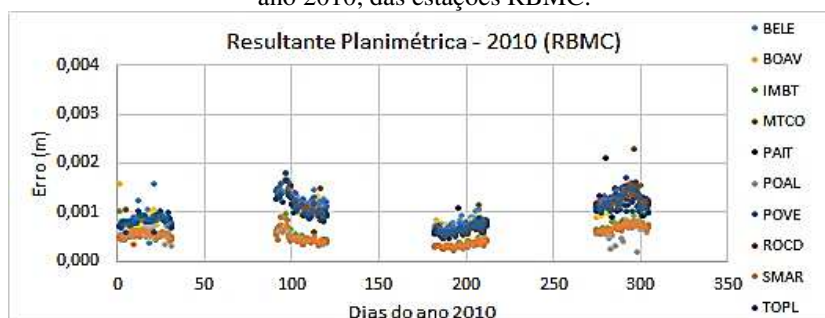
Serão apresentadas análises mensais, sazonais, ao longo do ciclo solar 24 e por regiões ionosféricas, a partir dos resultados advindos de processamentos de dados das estações pertencentes às redes RBMC, CORS e CACS.

Como as estações do ano se invertem nos hemisférios Norte e Sul, para facilitar o entendimento do leitor, a análise sazonal foi dividida em dois tópicos (4.1 e 4.2), onde o primeiro se refere às estações do hemisfério Sul e o segundo ao hemisfério Norte. Dessa forma, o tópico 4.1 abrange as estações pertencentes à RBMC, o que permitiu analisar singularmente a região brasileira. O tópico 4.2 compreende as estações pertencentes às redes CORS e CACS. Suplementando as observações sazonais, transcorreu-se ainda nestes dois tópicos a análise dos resultados ao longo do ciclo 24.

4.1 Análise sazonal e ao longo do ciclo 24 das estações do hemisfério Sul

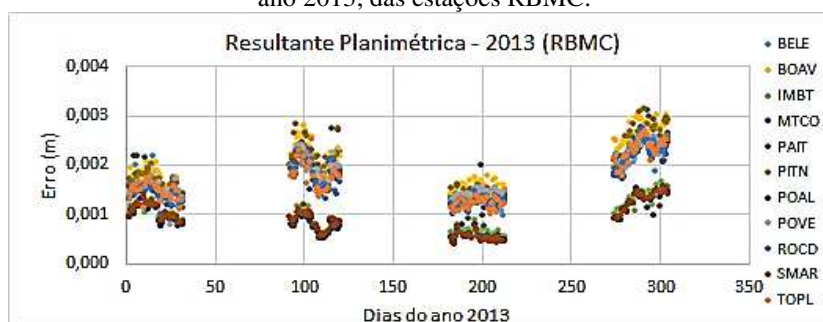
Os gráficos das Figuras 5 a 8 a seguir ilustram, em resultantes planimétricas, valores diários para o erro devido a não consideração dos efeitos HOI durante os meses de janeiro, abril, julho e outubro, referentes aos anos 2010, 2013, 2014 e 2018. Os dados se referem aos processamentos das estações localizadas no hemisfério Sul (estações pertencentes à RBMC).

Figura 5 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações RBMC.



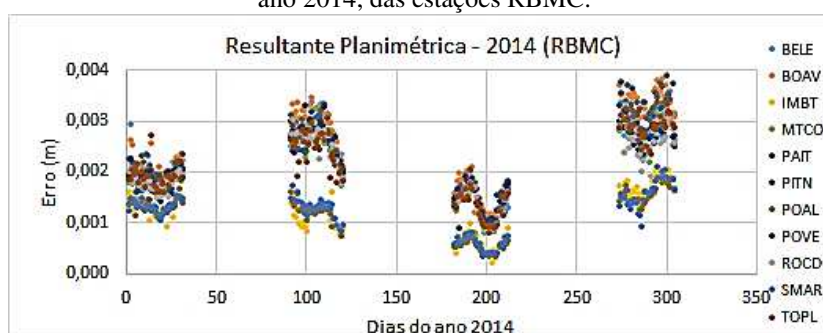
Fonte: Os autores (2021).

Figura 6 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações RBMC.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 7 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações RBMC.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 8 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações RBMC.



Fonte: Os autores (2021).

Como pode ser visto através das Figuras 5 a 8, os valores do erro encontrados na planimetria para os anos de 2013 e 2014 (alta atividade solar) estão em sua maior parte mais elevados e evidenciam mais a variação sazonal se comparados aos valores obtidos para os anos 2010 e 2018 (baixa atividade solar). Em outubro de 2014 os valores alcançaram cerca 0,004m. Em contrapartida, para o mesmo mês do ano 2018, os valores máximos encontrados estão em torno de 0,001m, ou seja, a maioria dos resultados encontra-se a nível sub milimétrico.

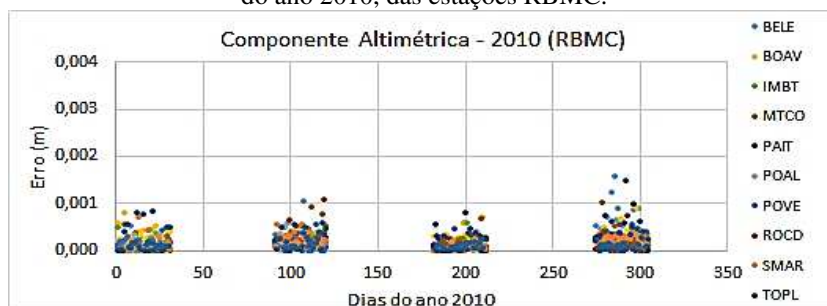
Nota-se que em todos os anos observados, os meses de abril e outubro (próximo aos equinócios de outono e primavera) possuem valores de erro alguns milímetros mais elevados, seguido do mês de janeiro (próximo ao solstício de verão). Dessa forma, os menores valores obtidos em geral foram para o mês de julho (próximo ao solstício de inverno). Baseado nas análises realizadas, pode-se notar que os efeitos HOI são mais intensos em resultantes

planimétricas, principalmente em períodos de irregularidades e anomalias (que coincidem com ocorrência de bolhas ionosféricas) e do segundo pico da anomalia equatorial (fazendo com que aumente a ocorrência de cintilação) o qual é acentuado no período de máxima atividade solar. Já no período de mínima atividade solar, como os valores do TEC são diminuídos consideravelmente, bem como a intensidade da anomalia equatorial, os efeitos ionosféricos são consideravelmente reduzidos.

Ao observar as Figuras 5 a 8, também é possível notar que três estações localizadas mais ao sul do Brasil se destacam por “sentirem” menos o HOI. São elas: POAL, IMBT e SMAR. Essas estações estão na zona de fronteira das regiões ionosféricas, de acordo com a divisão sugerida por Memarzadeh (2009). À vista disso, esta análise será realizada no tópico 4.3.

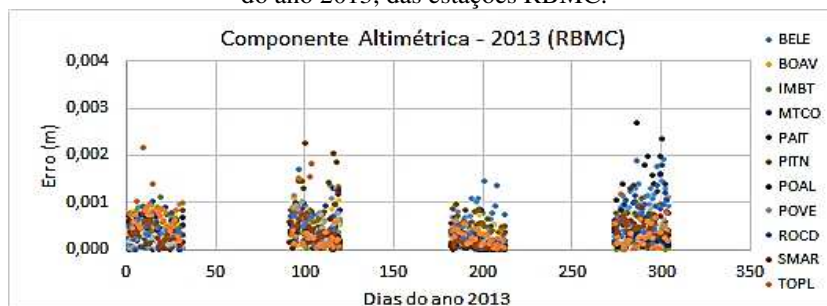
Analogamente às Figuras 5 a 8 apresentadas, tem-se os gráficos referentes ao erro em componentes altimétricas, conforme ilustram as Figuras 9 a 12.

Figura 9 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações RBMC.



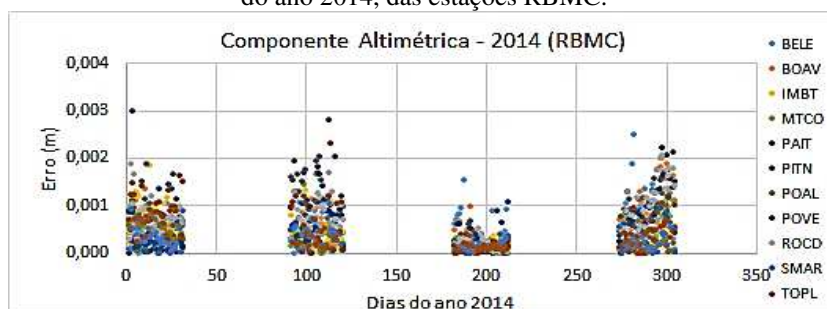
Fonte: Os autores (2021).

Figura 10 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações RBMC.



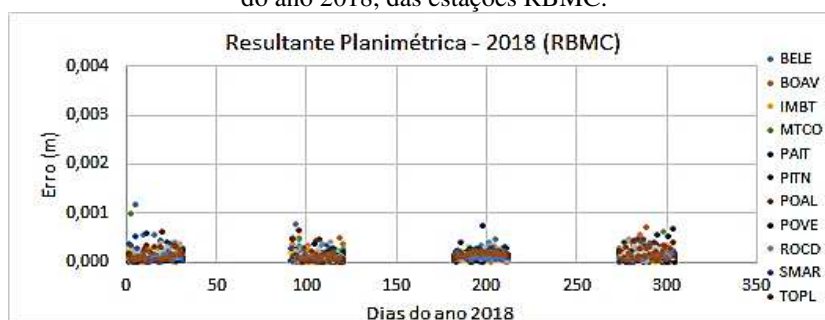
Fonte: Os autores (2021).

Figura 11 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações RBMC.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 12 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações RBMC.



Fonte: Os autores (2021).

De acordo com as Figuras 9 a 12, similarmente aos valores do erro encontrados na planimetria, na altimetria os anos de 2013 e 2014 estão em geral mais elevados se comparados aos valores obtidos para os anos 2010 e 2018. Contudo, os valores do erro na planimetria encontram-se na maior parte dos casos mais elevados do que na altimetria. Para os anos analisados, pode-se observar que o mês de julho apresentou os menores valores de erro em geral. Os valores observados mais elevados na altimetria estão entre 0,002m e 0,003m (2013 e 2014). Em 2010 e 2018, a maioria dos resultados observados encontram-se abaixo de 0,001m, com exceção dos meses de outubro de 2010 e janeiro de 2018, os quais apresentaram alguns valores entre 0,001 m e 0,002m.

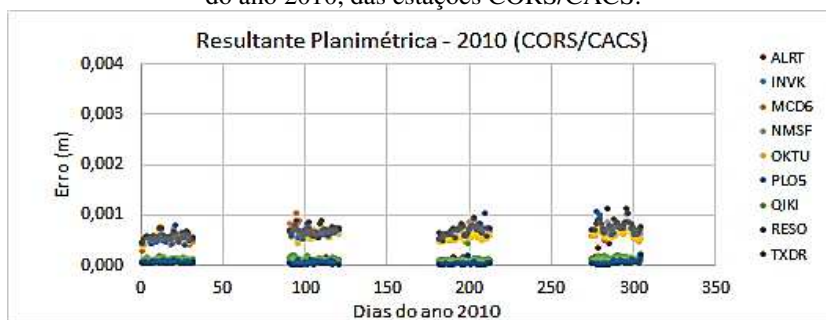
É interessante destacar que em períodos de mínima atividade solar, mais especificamente no período de declínio (2018) os efeitos são negligenciáveis. Como pode ser visto na Figura 12, somente 1 caso apresentou valor acima de 0,001 m para o erro na altimetria no ano 2018. No período de mínima atividade solar, a produção de elétrons diminui assim como os efeitos de irregularidades da ionosfera são minimizados, com isso, não se percebe a variação sazonal dos efeitos ionosféricos nos resultados de forma significativa (valores sub-milimétricos).

Verifica-se, diante do exposto, que em períodos de mínima atividade solar, principalmente no caso da altimetria, não é notada a variação sazonal. No caso da planimetria, nota-se a sazonalidade de forma mais “acentuada” em períodos de máxima atividade solar. Além disso, ao observar o erro em função do ciclo solar analisado, fica evidente que tanto na planimetria quanto na altimetria, são mais acentuados (com máximo atingindo 0,004 m) nos períodos de máxima atividade solar (em períodos de irregularidades e anomalias).

4.2 Análise sazonal e ao longo do ciclo 24 das estações do hemisfério Norte

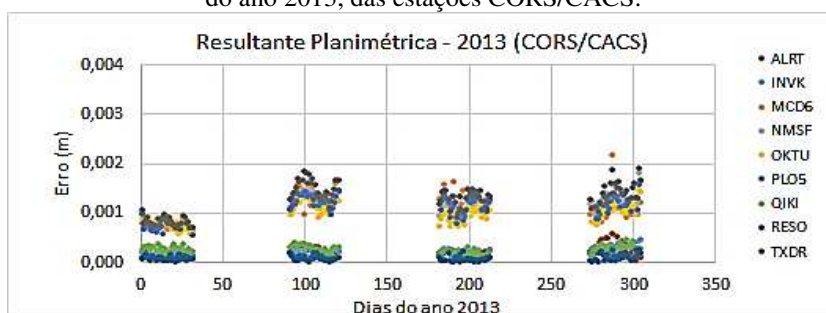
Similarmente aos resultados apresentados no tópico 4.1, serão apresentados os gráficos das Figuras 13 a 20 que por sua vez, ilustram os valores encontrados para o erro em resultantes planimétricas e componentes altimétricas, dessa vez a partir dos processamentos das estações pertencentes as redes CORS e CACS, compreendendo o hemisfério Norte.

Figura 13 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações CORS/CACS.



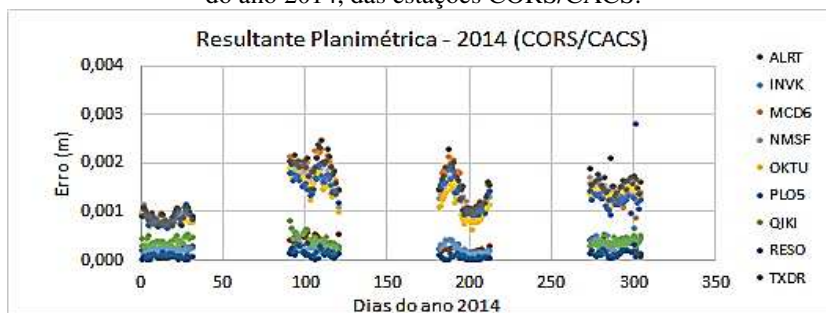
Fonte: Os autores (2021).

Figura 14 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações CORS/CACS.



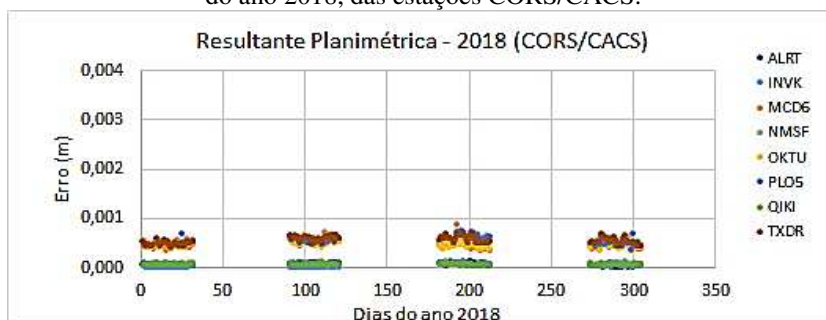
Fonte: Os autores (2021).

Figura 15 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações CORS/CACS.



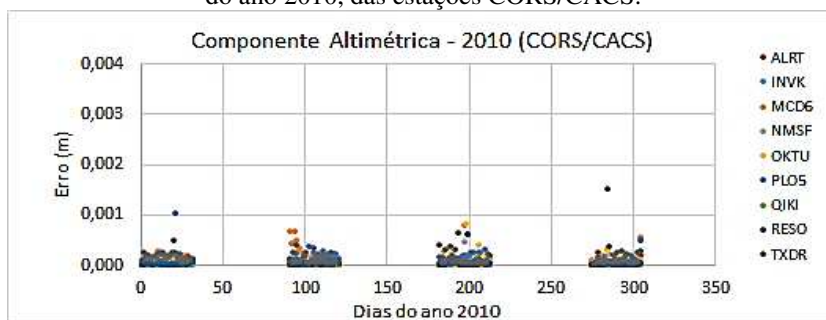
Fonte: Os autores (2021).

Figura 16 – Valores diários das resultantes planimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações CORS/CACS.



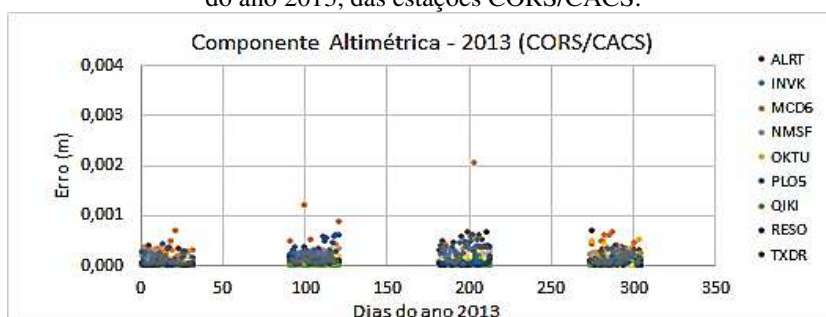
Fonte: Os autores (2021).

Figura 17 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2010, das estações CORS/CACS.



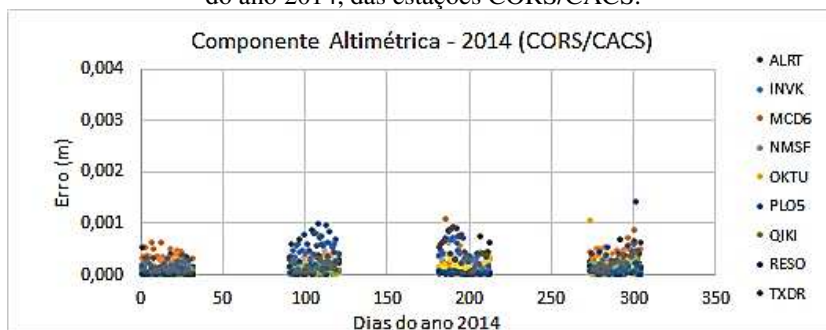
Fonte: Os autores (2021).

Figura 18 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2013, das estações CORS/CACS.



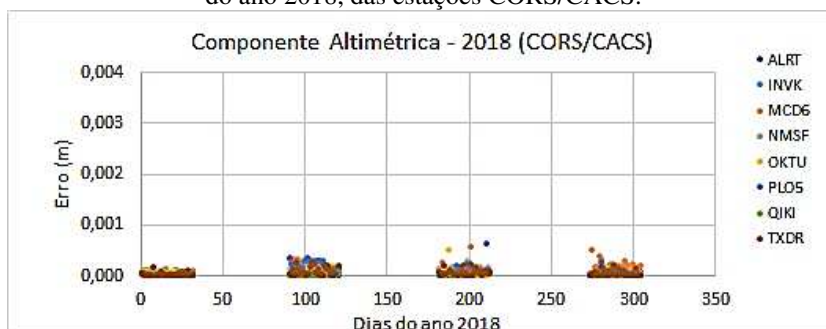
Fonte: Os autores (2021).

Figura 19 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2014, das estações CORS/CACS.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 20 – Valores diários das componentes altimétricas para os meses de janeiro, abril, julho e outubro do ano 2018, das estações CORS/CACS.



Fonte: Os autores (2021).

Novamente pode ser percebido que nos períodos de alta atividade solar (Figuras 13, 16, 17 e 20) os valores encontrados para o erro, em geral, são poucos milímetros mais elevados do que os valores obtidos nos períodos de baixa atividade solar (Figuras 14, 15, 18 e 19), na altimetria e mais acentuadamente na planimetria.

Assim como os resultados observados para as estações do hemisfério Sul, nota-se que os valores obtidos para as estações do hemisfério Norte na altimetria são em geral menores que os encontrados na planimetria. É interessante notar que na altimetria, a maioria dos resultados obtidos é menor que 0,001m. Contudo, os resultados obtidos para as estações do hemisfério Sul estão mais elevados se comparados aos obtidos para as estações do hemisfério Norte.

O período de declínio do ciclo (2018) se destaca assim como notado na análise das estações do hemisfério Sul. Desta vez, o erro na planimetria (Figura 16) tem seus valores máximos abaixo 0,001m, ou seja, estão a nível sub milimétrico. Na altimetria (Figura 20) os resultados são ainda menores, com apenas 3 casos acima de 0,0005m, ou seja, quase todos os resultados foram menores do que meio milímetro. Portanto, constata-se que em períodos de mínima atividade solar, na planimetria e altimetria, não é notada variação sazonal.

Para o período de máxima atividade solar, o mês de janeiro (próximo ao solstício de inverno) destaca-se na planimetria por apresentar valores de erros pouco menores que os valores observados nos demais meses. Portanto, nota-se pouca sazonalidade em períodos de máxima atividade solar na planimetria (diferenças em torno de 0,001m entre os resultados máximos).

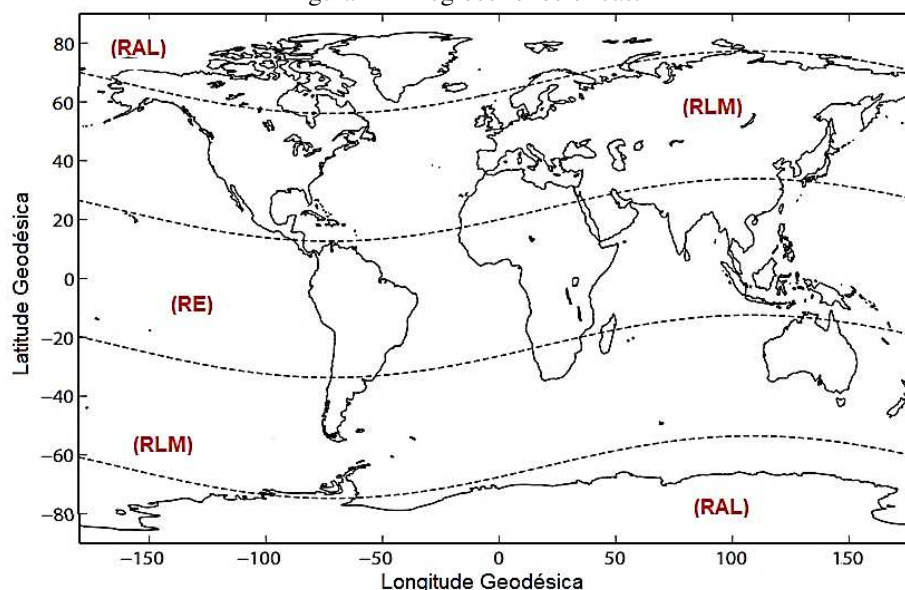
Ao longo do ciclo solar, verifica-se que os valores do erro são maiores, a nível milimétrico, nos períodos de máxima atividade solar, na altimetria e mais acentuadamente na planimetria (máximos em torno de 0,003 m).

Ao observar os resultados do ciclo solar em resultantes planimétricas (Figuras 13 a 16), pode ser percebida uma divisão dos resultados, aglomerados em grupos. Neste caso, um conjunto de estações se destaca por “sentirem” menos o HOI. Essas estações pertencem à rede CACS e estão localizadas na região de latitudes altas, de acordo com Memarzadeh (2009). A análise dessa divisão será feita no tópico 4.3, que trata dos resultados de acordo com as regiões ionosféricas.

4.3 Resultados e análises por regiões ionosféricas

Os resultados apresentados nos tópicos 4.1 e 4.2 estão novamente apresentados no presente tópico, onde estão reagrupados em regiões ionosféricas. A Figura 21 ilustra as três regiões ionosféricas, onde estão plotadas as linhas paralelas geomagnéticas no referencial geodésico.

Figura 21 - Regiões Ionosféricas.



Fonte: Adaptada de Memarzadeh (2009).

A ionosfera pode ser dividida em três regiões, que têm propriedades e características bastante diferentes de acordo com suas latitudes geomagnéticas, sendo elas: RE, RLM e RAL (Figura 21). A RE abrange cerca de 20° ao norte e ao sul do equador geomagnético. As RLM são limitadas, aproximadamente, pelas latitudes geomagnéticas entre 20° e 60°, nos dois hemisférios. As RAL são divididas em duas sub-regiões: *Auroral Zone* (Zona Auroral - com latitudes geomagnéticas entre 60° e 70° aproximadamente) e *Polar Cap* (Capa Polar, pólo da zona auroral – acima de 70°) (MEMARZADEH, 2009). Baseado nisso tem-se, portanto, a divisão das estações utilizadas nesta pesquisa, por regiões ionosféricas (ver Tabela 1).

De acordo com a Figura 21 é possível observar que grande parte da região brasileira pertence à RE, contudo, ao Sul do Brasil tem-se a região de fronteira entre a RE e RLM. Nessa região de fronteira, as estações RBMC observam sinais de satélites que atravessam as duas regiões mencionadas, podendo suavizar o HOI no posicionamento, como foi o caso dos resultados das estações POAL, IMBT e SMAR, que apresentaram um comportamento diferente das demais estações RBMC (ver tópico 4.1). Por esse motivo, nas análises do presente tópico, as referidas estações estão inseridas ao conjunto de estações pertencentes à RLM. Considerando o exposto, é oportuno ressaltar que o fato do Brasil possuir uma faixa de transição entre regiões ionosféricas reforça a complexidade de análise de efeitos ionosféricos considerando o país como um todo.

Os resultados, agrupados em regiões ionosféricas, estão ilustrados pelas Figuras 22 a 25 (erro em resultantes planimétricas) e 26 a 29 (erro em componentes altimétricas). Dessa forma, nesta pesquisa a RE contém apenas estações pertencentes à RBMC. Já a RLM possui estações da RBMC e CORS. A RAL contém as estações pertencentes à CACS, especificamente compreendidas na Capa Polar.

Figura 22 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2010, agrupados em regiões ionosféricas.

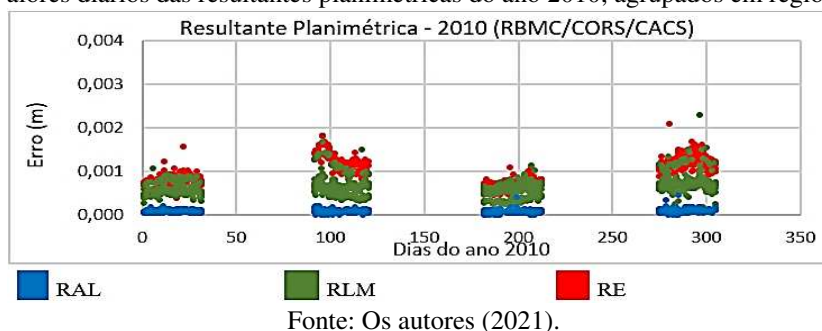


Figura 23 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2013, agrupados em regiões ionosféricas.

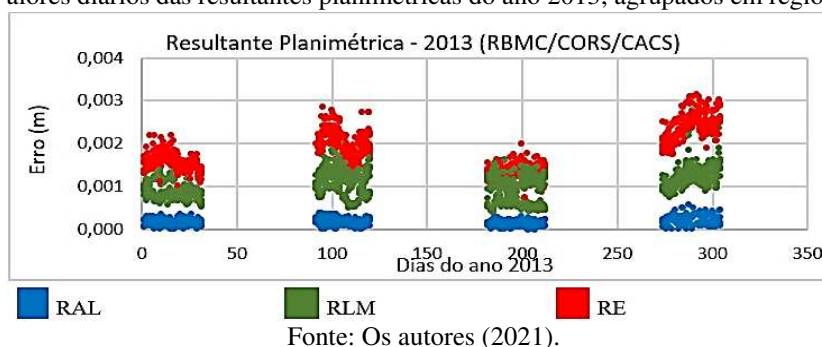


Figura 24 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2014, agrupados em regiões ionosféricas.

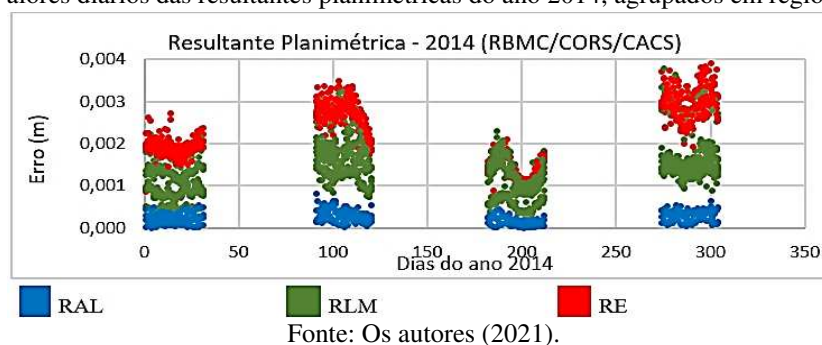
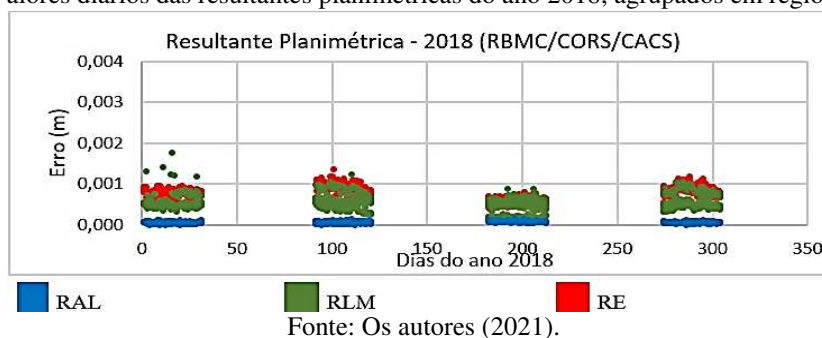


Figura 25 – Valores diários das resultantes planimétricas do ano 2018, agrupados em regiões ionosféricas.



Conforme ilustram as Figuras 22 a 25, nota-se a divisão dos resultados, agrupados por regiões ionosféricas. As estações que compõem a RAL (representadas pela cor azul) se agrupam constituindo nos menores valores obtidos para o erro na planimetria (próximos a zero nos períodos de mínima atividade e erros máximos em torno de 0,0005m nos períodos de máxima atividade). Em contrapartida, os valores que representam a RE (representadas pela cor vermelha) constituem

os maiores resultados para o erro (alcançando cerca de 0,004m em no equinócio de primavera do ano 2014). Em períodos de alta atividade, é possível identificar efeito sazonal para a RE (da ordem de milímetros). Além disso, em alguns momentos a RE e a RLM (cor verde) se fundem, como por exemplo, no mês de julho.

No período de alta atividade solar do ciclo 24 (2013 e 2014) a divisão dos resultados por regiões ionosféricas fica mais evidente, com exceção do mês de julho, onde as RE e RLM apresentam semelhança em parte de seus resultados. Essa semelhança pode ser também percebida nos períodos de baixa atividade (2010 e 2018) nos meses analisados. Os valores observados para as RAL apresentam determinada constância, variando sutilmente ao longo do ciclo solar, o que não ocorre com as demais regiões, que aparentemente apresentam um aumento mais visível do valor do erro no período de alta atividade solar (maior amplitude ao longo do ciclo), como ilustrado nas Figuras 22 a 25.

O comportamento do erro em resultantes planimétricas (Figuras 22 a 25) diverge do comportamento em componentes altimétricas, como ilustram as Figuras 26 a 29.

Conforme observado através das Figuras 26 a 29, as RAL apresentam certa semelhança no comportamento dos resultados na planimetria e na altimetria ao longo das datas do ciclo solar 24 observadas, apresentando os menores resultados para o erro, comparados as demais regiões ionosféricas. Contudo, nas RE e RLM, não se pode notar um comportamento padrão do erro (Figuras 26 a 29).

Figura 26 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2010, agrupados em regiões ionosféricas.

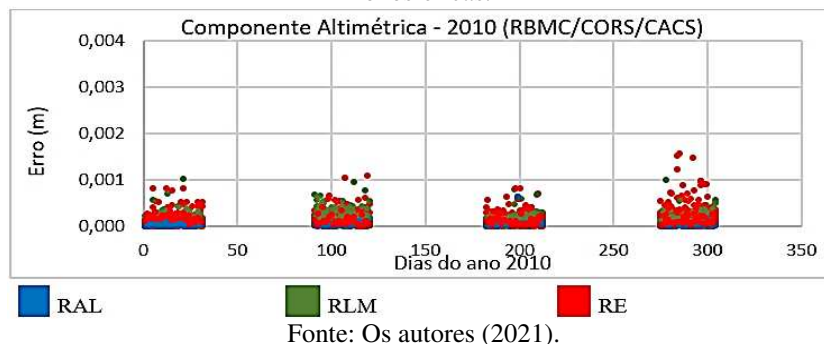


Figura 27 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2013, agrupados em regiões ionosféricas.

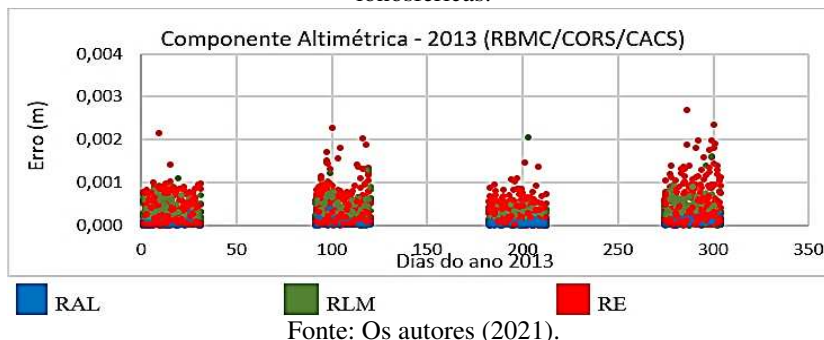


Figura 28 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2014, agrupados em regiões ionosféricas.

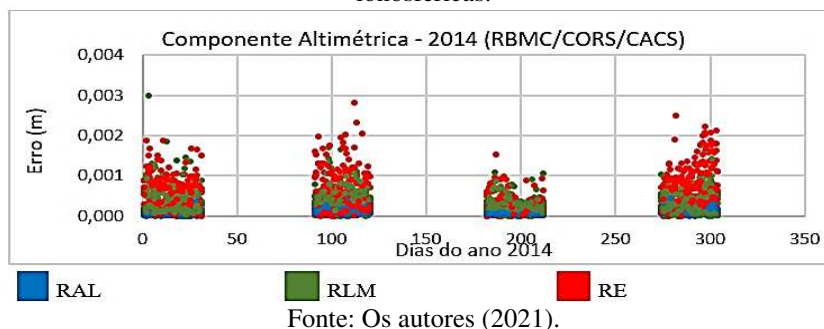
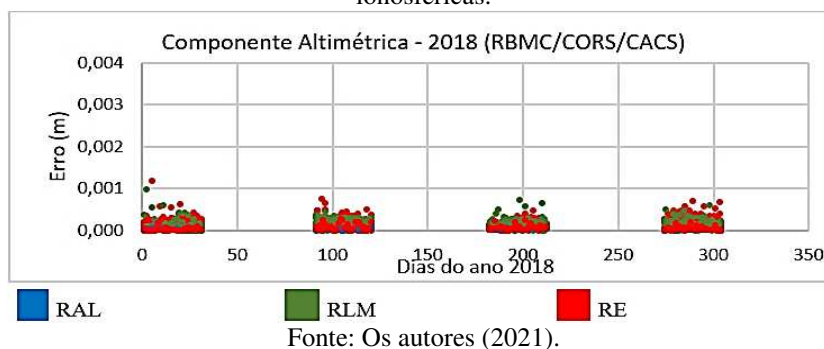


Figura 29 – Valores diários das componentes altimétricas do ano 2018, agrupados em regiões ionosféricas.



É interessante observar certo aumento dos valores do erro na altimetria nos períodos de alta atividade solar (2013 e 2014) em relação aos períodos de baixa atividade (2010 e 2018). Ainda assim, nota-se que os resultados obtidos para o erro na altimetria se apresentam em geral menores que os valores obtidos na planimetria.

As Figuras 30 a 35 apresentam as médias mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI por meio de resultantes planimétricas (Figuras 30 a 32) e componentes altimétricas (Figuras 33 a 35), classificados por regiões ionosféricas.

Figura 30 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de altas latitudes.

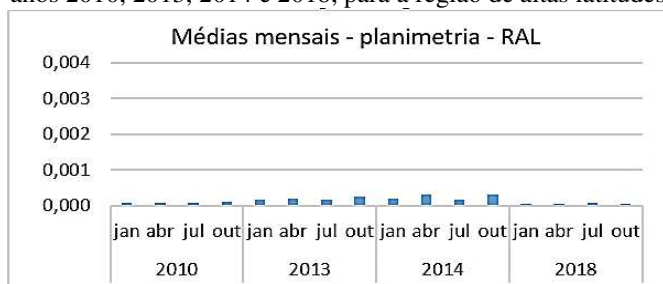
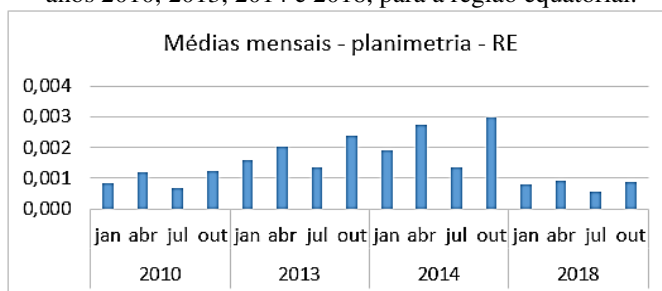


Figura 31 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de latitudes médias.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 32 – Médias mensais das resultantes planimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região equatorial.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 33 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de altas latitudes.



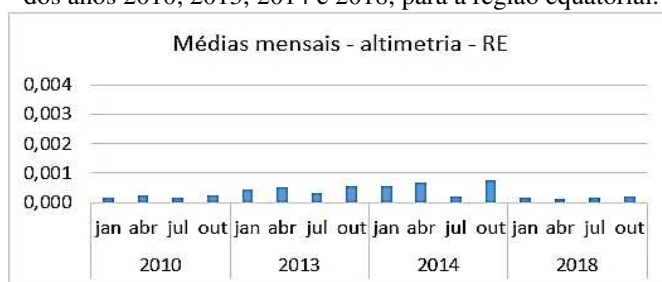
Fonte: Os autores (2021).

Figura 34 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região de latitudes médias.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 35 – Médias mensais das componentes altimétricas para os meses janeiro, abril, julho e outubro dos anos 2010, 2013, 2014 e 2018, para a região equatorial.



Fonte: Os autores (2021).

Nos períodos de mínima atividade solar (2010 e 2018) nota-se que as médias mensais ocorrem com amplitude menor do que para alta atividade solar (2013 e 2014), como pode ser visto nas Figuras 30 a 35. Além disso, pode-se perceber que os valores de médias em resultantes planimétricas apresentam-se alguns milímetros mais elevados do que em componentes altimétricas, nos períodos de máxima atividade solar.

Comparando as médias em resultantes planimétricas agrupadas por regiões ionosféricas, nota-se que a RE apresenta os maiores valores de médias mensais (alcançando 0,003 m em outubro de 2014), seguida da RLM (com média em torno de 0,0015 m em abril de 2014). Por último, as menores médias observadas são para a RAL, onde os valores observados estão próximos a zero. Em componentes altimétricas também pode ser percebida a mesma ordem de relevância das médias por regiões, embora nenhum valor observado alcançou 0,001m.

Além das médias mensais do erro por regiões ionosféricas, os valores máximos e mínimos do erro também podem ser verificados por meio do Apêndice.

A Tabela 2 ilustra os coeficientes de correlação de postos de Spearman, obtidos entre as médias mensais do erro (em resultantes planimétricas e componentes altimétricas) para todas as estações em cada região e as médias mensais do número de manchas solares bem como do fluxo solar, anteriormente apresentados na Figura 3. O coeficiente de Spearman é apropriado tanto para variáveis contínuas, como para variáveis discretas, incluindo variáveis ordinais (SPEARMAN, 1904; LEHMAN et al., 2013). Os coeficientes de correlação foram calculados com código *python* utilizando a função “spearmanr”, da biblioteca “scipy”. Informações adicionais podem ser adquiridas através do endereço <https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.stats.spearmanr.html>.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação entre as médias mensais do erro e as médias mensais do número de manchas solares e do fluxo solar, agrupados por regiões ionosféricas.

	RAL	RLM	RE
Planimetria x Mancha:	93,6%	92,6%	86,4%
Altimetria x Mancha:	74,0%	89,0%	85,7%
Planimetria x Fluxo:	91,5%	91,2%	84,7%
Altimetria x Fluxo:	72,6%	89,1%	82,6%

Fonte: Os autores (2021).

Analisando a Tabela 2, observa-se uma associação positiva e forte entre as variáveis correlacionadas. Todos os resultados obtidos apresentaram correlação com valor maior que 70%. Para as três regiões analisadas, a correlação das manchas e do fluxo com as médias em resultantes planimétricas é um pouco maior do que com as médias em componentes altimétricas.

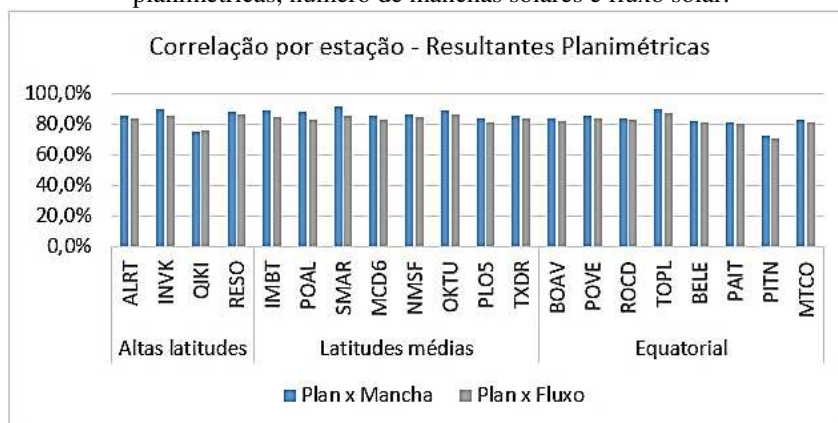
Pode-se notar que a RAL apresenta os maiores valores de correlação das médias em

resultantes planimétricas (93,6 e 91,5%) em relação as demais regiões, ao passo que apresenta os menores coeficientes de correlação em componentes altimétricas (74 e 72,6%). A região que apresentou os maiores valores de correlação em relação a altimetria foi a RLM (89 e 90,1%). Já a RE apresentou os menores valores de correlação na planimetria (86,4 e 84,7%). Deve-se ressaltar que as três regiões analisadas apresentam características diferentes entre si. Contudo, na RE, a ionosfera apresenta características particulares, tais como a anomalia equatorial, a ocorrência de bolhas ionosféricas, anomalia do atlântico sul, entre outras irregularidades, que devem ser consideradas para a modelagem e correção adequada de seus efeitos no posicionamento GNSS.

4.3.1 CORRELAÇÃO ENTRE MÉDIAS MENSAS POR ESTAÇÃO, N° DE MANCHAS SOLARES E FLUXO SOLAR

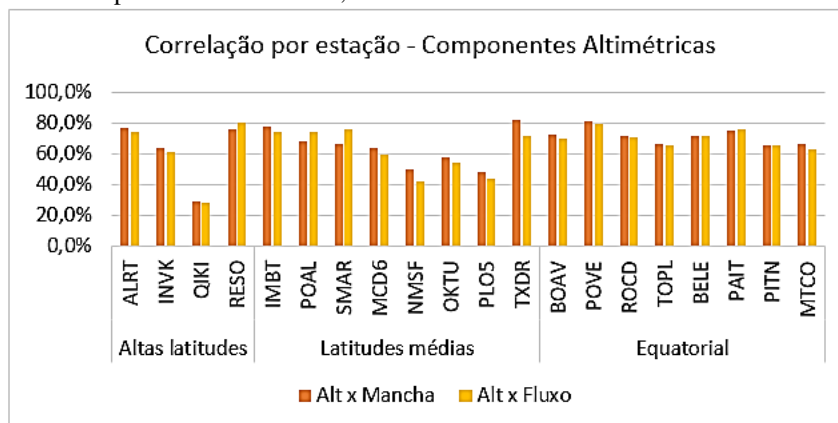
As Figuras 36 e 37 ilustram os coeficientes de correlação de postos de Spearman, obtidos entre as médias mensais do erro em resultantes planimétricas e componentes altimétricas, calculados para cada estação, e as médias mensais do número de manchas solares tal como do fluxo solar. Estes mesmos valores encontram-se disponíveis por meio de tabelas, no Apêndice.

Figura 36 – Coeficientes de correlação para cada estação, entre as médias mensais do erro em resultantes planimétricas, número de manchas solares e fluxo solar.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 37 – Coeficientes de correlação para cada estação, entre as médias mensais do erro em componentes altimétricas, número de manchas solares e fluxo solar.



Fonte: Os autores (2021).

De acordo com a Figura 36, pode-se notar que há uma associação positiva e forte entre as variáveis do erro em resultantes planimétricas em relação às variáveis ‘número de manchas solares’ e ‘fluxo solar’ para as estações analisadas. A menor correlação obtida foi para a estação PITN (RE), com valor de 70%. Em geral, o erro em resultantes planimétricas apresentou-se mais correlacionado com o número de manchas do que com o fluxo solar para a maioria das estações analisadas. Em relação as correlações do erro em componentes altimétricas (Figura 37), três estações apresentaram valores abaixo de 50%. São elas: PLO5, NMSF (RLM) e QIKI (RAL).

A partir da análise das correlações apresentadas, pode-se constatar que o erro devido a não consideração dos efeitos HOI está fortemente correlacionado tanto com o número de manchas solares quanto com o fluxo solar. Enfatiza-se que o coeficiente de correlação difere para cada estação.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, notou-se que os valores do erro (na planimetria e na altimetria) para os anos de 2013 e 2014 (alta atividade solar) estão, em sua maior parte, alguns milímetros mais elevados se comparados aos valores obtidos para os anos 2010 e 2018 (baixa atividade solar), seja para as estações pertencentes a RBMC seja para CORS e CACS.

No período de alta atividade solar do ciclo 24 (2013 e 2014), observou-se o agrupamento dos resultados da planimetria por regiões ionosféricas. Os valores do erro obtidos na planimetria para a RAL se agruparam, constituindo nos menores resultados (máximos em torno de 0,0005m), ao passo que a RE constitui os maiores resultados para o erro (alcançando cerca de 0,004m). Esta última região, em alguns momentos funde seus resultados aos da RLM.

Contudo, para os resultados da altimetria, nas RE e RLM não foi possível observar um comportamento padrão do erro, ou seja, apresentou um comportamento irregular para o erro. Contudo, nota-se certo aumento dos valores de erro na altimetria nos períodos de alta atividade solar em relação aos períodos de baixa atividade. Ainda assim, os valores obtidos para o erro na altimetria se apresentam em geral menores que os valores obtidos na planimetria, o que também pode ser verificado em Liu et al. (2016). Nesse trabalho, os autores encontraram maiores efeitos na componente norte, inclusive maiores do que na componente vertical. Além disso, mostraram que o impacto foi mais visível na direção norte, mostrando uma tendência direcional no sentido norte-sul, especialmente nas latitudes mais baixas, onde o valor do efeito é provavelmente maior do que 3 mm.

No que concerne às médias em resultantes planimétricas agrupadas por regiões ionosféricas, a RE apresenta valores de médias mensais alcançando 0,003 m. Além disso, para esta região, deve ser considerada a influência da Anomalia Equatorial sobre os resultados, sobretudo no período de máxima atividade solar. Na RLM, as médias máximas ficaram em torno de 0,0015 m. Por último, as menores médias observadas foram para a RAL, com valores próximos a zero. Em componentes altimétricas, também pode ser percebida a mesma ordem de relevância das médias por regiões, apesar de nenhum valor observado ter atingido 0,001m.

A partir das análises de correlações por médias mensais, constatou-se que o erro devido a não consideração dos efeitos HOI está fortemente correlacionado com o número de manchas solares bem como com o fluxo solar. Além disso, o coeficiente de correlação varia para cada estação assim como por região ionosférica. A RAL apresenta os maiores valores de correlação das médias em resultantes planimétricas em relação as demais regiões, apesar da RAL ter sofrido menos aos efeitos HOI no domínio do posicionamento. A região que apresentou os maiores

valores de correlação em relação a altimetria foi a RLM.

Foi possível verificar que os resultados para a RAL (na região da Capa Polar) ficaram muito próximos a zero no ciclo analisado, o que permitiu inferir que esta região não foi afetada pelos efeitos HOI no posicionamento pelo PPP. Além disso, deve-se também atentar ao fato da RLM ter alcançado valores máximos para o erro bastante similares aos obtidos para a RE em diversos momentos. Essas observações podem estar associadas às ponderações apresentadas por Kashcheyev, Nava e Radicella (2012), que mostraram que os efeitos HOI no domínio das observações podem atingir até 5 cm nas RE e RLM; no entanto, em RAL, dificilmente excedem os milímetros (até 1 cm). Assim, concluíram que os efeitos HOI de alcance de nível centimétrico podem causar erros milimétricos no posicionamento.

Para compreender e interpretar os valores para o erro obtidos nesta pesquisa, deve-se levar em consideração alguns fatores que podem ter influenciado nos resultados, a começar pela interferência de anomalias, que normalmente afetam os efeitos ionosféricos nas aplicações GNSS. Além disso, outros fatores podem ter sido determinantes, tal como o ciclo solar escolhido e o método de posicionamento utilizado.

É proveitoso enfatizar que o ciclo solar analisado foi o de menor amplitude dentre os últimos (conforme visto na Figura 1), e isso pode ter contribuído para a atenuação dos resultados máximos obtidos para o erro (sendo seu valor máximo em torno de 0,004 m na RE), se comparados aos valores máximos para o ciclo anterior, observados em trabalhos anteriormente citados, como por exemplo em Elmas et al. (2011). Neste estudo, os efeitos foram notados no período de máxima atividade do ciclo 23 e chegou a atingir cerca de 2 a 3 mm na RAL e 1 cm na RLM. Embasado nisso, os autores concluíram que embora a observável *ionfree* possa fornecer precisão suficiente para a maioria das aplicações GNSS, os efeitos HOI precisam ser considerados para aplicações que exigem maior acurácia, especialmente em períodos de alta atividade solar, o que converge aos resultados apresentados na presente pesquisa.

Outra questão a ser considerada ao analisar os resultados obtidos, diz respeito à importância do método de posicionamento empregado. Hoque e Jakowski (2007) expõem sobre a oportunidade de eliminar os efeitos ionosféricos de primeira e segunda ordens no posicionamento relativo com uma terceira frequência e a integração dos sistemas modernizados *Global Positioning System* (GPS) e Galileo. No entanto, acrescentam que o efeito é unilateral na técnica PPP, que usa observações indiferenciadas (ZUMBERGE et al., 1997 apud HOQUE e JAKOWSKI, 2007). Perante tais circunstâncias, os autores mostraram que o efeito de segunda ordem é significativo e não pode ser negligenciado se a precisão de nível milimétrico for necessária no posicionamento GNSS preciso, conclusão pertinente também ao presente trabalho.

Uma vez que os efeitos de segunda ordem da ionosfera são dados em função do vetor de indução geomagnética, e as variações do campo geomagnético são maiores no sentido norte-sul (BASSIRI e HAJJ, 1993), uma provável explicação para o comportamento dos valores na planimetria obtidos estarem maiores que na altimetria, seria a relação entre o sentido do vetor das resultantes planimétricas e as linhas de força do campo geomagnético, contudo, estudos mais aprofundados são sugeridos como propostas para trabalhos futuros.

Baseado nas exposições supra apresentadas, as investigações deste trabalho apontam que a importância do erro devido a não consideração dos efeitos HOI consiste em sua associação ao posicionamento de alta precisão a nível milimétrico, a citar o processamento/estabelecimento/monitoramento de redes e a modelagem de séries temporais, principalmente em períodos de alta atividade solar. Além disso, espera-se que os estudos ionosféricos sobre o ciclo 24 apresentados neste capítulo seja útil para auxiliar no entendimento

do que esperar a respeito da influência dos efeitos HOI no atual ciclo solar, o ciclo 25, que ainda se encontra em seu período de mínima atividade solar, com previsão de máxima em 2025.

Referências

- APPLETON, E.V. **Two anomalies in the ionosphere**. *Nature*, v.157, 691, 1946.
- BATISTA, I. S.; MEDEIROS, R.T.; ABDU, M.A.; SOUZA, J.R.; BAILEY, G.J.; PAULA, E.R.. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region, **Journal of Geophysical Research**, v.101, n.A5, p.10887-10892, 1996.
- BOWRING, B. R. **Transformation from spatial to geographical coordinates**. *Survey Review*, XXIII, 181, July, 1976.
- DACH, R. S.; LUTZ, P.; WALSER, P.; FRIDEZ (Eds); 2015: **Bernese GNSS Software Version 5.2**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- DENG, L., JIANG, W., CHEN, H., ZHU, Z., & ZHAO, W. (2017). Study of the effects on GPS coordinate time series caused by higher-order ionospheric corrections calculated using the DIPOLE model. **Geodesy and Geodynamics**, 8(2), 111-119.
- ELMAS, Z. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G. Higher order ionospheric effects in GNSS positioning in the European region. *Ann. Geophys.*, 29, 1383–1399, DOI:10.5194/angeo-29-1383-2011, 2011.
- FEJER, B.G.; FARLEY, D.T.; WOODMAN, R.F.; CALDERON, C.. Dependence of Equatorial F Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. **Journal of Geophysical Research**, v.84, n.A10, p.5792-5796, 1979.
- FRITSCHÉ, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates, **Geophysical Research Letters**, v. 32, L23311, DOI:10.29/2005GL024342, 2005.
- GARCÍA-FERNÁNDEZ, M., S. D.; DESAI, M. D.; BUTALA, A. K. (2013). Evaluation of different approaches to modeling the second-order ionospheric delay on GPS measurements, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 118, doi:10.1002/2013JA019356.
- HATHAWAY, D. H.. **The Sunspot Cycle**. 2008. Disponível em: <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>>. Acesso em: fevereiro de 2020.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, À.; DEFRAIGNE, P.; BERGEOT, N.; PRIETO-CERDEIRA, R.; GARCÍA-RIGO, A. (2014). Distribution and mitigation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS processing. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 119(4), 3823-3837.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN J.M.; SANZ, J.; ORÚS, R.; SALAZAR, D. 2005. **Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning (Summary)**. Barcelona, Spain. Research group of Astronomy and Geomatics – Technical University of Catalonia, 23 p.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, H. M.; JUAN, J.; SANZ, J.; ORÚS, R.: Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates, **Journal Geophys. Res.**, Vol. 112, B08417, doi:10.1029/2006JB004707, 2007.
- HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS

- positioning, **Radio Science**, 43, 1-15, RS5008, doi:10.1029/2007RS003817, 2008.
- HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. **J Geod** (2007) 81: 259. doi:10.1007/s00190-006-0106-0.
- HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. New correction approaches for mitigating ionospheric higher order effects in GNSS applications, paper presented at **25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation**, Nashville TN, September 17–21, 2012.
- JIANG, W.; DENG, L.; LI, Z. (2015). High-order Ionospheric Effects on GPS Coordinate Time Series. In: **Satellite Positioning-Methods, Models and Applications**. InTech.
- KASHCHEYEV, A., B. NAVA, S. M. RADICELLA (2012), Estimation of higher-order ionospheric errors in GNSS positioning using a realistic 3-D electron density model, **Radio Sci.**, 47, RS4008, doi:10.1029/2011RS004976.
- KEDAR, S.; HAJJ, A.; WILSON, B. D.; HEFLIN, M. B. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, **Geophys. Res. Lett.**, 30(16):1829, 2003.
- KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System**, 1997. 248p. Ph. D. dissertation – Department of Geodey and Geomatics Engineering Technical Report n° 188. University of New Brunswick. New Brunswick, Canada.
- KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A.J.; XIAOQING, P. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south American region. **Journal of the Institute of Navigation**, v.50, n.3, p.193-218, Fall/2003.
- LEHMAN, ANN; O'ROURKE, NORM; HATCHER, LARRY; STEPANSKI, EDWARD (2013). **JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: Methods for Researchers and Social Scientists**, Second Edition (em inglês). [S.l.]: SAS Institute. ISBN 9781612906034.
- LEICK, A. **GPS satellite surveying**, 2º. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, 560p.
- LI, J.; JIN, S. (2017). **High-order ionospheric effects on electron density estimation from Fengyun-3C GPS radio occultation**. In: *Annales Geophysicae* (Vol. 35, No. 3, p. 403). Copernicus GmbH.
- LIU, Z.; LI, Y.; GUO, J; LI, F. (2016) Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning. *Geodesy and Geodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.005>.
- MEMARZADEH, Y. (2009). **Ionospheric modeling for precise GNSS applications**. PhD thesis, Delft University of Technology. Disponível em: <https://www.ncgeo.nl/downloads/71Memarzadeh.pdf>.
- MARQUES, H. A., MONICO, J. F. G., AQUINO, M. (2014). Análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, 20(4), 879-901.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. (2011). RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. **GPS Solutions**, 15(3), 305–314. doi:10.1007/s10291-011-0220-1.
- MARQUES, H. A; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. ROSA, G. P. S. Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil. **Rev. Bras. Geof.**. Vol. 27, n 3, 2009.
- MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**.

- Florida: Krieger Publishing Company, 1991, 237p.
- OLIVEIRA FILHO, K. S. O; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física, 2000. 708p.
- OLIVEIRA, G. D. DE; DAL POZ, W. R.; ALMEIDA, M. S. Implementação de um sistema on-line para processamento de dados GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 501-512, 24 jun. 2019.
- PETIT, G; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6 Disponível em: <http://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#official_target>. Acesso em: maio de 2021.
- PETRIE, E.J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; SPALLA, P.; MOORE, P.; KING, M.A. A review of higher order ionospheric refraction effects on dual frequency GPS, **Surv Geophys** 32 (2011) 197e253, <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-010-9105-z>.
- PETRIE, E.J., KING M.A., MOORE P., D.A. Lavallée, Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities, **J Geophys Res** 115 (2010) B03417, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006677>.
- QU, X.; LI, Z.; AN, J.; DING, W. (2015). Characteristics of second-order residual ionospheric error in GNSS radio occultation and its impact on inversion of neutral atmospheric parameters. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 130, 159-171.
- SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999. 205p. Ph. D. dissertation University of Bern. Bern, Switzerland.
- SILSO. **Sunspot Index and Long-term Solar Observations**. SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels. Disponível em: <<http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot>>. Acesso em: fevereiro de 2020.
- SIRGAS (2021) **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-definicao/>>. Acesso em: março de 2021.
- SPACEWEATHER. **News and information about the Sun-Earth environment**. Disponível em: <<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle>>. Acesso em: fevereiro de 2020.
- SPEARMAN, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**. 15 (1): 72–101. doi:10.2307/1412159.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3rd completely ver. And extended ed. Berlin; New York: de Gruyter, 2001.
- WEBSTER, I. A **Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. 1993. M. Sc. E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- ZHANG, S.; FANG, L.; WANG, G.; LI, W. The impact of second-order ionospheric delays on the ZWD estimation with GPS and BDS measurements. **GPS Solut.** 2020, 24, 1–11.
- ZHANG, Z.; GUO, F.; ZHANG, X. The Effects of Higher-Order Ionospheric Terms on GPS Tropospheric Delay and Gradient Estimates. **Remote Sens.** 2018, 10, 1561.

Capítulo 2. Efeitos de ordem superior da ionosfera durante a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 e sua influência no posicionamento GNSS no Brasil

Higher-order ionospheric effects during the geomagnetic storm occurred on March 17, 2015 and its influence on the GNSS positioning in Brazil

Resumo: Nos últimos anos, efeitos de segunda e terceira ordens da ionosfera (*Higher Order Ionosphere* - HOI), que antes eram negligenciados, passaram a ser considerados no posicionamento de alta acurácia. Dessa forma, o *International Earth Rotation and Reference System* (IERS) recomenda, de acordo com o *IERS Conventions* (2010) que os centros de processamento de dados do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) apliquem as correções dos efeitos HOI. A versão (5.2) do programa de processamento científico de dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Bernese, oferece a possibilidade de correções dos efeitos HOI. Neste trabalho foram processados dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) com uso do Bernese, considerando três dias de processamento: o dia anterior à tempestade ocorrida no dia 17/03/2015, o dia de ocorrência da tempestade e um dia após sua ocorrência. Esta tempestade foi considerada a mais intensa ocorrida no ciclo solar 24. O índice geomagnético *Disturbance Storm-Time* (Dst) atingiu -222 nT, classificando a tempestade como intensa. Os dados foram processados com e sem correção dos efeitos HOI. Na sequência, as diferenças entre as coordenadas (com e sem correção) foram calculadas. Dessa forma, as diferenças obtidas indicam o erro em função dos efeitos HOI. Nos processamentos foram considerados os métodos de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e Posicionamento Relativo Estático (PRE). No domínio das observações, o efeito foi maior no código e menor na fase. O efeito de segunda ordem atingiu valor máximo em torno de 0,05 m e o efeito de terceira ordem, cerca de 0,02 m (ambos para a frequência L_2 utilizando o código). Utilizando a fase, o efeito de segunda ordem para a frequência L_2 alcançou valores próximos a 0,02 m e o efeito de terceira ordem, em torno de 0,007 m. Em contrapartida, os efeitos no domínio do posicionamento foram menores. No PPP, as diferenças entre as coordenadas alcançaram valores máximos e médias de aproximadamente 0,011 m e 0,005 m na planimetria e 0,007 m e 0,002 m na altimetria, observados durante a fase principal da tempestade geomagnética. No PRE, o valor máximo atingiu cerca de 0,009 m e a média alcançou 0,001m, tanto na planimetria quanto na altimetria. Conclui-se que a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 influenciou no aumento do erro devido a não consideração dos efeitos HOI no domínio do posicionamento, em sua maior parte a nível milimétrico, principalmente durante a fase principal da tempestade.

Palavras-chave: GNSS-PPP. HOI. Posicionamento Relativo. Tempestade Geomagnética.

Abstract: In recent years, effects of second and third orders of the ionosphere (*Higher-Order Ionospheric* - HOI), which were previously neglected, came to be considered in the positioning of high accuracy. Thus, the *International Earth Rotation and Reference System* (IERS) recommends, according to the *IERS Conventions* (2010), that the data processing centers of the *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) apply the corrections of the HOI effects. The version 5.2 of the Bernese GNSS (*Global Navigation Satellite System*) scientific data processing program offers the possibility of correcting HOI effects. In this work, data from Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems (RBMC) were processed using Bernese, considering three processing days: the day before the storm on 03/17/2015, the day on which

the storm occurred and one day after its occurrence. This storm was considered the most intense in the solar cycle 24. The Dst (Disturbance Storm-Time) geomagnetic index reached -222 nT, classifying the storm as intense. Data were processed with and without HOI effects correction. The data were processed with and without HOI effects correction. Then, the differences between the coordinates (with and without correction) were calculated. Thus, the differences obtained indicate the error due to the HOI effects. Thus, the differences obtained indicate the error due to the HOI effects. In the processing, the Precise Point Positioning (PPP) and Static Relative Positioning (PRE) methods were considered. In the observations domain, the effect was greater in the code and less in the phase. The second order effect reached a maximum value around 0.05 m and the third order effect, approximately 0.02 m (both for the L_2 frequency using the code). Using the phase, the second order effect for the L_2 frequency reached values close to 0.02 and the third order effect, around 0.007 m. In contrast, the effects on domain positioning were less. In the PPP, the differences between the coordinates reached maximum and average values of approximately 0.011 m and 0.005 m in the planimetry and 0.007 m and 0.002 m in the altimetry, observed during the main phase of the geomagnetic storm. In the PRE, the maximum value reached about 0.009 m and the average reached 0.001 m, in both planimetry and altimetry. It is concluded that the geomagnetic storm that occurred on March 17, 2015 influenced the increase of the error due to non-consideration of HOI effects in the positioning domain, mostly at the millimeter level, mainly during the main phase of the storm.

Keywords: GNSS-PPP. HOI. Relative Positioning. Geomagnetic Storm.

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, era dispendioso o acesso de usuários a receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência. No entanto, com a popularização desses receptores, a correção do efeito de primeira ordem devido à ionosfera passou a ser mais acessível a partir da combinação IONFREE. Dessa forma, os efeitos de segunda e terceira ordens da ionosfera (efeitos de ordem superior da ionosfera, *ou higher order ionospheric effects* - HOI), que antes eram negligenciados, passaram a ser considerados, tornando-se objeto de estudos no posicionamento de alta acurácia. Em meio a tantos trabalhos relacionados aos efeitos HOI, pode-se citar Bassiri e Hajj (1993); Fritsche et al. (2005); Hoque e Jakowski (2007); Marques et al. (2009); Salomoni; Matsuoka e Souza (2011); Hernández-Pajares et al. (2005, 2007, 2014), Marques, Monico e Aquino (2011, 2014), Liu, Li e Guo (2016), Hadas et al. (2017), Zhang; Guo e Zhang (2018), Cai et al. (2019), Zhang et al. (2020), Yang et al. (2020), Qi et al. (2021), Xi e Wang (2021), entre outros.

Dentre os diversos efeitos que a ionosfera causa nos sinais GNSS, dois dos mais significativos são devido ao avanço da fase e retardo do código (KLOBUCHAR, 1996). O atraso no sinal, causado pelo efeito de primeira ordem, representa em torno de 99,9% do efeito total, ficando o restante a cargo dos efeitos HOI. Logo, para muitos tipos de aplicações práticas, os efeitos HOI não representam maiores problemas, porém, para aplicações científicas ou que requeiram resultados com alta acurácia, a não correção desses efeitos implica em efeitos residuais nas coordenadas da ordem de milímetros podendo chegar a centímetros (FRITSCHKE et al., 2005). Johnston, Riddell e Hausler (2017) destacaram que o cálculo e a aplicação dos efeitos HOI foram identificados como uma questão importante a ser resolvida no domínio das observações por

Global Positioning System (GPS).

Liu, Li e Guo (2016) por exemplo, estudaram a influência da correção dos efeitos HOI na determinação precisa da órbita de satélites GPS, onde a correção ionosférica de segunda ordem máxima obtida foi de 9 cm, e a de terceira ordem máxima foi de 1 cm. Além disso, concluíram que as correções de ordem superior são influenciadas de acordo com a latitude da estação. No Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) as correções máximas ficaram em torno de 3 mm nas direções leste e componente vertical.

Na ionosfera também ocorrem anomalias e irregularidades que afetam a propagação dos sinais GNSS (RISHBETH e GARRIOTT, 1969; BUONSANTO, 1999), como as tempestades geomagnéticas, que podem afetar o comportamento do Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* - TEC) e, conseqüentemente, o posicionamento com GNSS (SKONE, 2001; MENDILLO, 2006). O estudo das tempestades bem como seus impactos podem ser verificados em diversos trabalhos como, por exemplo, em Skone (2001); Becker-Guedes et al. (2007); Rama Rao et al. (2009); Morton, Zhou e Van Graas (2009); Elmas et al. (2011); Jacobsen e Schäfer (2012); Astafyeva (2014); Cherniak e Zakharenkova (2015); Carter et al. (2016); Jacobsen e Andalsvik (2016); Nava et al. (2016); Yao et al. (2016), Xiaomin et al. (2018), Cai et al. (2019), entre outros. Dessa forma, notou-se que a investigação da influência dos efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas e seu impacto no posicionamento GNSS vem se tornando cada vez mais assunto de interesse. À vista disso, este trabalho apresentou uma análise integrada dos efeitos HOI, eivados dos efeitos da maior tempestade geomagnética ocorrida no ciclo 24.

2. EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA IONOSFERA

A versão 5.2 do *software* Bernese GNSS permite realizar a correção dos efeitos HOI (DACH et al., 2015). Para calcular esses termos de correção para as observações das fases e códigos são consideradas as fórmulas dependentes de frequência verificadas em Fritsche et al. (2005). O algoritmo para cálculo do efeito de segunda ordem é baseado em Bassiri e Hajj (1993), onde o campo geomagnético é caracterizado por um dipolo magnético concêntrico inclinado. Este modelo de campo geomagnético, conhecido como *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), é considerado a versão mais realista de um modelo para a representação do campo geomagnético (DACH et al., 2015).

Os efeitos de segunda ($I_{gLi}^{(2)}$) e terceira ($I_{gLi}^{(3)}$) ordens para observações de código podem ser calculados a partir das Eq. (1) e (2). As Eq. (3) e (4) são referentes aos efeitos de segunda ($I_{pLi}^{(2)}$) e terceira ($I_{pLi}^{(3)}$) ordens para observações de fase. Destaca-se que toda a descrição de como são calculados os efeitos de segunda e terceira ordens da ionosfera será baseada em Bassiri e Hajj (1993) e Odijk (2002).

$$I_{gLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \frac{\| B}{\| \cos \theta N_e d_\rho} \quad (1)$$

$$I_{gLi}^{(3)} = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \int N_e^2 d_\rho \quad (2)$$

$$I_{pLi}^{(2)} = -\frac{1}{2}I_{gLi}^{(2)} \quad (3)$$

$$I_{pLi}^{(3)} = -\frac{1}{3}I_{gLi}^{(3)} \quad (4)$$

Onde

$f_{Li}(i=1,2)$ = frequência do sinal

N_e = densidade de elétrons livres em m^{-3} ,

e = constante natural igual a $1,60218 \times 10^{-19}$ Coulomb para a carga do elétron,

m_e = massa do elétron, igual a $9,10939 \times 10^{-31}$ kg,

$\|B\|$ = comprimento do vetor indução geomagnética (B), em Tesla que é igual a Volt.segundo.metro⁻²,

θ = ângulo que fornece a direção de propagação do sinal em relação ao vetor indução geomagnética (B).

A quantidade A, nas Eq. (1) e (2) pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

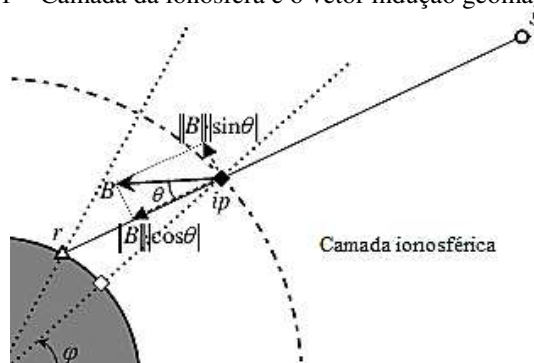
$$A = \frac{e^2}{4\pi^2 m_e \epsilon_0} \quad (5)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, igual a $8,85419 \times 10^{-12}$ Farad/metro. Substituindo os valores na expressão (5), obtém-se o valor de A aproximadamente igual a $80,6 m^3/s^2$.

O efeito de segunda ordem para fase é reduzido por um fator 2 em relação ao código, onde o ângulo θ define o avanço ou atraso do sinal. Para o efeito de terceira ordem, esse fator é igual a 3. Todavia, o efeito de terceira ordem causa atraso do código e da fase (FRITSCHKE et al., 2005).

A Figura 1 ilustra o vetor B e o ângulo θ com relação ao modelo ionosférico da simples camada (*single-layer*), bem como as posições r e s, onde r indica o receptor e s o satélite.

Figura 1 – Camada da ionosfera e o vetor indução geomagnética B.



Fonte: adaptado de Odiijk (2002).

De acordo com a Eq. (1), verifica-se que o efeito de segunda ordem da ionosfera depende da indução geomagnética (ver Figura 1) no ponto onde o sinal cruza a camada da ionosfera (*ionosphere point - ip*) e do ângulo deste sinal em relação ao vetor de indução geomagnética. No entanto, o efeito de terceira ordem, dado pela Eq. (2), independe destes fatores.

Para calcular os efeitos de segunda e terceira ordens em função do TEC, podem ser feitas algumas simplificações. O TEC pode ser calculado a partir da Eq. (6):

$$TEC = \int N_e d\rho \quad (6)$$

Assume-se uma aproximação da ionosfera como uma simples camada, como ilustra a Figura 1. Dessa forma, substituindo a Eq. (6) na Eq. (1), torna possível obter o efeito de segunda ordem da seguinte forma:

$$I_{gLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \| B \| |\cos \theta| \int N_e d\rho = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \| B \| |\cos \theta| TEC \quad (7)$$

Portanto, para calcular o efeito de segunda ordem, além de se conhecer o TEC, deve-se conhecer o produto $\| B \| |\cos \theta|$, que pode ser calculado a partir da expressão:

$$\| B \| |\cos \theta| = |\cos \varphi'_m \sin Z_m \cos a_m - 2 \sin \varphi'_m \cos Z_m| \left(\frac{R_e}{R_e + h_{ion}} \right) B_{eq} \quad (8)$$

Onde

φ'_m = latitude geomagnética do ponto ionosférico (*ip*),

B_{eq} = magnitude da indução geomagnética no equador geomagnético (na superfície terrestre), com valor igual a $3,12 \times 10^{-5}$ T, referente a indução sobre a superfície terrestre no equador geomagnético,

a_m = azimute,

Z_m = ângulo zenital do satélite,

h_{ion} = altura da camada ionosférica sobre a superfície terrestre, geralmente adotada como sendo igual a 450 km (valor utilizado no Mapa Global da Ionosfera produzido pelo *Center for Orbit Determination in Europe (CODE)*),

R_e = raio médio da Terra (geralmente adotado como sendo 6.371 km).

Em relação ao efeito de terceira ordem, uma aproximação para a integral da Eq. (2) pode ser feita da seguinte forma:

$$I_{gLi}^{(3)} \approx \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \eta N_{e,max} \int N_e d\rho = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \eta N_{e,max} TEC \quad (9)$$

Onde

$\eta = 0,66$.

$N_{e,max}$ = densidade máxima de elétrons

A seguinte aproximação foi realizada: $\int N_e^2 d\rho \approx \eta N_{e,max} \int N_e d\rho$.

Com a aproximação do efeito de terceira ordem, o mesmo também pode ser escrito em função do TEC, da mesma forma que o efeito de segunda ordem. No entanto, no efeito de terceira ordem, comparece uma função adicional, dada pela densidade máxima de elétrons (ODIJK, 2002). A densidade máxima de elétrons pode ser calculada com base no modelo ionosférico desenvolvido por Brunner e Gu (1991) e adaptado por Fritshe et al. (2005).

3 DISTÚRBIOS MAGNÉTICOS

As tempestades geomagnéticas podem ser definidas como distúrbios no campo magnético da Terra e são capazes de durar desde algumas horas até vários dias, podendo causar flutuações em grandes escalas em vários componentes do campo magnético terrestre, se comparados a períodos sem distúrbios. O efeito desses distúrbios normalmente é maior nas regiões da alta latitude e podem se mover em direção ao equador magnético caso forem fortes o suficiente. Essas tempestades são caracterizadas por variações no TEC e têm um impacto direto nas aplicações GPS (SKONE, 2001; GONZALEZ et al., 1994; BUONSANTO, 1999).

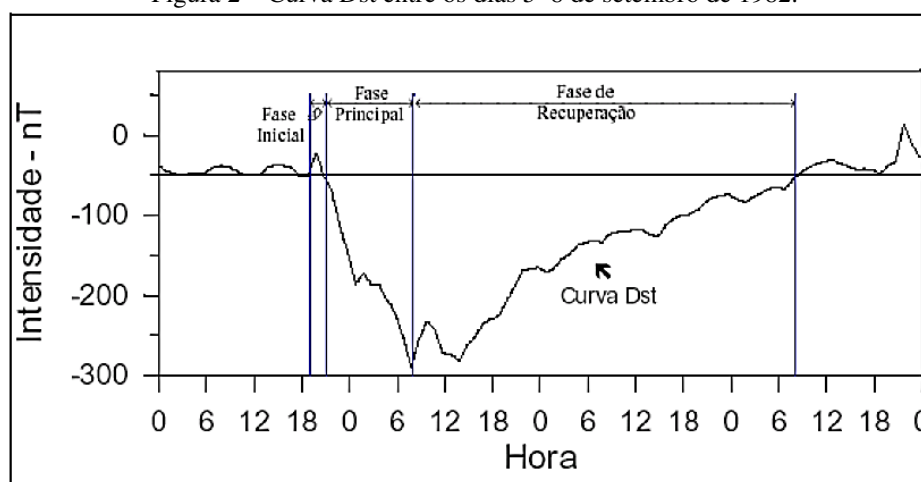
As tempestades geomagnéticas mais intensas são provenientes de explosões solares. Essas explosões, quando ocorrem com muita intensidade, podem ocasionar em uma ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejection* - CME) (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991; KOMJATHY, 1997). Dessa forma, quando esta “nuvem” de plasma atinge a Terra, podem ocorrer as tempestades geomagnéticas (McNAMARA, 1991). Informações detalhadas sobre as origens interplanetárias de tempestades geomagnéticas podem ser encontrados em Gonzalez, Tsurutani e Gonzalez (1999), entre outros estudos.

A intensidade da variação do campo magnético nas tempestades geomagnéticas e sua duração podem ser medidas a partir da utilização de índices geomagnéticos, os quais constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2018). Dentre os índices geomagnéticos mais utilizados, pode-se destacar: o índice global *Planetary Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e o equatorial *Disturbance Storm-Time* (Dst).

Em baixas latitudes a maior parte do distúrbio magnético é percebida na linha de campo elétrico, que passa pelo equador magnético que, por sua vez, é representada pelo índice Dst (dado em nanoTesla - nT). À vista disso, o índice Dst representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas, obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999).

Na iminência da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade, conhecido por fase inicial, início súbito ou “Início Abrupto” (*Sudden Commencement*), que geralmente dura de poucos minutos a mais de 15 horas. Em seguida, desenvolve-se a fase principal da tempestade, que é caracterizada pela repentina queda do valor da intensidade do índice. A fase principal dura, em média, um dia e é concluída após o índice alcançar o mínimo. A partir daí este começa a subir de valor, caracterizando a fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (GONZALEZ, 1994; YAMASHITA, 1999). A fase de recuperação pode durar vários dias. Por intermédio da Figura 2, pode-se visualizar como exemplo a curva do índice Dst obtida entre os dias 5 a 8 de setembro de 1982, data em que ocorreu uma intensa tempestade geomagnética, com suas fases características.

Figura 2 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982.



Fonte: Adaptada de Yamashita (1999).

No que concerne à classificação de uma tempestade geomagnética, esta pode ser dada em função do índice Dst onde usualmente são divididas em 4 classes, como pode ser visto por meio da Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de uma tempestade geomagnética segundo o índice Dst.

Condição da Tempestade Geomagnética	Valor do índice Dst (nT)
Fraca	-30 a -50
Moderada	-50 a -100
Intensa	-100 a -250
Muito Intensa	<-250

Fonte: adaptado de Gonzalez et al. (1994).

Existem diversos índices de atividade magnética. A Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA) reconhece oficialmente os índices magnéticos Kp, Dst e *Auroral Electrojet Index* (AE), entre outros. O Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (*International Service of Geomagnetic Indices – ISGI*), disponibiliza por meio do endereço eletrônico <http://isgi.unistra.fr/geomagnetic_indices.php> dados e informações a respeito dos índices IAGA. Valores publicados destes índices também podem ser encontrados nos endereços: <<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/indices.html>> e <<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>>. O índice Kp é também fornecido pela *Organisation of the Helmholtz-Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences*, que os disponibiliza por meio do endereço <<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>. Um dos centros que também disponibiliza dados relativos ao índice Kp é o *National Oceanics and Atmospheric Administration* (NOAA) (NOAA, 2018).

4. TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA NO DIA 17 DE MARÇO DE 2015

No dia 17 de março de 2015, uma CME atingiu o campo magnético da Terra provocando a tempestade geomagnética mais intensa do ciclo solar 24. Os distúrbios geomagnéticos para este período foram monitorados a partir do índice geomagnético Dst, por este ser adequado em estudos de tempestades geomagnéticas. A Figura 3 ilustra o gráfico deste índice para todo o mês de março do ano 2015.

Figura 3 - Índice Dst para o mês de março do ano 2015.

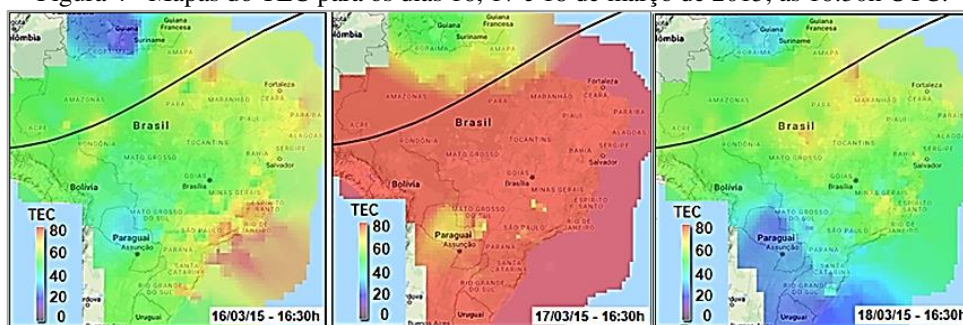


Fonte: adaptado de WDC Kyoto (2018).

De acordo com a Figura 3, pode-se notar que no dia 17/03/2015 o índice Dst cai de forma significativa, chegando a atingir aproximadamente -222 nT. De acordo com a classificação deste índice, valores entre -100 nT e -250 nT classificam a tempestade como 'intensa'. É interessante notar que no dia 17 de março o índice variou de 56 a -222 nT, ao passo que no dia 10 de março por exemplo, o mesmo índice variou de 3 a 11 nT.

A Figura 4 apresenta os mapas do TEC (10^{16} el/m²) relativos aos dias 16, 17 e 18 de março de 2015, às 16:30h do Tempo Universal Coordenado (*Universal Time Coordinated* - UTC), sobre o território do Brasil.

Figura 4 - Mapas do TEC para os dias 16, 17 e 18 de março de 2015, às 16:30h UTC.



Fonte: adaptado de EMBRACE (2019).

Ao observar os mapas da Figura 4, nota-se que os valores do TEC para o dia 17 de março (dia da tempestade às 16:30 UTC) se encontram, de modo geral, mais elevados se comparados aos valores do TEC referentes aos dias 16 e 18 de março. Também se nota a fase de recuperação da tempestade, no dia 18. Neste caso, os valores do TEC normalmente ficam menores do que o dia que antecede a tempestade (SKONE, 2001).

5. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

5.1 Materiais e métodos

Este trabalho foi realizado no intuito de analisar os impactos dos efeitos HOI na região brasileira durante a maior tempestade geomagnética ocorrida no ciclo solar 24 e seu efeito no PPP e no Posicionamento Relativo Estático (PRE).

A base de dados escolhida foi um conjunto de estações ativas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), das quais foram utilizados os arquivos de observação no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). Esses arquivos são disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no seguinte endereço: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Tais arquivos são referentes

às datas de 16, 17 e 18 de março de 2015, correspondentes a um dia antes da tempestade, dia da tempestade e um dia após a tempestade. Estes três dias equivalem respectivamente aos dias corridos do ano (*Day of Year - DOY*) 75, 76 e 77 de 2015.

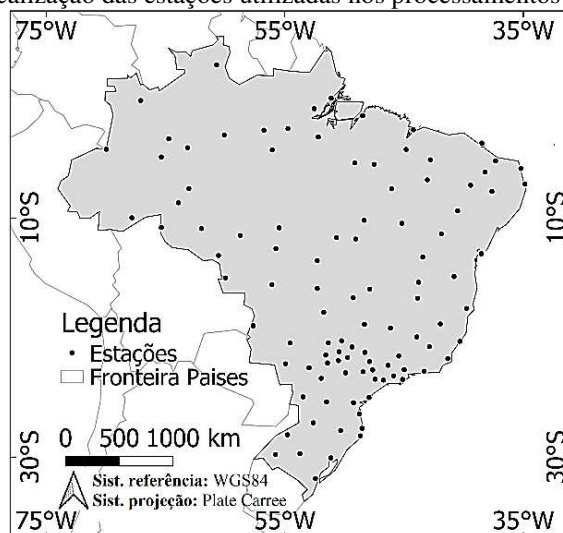
Foi utilizado neste experimento o *software* Bernese GNSS (versão 5.2) para executar as estratégias de processamento de dados GPS. Enfatiza-se que a versão 5.2 deste *software* permite a realização de correções dos efeitos HOI, bem como a utilização do modelo IGRF-12 (válido para os anos de 2015 a 2020) no cálculo da estimativa do efeito de segunda ordem da ionosfera.

Ademais, também foram utilizados outros arquivos necessários para realizar o processamento de dados no *software* Bernese GNSS. Alguns arquivos (de ionosfera, erros do relógio do satélite, parâmetros de rotação da Terra, efemérides precisas, calibração de antenas, entre outros) são disponibilizados pelo CODE e pelo *International GNSS Service* (IGS). Além disso, outros arquivos (dados a respeito de placas tectônicas às quais as estações pertencem, descritivos das estações, coordenadas *a priori*, velocidades, entre outros) se juntam aos demais no propósito da realização de diversas correções durante o processamento de dados GNSS, podendo-se citar as correções dos efeitos de maré terrestre, carga oceânica, etc. Detalhes a respeito das estratégias de processamento estão disponíveis no Apêndice.

O processamento dos dados foi realizado utilizando intervalos de tempo de rastreamento de duas em duas horas ao longo do dia (ou seja: de 0 a 2h, 2 a 4h, 4 a 6h, ..., 22 a 24h). Cada processamento foi realizado duas vezes: uma vez corrigindo os efeitos HOI e outra vez sem realizar tal correção.

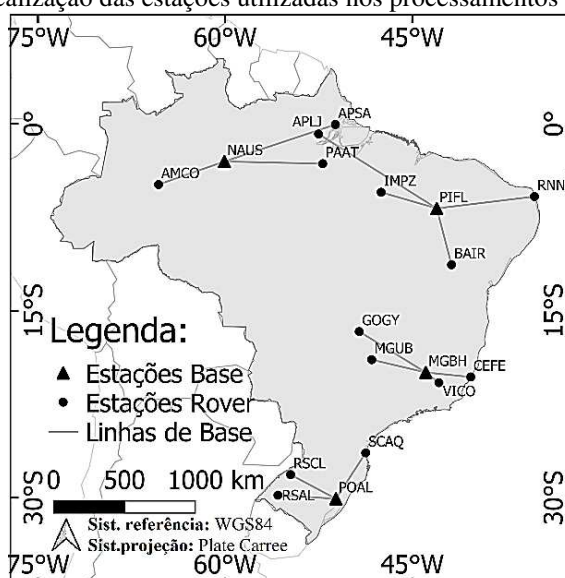
A Figura 5 ilustra a localização das 109 estações RBMC utilizadas no processamento de dados GNSS a partir do método PPP. No que concerne ao processamento de dados GNSS a partir do PRE, foram compostas 14 linhas de base, ilustradas através da Figura 6. A Tabela 2 indica as estações e o comprimento das linhas de base utilizadas no PRE.

Figura 5 – Localização das estações utilizadas nos processamentos a partir do PPP.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 6 – Localização das estações utilizadas nos processamentos a partir do PRE.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 2 – Comprimento das linhas de base utilizadas nos processamentos pelo PRE.

Rover	Base	Comprimento (km)
CEFE	MGBH	379,194
GOGY	MGBH	670,032
MGUB	MGBH	468,708
VICO	MGBH	142,706
AMCO	NAUS	620,874
APSA	NAUS	1041,742
PAAT	NAUS	875,432
APLJ	PIFL	1241,666
BAIR	PIFL	516,28
IMPZ	PIFL	513,622
RNNA	PIFL	873,116
RSAL	POAL	449,954
RSCL	POAL	413,545
SCAQ	POAL	470,093

Fonte: Os autores (2021).

As diferenças entre as coordenadas das estações advindas dos processamentos com e sem a correção dos efeitos HOI, foram referidas como ‘erros’ devido a não consideração dos efeitos de segunda e terceira ordens da ionosfera (ou HOI), conforme sugerido por Marques et al. (2009) e Marques, Monico e Aquino (2014). A partir desse ‘erro’, a análise dos resultados em resultantes planimétricas e componentes altimétricas foi realizada, tanto para os resultados advindos do processamento pelo PPP quanto pelo PRE. A rotina para a obtenção dos resultados do erro pode ser verificada no Apêndice.

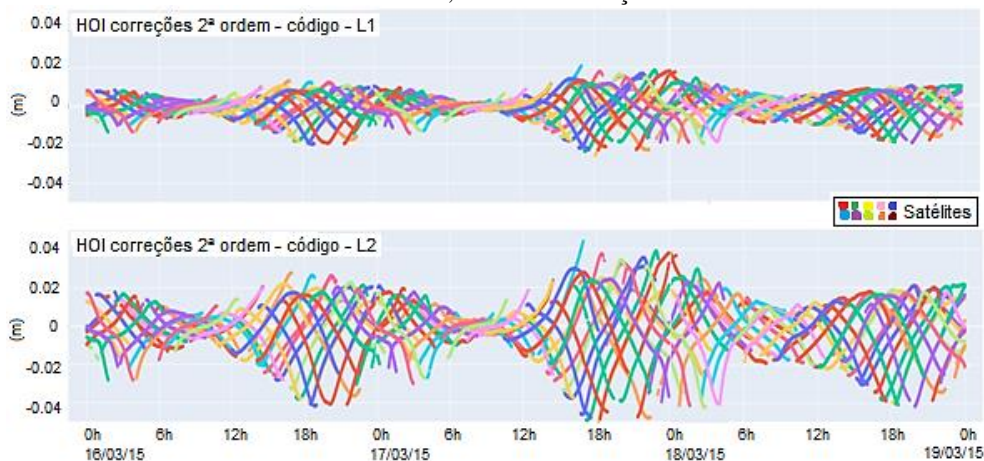
5.2 Avaliação dos efeitos HOI no domínio das observações

Para confeccionar e plotar os gráficos dos efeitos HOI no domínio das observações no *software* Bernese, foi necessário alterar o código fonte do módulo IONSPP2, escrito na linguagem

Fortran, e depois recompilá-lo para obter os valores dos efeitos de segunda e terceira ordens separadamente, além do efeito de curvatura, impressos para cada satélite.

Dessa forma, os valores dos efeitos HOI foram discriminados em efeitos de segunda e terceira ordens, referentes aos dias 16, 17 e 18 de março de 2015. Vale enfatizar que os dados processados são referentes ao período de máxima atividade solar do ciclo 24, coletados próximos ao equinócio de primavera do hemisfério Sul. A Figura 7 apresenta a variação diária (16 a 18 de março) do efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 com o código P.

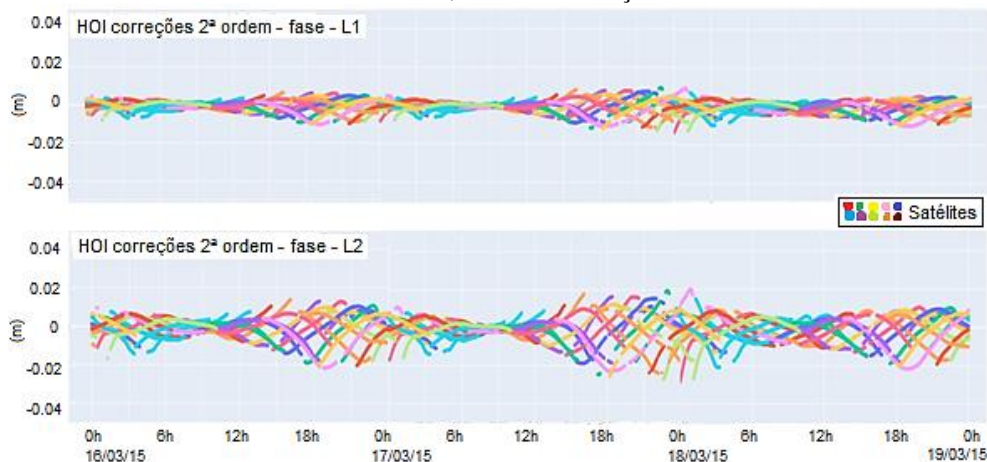
Figura 7 – Variação diária do efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando o código P durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.



Fonte: Os autores (2021).

A variação do efeito de segunda ordem para as mesmas frequências, porém utilizando a fase também foram calculadas, como pode ser visto através da Figura 8. Os valores dos efeitos foram calculados para as estações RBMC utilizadas neste experimento. Contudo, como a diferença entre os resultados obtidos para a maioria das estações foram ínfimas (a nível milimétrico) serão apresentados apenas os gráficos da estação ROCD, representando os resultados das outras estações.

Figura 8 – Variação diária do efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando a fase durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.



Fonte: Os autores (2021).

O efeito de segunda ordem atingiu valor máximo cerca de 0,02 m para frequência L_1 , e

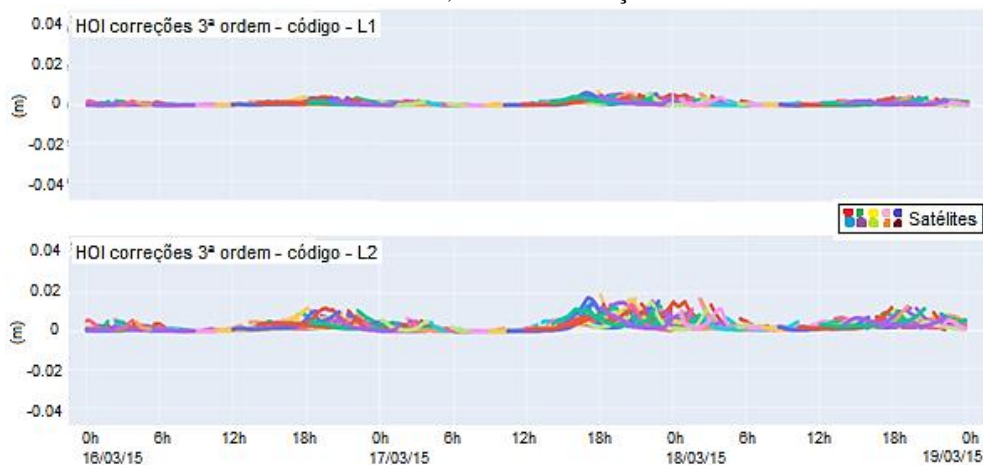
valor máximo próximo a 0,05 m para a frequência L_2 utilizando o código P, como pode ser visto na Figura 7. Utilizando a fase, o efeito de segunda ordem para as frequências L_1 e L_2 alcançou valores próximos a 0,01 m e 0,02 m respectivamente (Figura 8). Tais resultados podem ser comparados aos obtidos por Hernández-Pajares et al. (2014), que mostraram que o termo ionosférico de segunda ordem se destacou entre os principais efeitos na faixa L, com valores de pico de até 0,02 m. No trabalho de Morton, Zhou e Van Graas (2009) os efeitos de segunda ordem da ionosfera em observáveis GPS foram analisados usando medidas *Arecibo incoherent scatter radar* (ISR), onde os erros máximos encontrados foram da ordem de 0,03 m para os sinais GPS para a frequência L_1 .

Os valores observados para cada satélite se alternam entre positivos e negativos. Isso se deve ao termo $\cos \theta$, presente na equação do efeito de segunda ordem (Eq. 7). Dessa forma, como o ângulo θ está diretamente ligado ao ângulo de elevação do satélite, pode-se dizer que o comportamento notado nos gráficos da Figura 8 se correlacionam ao ângulo de elevação. Contudo, o comportamento do efeito de terceira ordem diverge do efeito de segunda ordem, pois não há em sua modelagem o termo $\cos \theta$ (Eq. 9), e com isso os resultados observados são todos positivos. As Figuras 9 e 10 ilustram o efeito de terceira ordem.

O efeito de terceira ordem utilizando o código atingiu valores máximos cerca de 0,007 m e 0,02 m para as frequências L_1 e L_2 , respectivamente (Figura 9). Utilizando a fase, o efeito de terceira ordem alcançou valores próximos a 0,002 m e 0,007 para as frequências L_1 e L_2 , respectivamente (Figura 10).

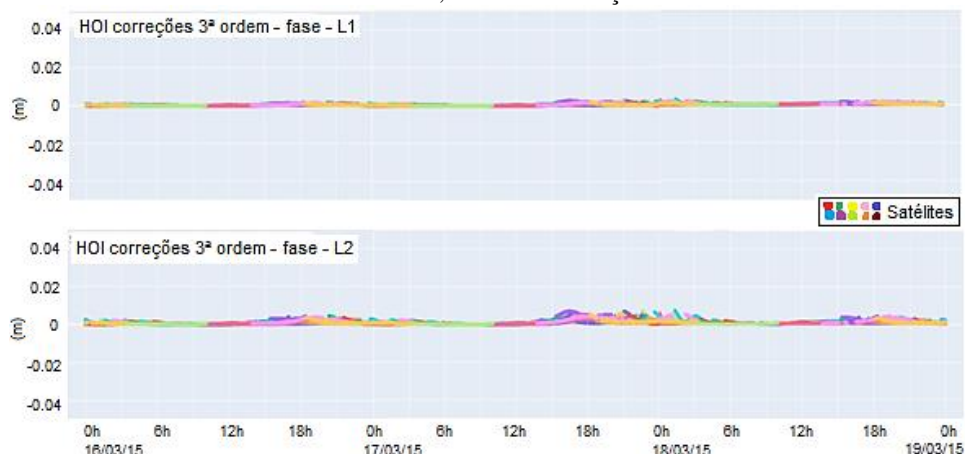
Todos os valores máximos para os efeitos de segunda e terceira ordens foram observados no intervalo que contempla a fase principal da tempestade.

Figura 9 – Variação diária do efeito de terceira ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando o código P durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 10 – Variação diária do efeito de terceira ordem para as frequências L_1 e L_2 utilizando a fase durante os dias 16, 17 e 18 de março de 2015.



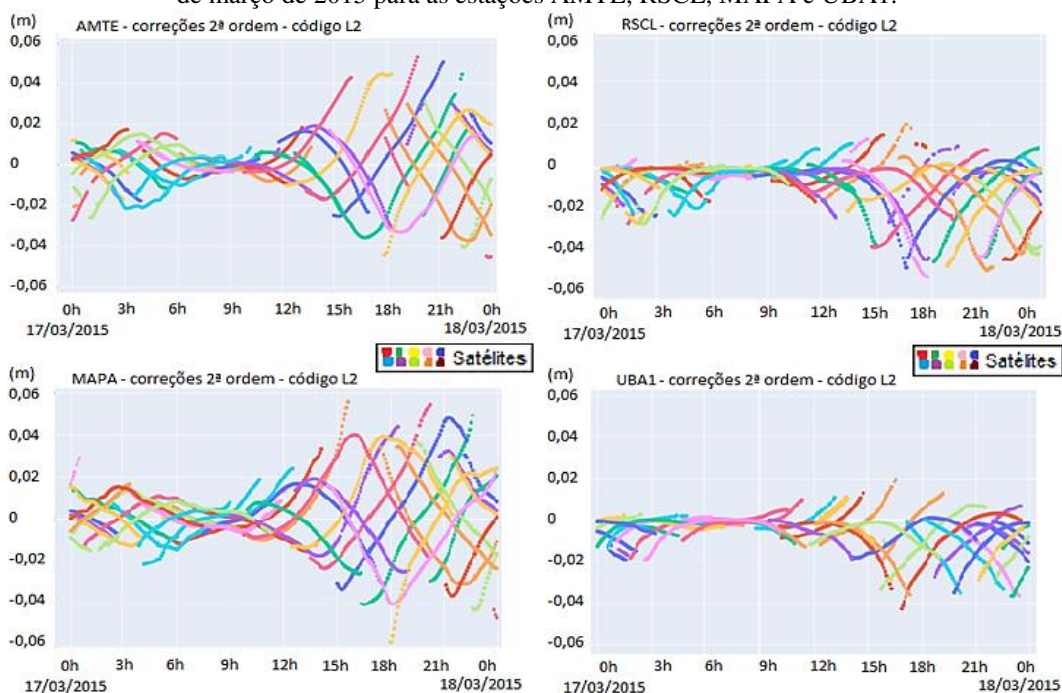
Fonte: Os autores (2021).

Devido à grande quantidade de gráficos gerados serão apresentados os efeitos HOI máximos e mínimos apenas para a frequência L_2 utilizando o código P, visto que estes denotaram os resultados mais expressivos. Contudo, destaca-se que no domínio do posicionamento também é considerada a frequência L_2 .

A Figura 11 ilustra a variação diária do efeito de segunda ordem para a frequência L_2 utilizando o código. Os valores foram calculados para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1 pertencentes à RBMC (às quais apresentaram os maiores valores máximos para o erro no domínio do posicionamento pelo PPP, como será visto no próximo tópico).

De forma complementar à Figura 11, a Tabela 3 a seguir apresenta em valores absolutos (em metros), os máximos e mínimos obtidos para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.

Figura 11 – Variação diária do efeito de segunda ordem para a frequência L_2 com o código para o dia 17 de março de 2015 para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 3 – Efeitos de segunda ordem máximos e mínimos (absolutos) obtidos para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.

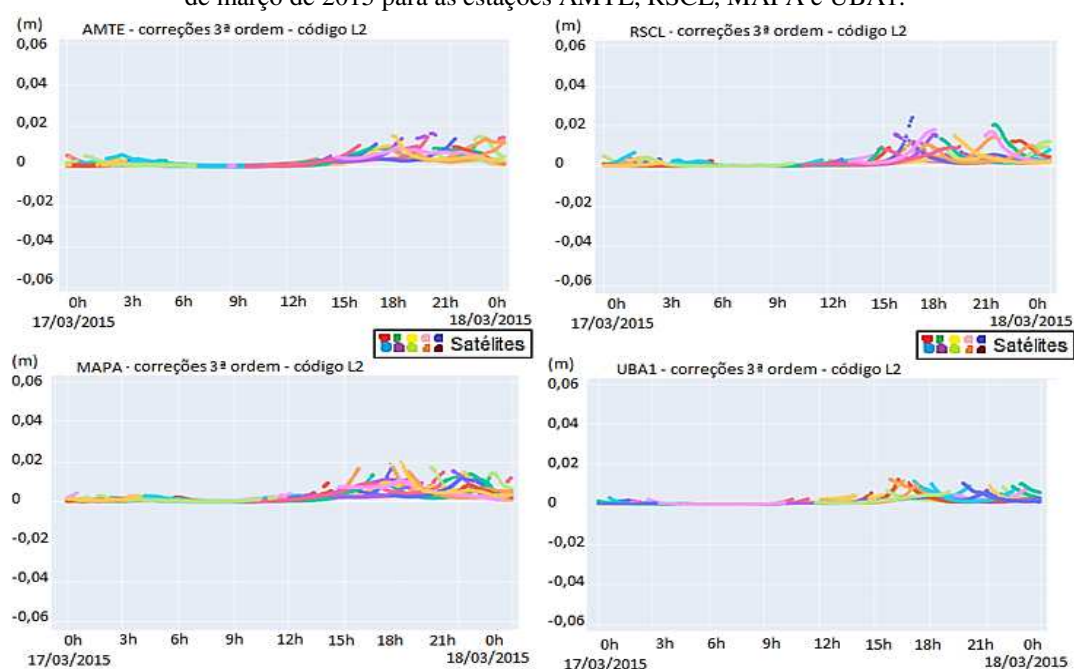
	AMTE	RSCL	MAPA	UBA1
Máximos (m)	0,053	0,050	0,057	0,042
Mínimos (m)	3,02E-06	1,42E-06	8,79E-06	1,63E-07

Fonte: Os autores (2021).

Através da Figura 11 e da Tabela 3, pode-se perceber que o efeito de segunda ordem alcançou valores máximos cerca de 0,05 m para frequência L_2 utilizando o código, para as estações AMTE, RSCL e MAPA. A estação UBA1 apresentou valor máximo em torno de 0,04 m. A estação MAPA ficou em torno de 0,06 m. Os valores máximos foram observados durante a fase principal da tempestade. Os valores mínimos para todas as estações ficaram muito próximos a zero.

É interessante salientar a relação entre os valores observados para o efeito e o ângulo de elevação dos satélites. A medida que o ângulo de elevação diminui, observa-se o aumento do valor do efeito. Dessa forma, os valores máximos notados são para observações com os menores ângulos de elevação. As perdas de ciclo, identificadas em pontilhados, também são mais frequentes nos intervalos definidos pelo ângulo de elevação baixo, conforme pode ser visualizado na Figura 11. Tal análise é também adequada para o efeito de terceira ordem, como pode ser visto através da Figura 12 e Tabela 4.

Figura 12 – Variação diária do efeito de terceira ordem para a frequência L_2 com o código para o dia 17 de março de 2015 para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 4 – Efeitos de terceira ordem máximos e mínimos obtidos para as estações AMTE, RSCL, MAPA e UBA1.

	AMTE	RSCL	MAPA	UBA1
Máximos (m)	0,016	0,024	0,020	0,012
Mínimos (m)	1,01e-05	1,25e-05	3,34e-05	1,10e-05

Fonte: Os autores (2021).

O efeito de terceira ordem apresentou valores menores que os obtidos para o efeito de segunda ordem. As estações RSCL e MAPA apresentaram valor máximo em torno de 0,02 m. As estações AMTE e UBA1 ficaram próximos a 0,01 m, como pode ser visto na Figura 12 e Tabela 4. Os valores máximos do efeito de terceira ordem também foram observados durante a fase principal da tempestade. Os valores mínimos para todas as estações também ficaram muito próximos a zero.

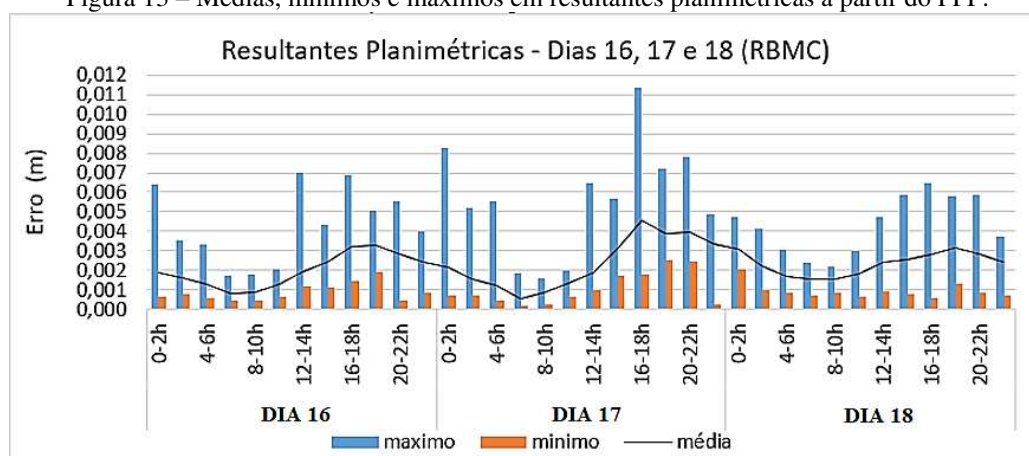
Conforme destacado na revisão de literatura deste trabalho, o efeito de segunda ordem para fase é reduzido por um fator 2 em relação ao código, onde o ângulo θ define o avanço ou atraso do sinal. Para o efeito de terceira ordem, esse fator é igual a 3. Essa relação entre os erros de segunda e terceira ordens no domínio das observações pode ser verificada por meio do Apêndice.

Alguns autores consideram o efeito do caminho do raio de curvatura (*The ray path bending*, ou *Ray Bending* - RB) ou ainda efeito da curvatura do sinal, como um componente dos efeitos HOI, como por exemplo Hernández-Pajares et al. (2014). Contudo, o *software* Bernese permite a correção do RB separadamente dos efeitos de segunda e terceira ordens (DACH et al., 2015). Nesta pesquisa, considerou-se como HOI apenas os efeitos de segunda e terceira ordens, assim como em Bassiri e Hajj (1993) e Odijk (2002). Após a estimativa e análise dos RB estimados com o Bernese, pode-se notar que seus efeitos podem ser negligenciados, não comprometendo, desta forma, as análises dos efeitos HOI. Os valores máximos obtidos para todas as estações estão na ordem de 10^{-4} (sub-milímetro).

5.3 Resultados e análises a partir do método PPP

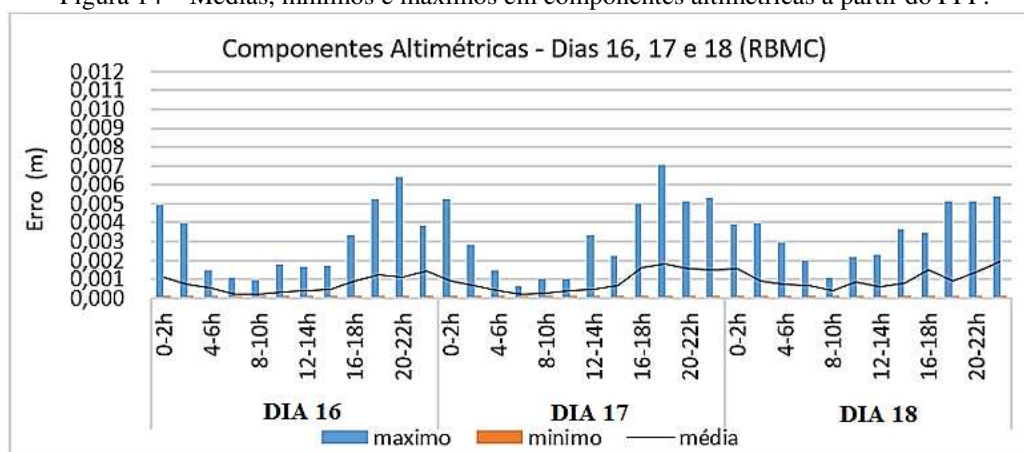
Os gráficos das Figuras 13 e 14 a seguir ilustram o erro devido a não consideração dos efeitos HOI, respectivamente em resultantes planimétricas e em componentes altimétricas (médias, mínimos e máximos) para o dia que antecede a tempestade (dia 16), dia da tempestade (dia 17) e o dia após a tempestade (dia 18).

Figura 13 – Médias, mínimos e máximos em resultantes planimétricas a partir do PPP.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 14 – Médias, mínimos e máximos em componentes altimétricas a partir do PPP.



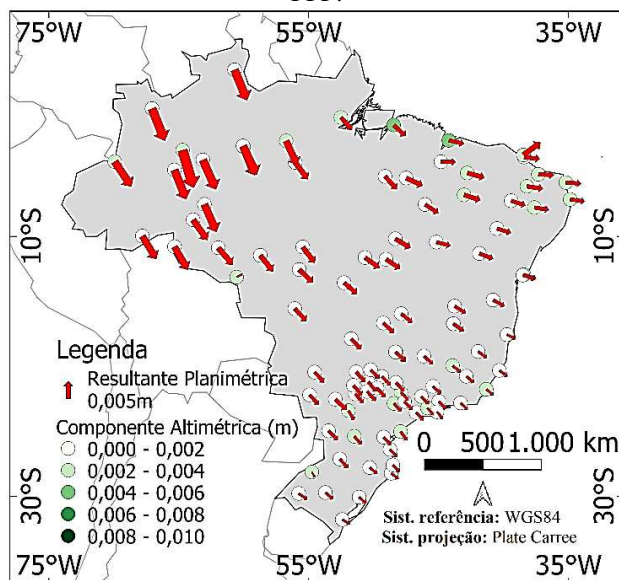
Fonte: Os autores (2021).

Através da Figura 13, pode-se notar que no dia 17 o valor máximo e a média do erro, no intervalo de 16 a 18h são os mais elevados se comparados aos demais intervalos analisados nos dias 16, 17 e 18. Nesse intervalo, o valor máximo do erro em resultantes planimétricas atinge aproximadamente 0,011 m (estação AMTE), o valor mínimo 0,002 m (estação RSCL) e o valor da média encontra-se em torno de 0,005 m. Os resultados em componentes altimétricas estão ilustrados na Figura 14, onde o valor máximo do erro (em torno de 0,007 m – estação MAPA) encontra-se no dia 17 no intervalo de 18 a 20h, com valor mínimo de 0,0001m (estação UBA1) e média próximo a 0,002 m. Destaca-se que os valores máximos para o erro na planimetria e na altimetria, foram observados durante a fase principal da tempestade. Vale ressaltar que a tempestade analisada ocorreu no período de alta atividade solar, e nesta época do ciclo é bastante comum a ocorrência do aumento do segundo pico da Anomalia Equatorial de Ionização (APPLETON, 1946), bem como a ocorrência de irregularidades no período noturno, a citar os efeitos de cintilação e bolhas ionosféricas.

É importante notar que os gráficos apresentados para o efeito de segunda ordem (Figura 11) estão correlacionados com os valores máximos e mínimos em resultantes planimétricas e componentes altimétricas, observados nas Figuras 13 e 14, onde podem ser identificadas as mesmas estações RBMC.

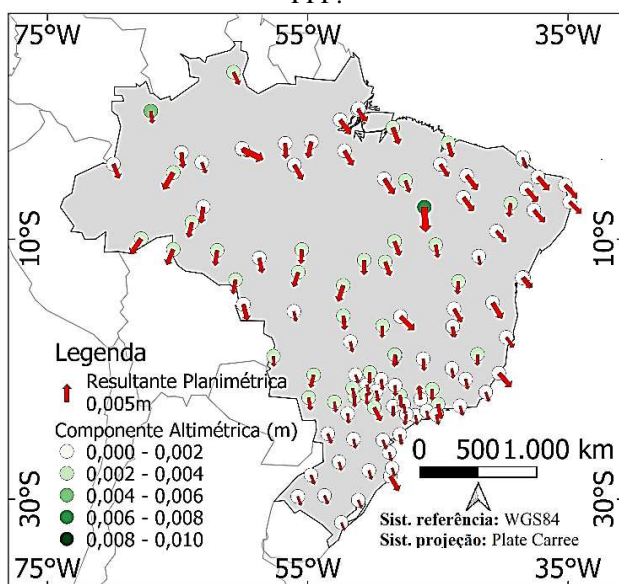
As Figuras 15 e 16 ilustram os efeitos HOI nas posições dos receptores, nos intervalos de 16 a 18h e 18 a 20h, que correspondem aos períodos onde foram notados os valores máximos para o erro na planimetria e na altimetria, respectivamente.

Figura 15 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 16 e 18h, utilizando o PPP.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 16 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 18 a 20h, utilizando o PPP.

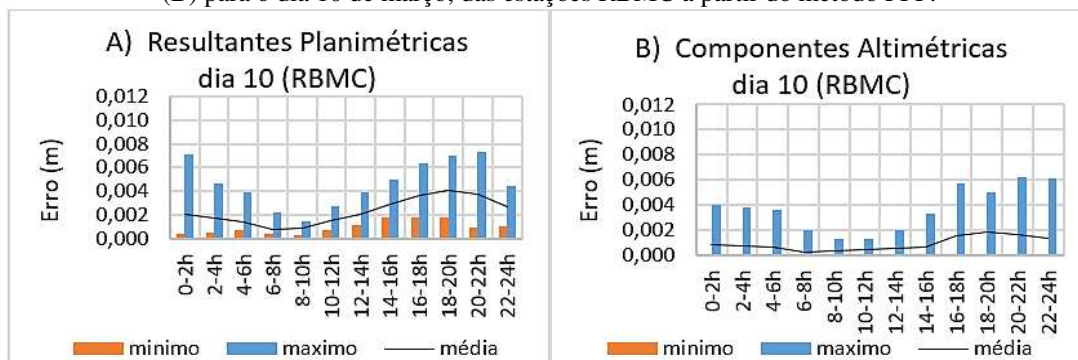


Fonte: Os autores (2021).

Nas Figuras 15 e 16, as setas vermelhas indicam o erro em resultantes planimétricas. O erro em componentes altimétricas é indicado pela escala de cores verde. Na planimetria, o efeito mais significativo ocorre no intervalo entre 16 e 18h (Figura 15) para as estações localizadas a noroeste do Brasil, onde os valores do erro são provavelmente próximos a 0,01 m. Na altimetria, o valor máximo foi observado no intervalo entre 18 e 20h (Figura 16). O impacto mais visível mostra uma tendência direcional no sentido norte-sul.

Serão apresentados os erros obtidos para o dia 10 de março (Figuras 17A e 18B) e comparados aos dias 16, 17 e 18 de março. Neste dia 10 o índice Dst variou de 3 a 11 nT, sendo o que menos variou durante todo o mês de março.

Figura 17 – Médias, mínimos e máximos das resultantes planimétricas (A) e componentes altimétricas (B) para o dia 10 de março, das estações RBMC a partir do método PPP.



Fonte: Os autores (2021).

Através da Figura 17 (A e B), que ilustra os erros para o dia 10 na planimetria e altimetria respectivamente, percebe-se que o erro na planimetria (Figura 17A) tende a aumentar após as 12h, atingindo o valor máximo em torno de 0,007 m (no intervalo de 20 a 22h) e maior média obtida com valor próximo a 0,004 m, no intervalo de 18 a 20h. Na altimetria (Figura 17B), os valores máximos do erro e a curva das médias apresentam-se de modo geral menos elevados do que na planimetria (com maior valor máximo e média obtidos em torno de 0,006 e 0,002 m respectivamente). Os valores mínimos obtidos para o erro em resultantes planimétricas (Figura 17A) apresentam-se mais elevados ao longo de todo o dia se comparados ao erro em componentes altimétricas (Figura 17B).

Foram também calculados os coeficientes de correlação de postos de Spearman dos erros entre o dia 10 e os demais dias, para todas as estações RBMC, como mostram as Tabelas 5 (em resultantes planimétricas) e 6 (em componentes altimétricas).

O coeficiente de correlação de postos de Spearman é uma medida não paramétrica de correlação de postos (dependência estatística entre a classificação de duas variáveis), que avalia a intensidade da relação entre duas variáveis. A correlação de Spearman avalia relações monótonas, sejam elas lineares ou não (SPEARMAN, 1904; KENDALL et al., 1990). Dessa forma, o coeficiente de Spearman é apropriado tanto para variáveis contínuas, como para variáveis discretas, incluindo variáveis ordinais (LEHMAN et al., 2013).

Os coeficientes de correlação foram calculados com o código *python* utilizando a função “spearmanr”, da biblioteca “scipy”. Informações adicionais, como as equações implementadas, podem ser adquiridas através do endereço <https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.stats.spearmanr.html>.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação do erro em resultantes planimétricas entre o dia 10 e os dias 16, 17 e 18 de março, das estações RBMC a partir do método PPP.

DIAS	0-14h	14-24h	0-24h
10/16	86%	81%	91%
10/17	87%	70%	90%
10/18	69%	72%	65%

Fonte: Os autores (2021).

De acordo com a Tabela 5, pode-se notar que há uma associação positiva e forte entre as variáveis do dia 10 em relação aos demais dias. Entretanto, destaca-se que a correlação começa a diminuir (enfraquecer) no dia 17 entre 14 e 24h (que contempla a fase principal da tempestade)

apresentando 70% de correlação. Essa diminuição da correlação pode ainda ser percebida no dia 18 (fim da fase principal e fase de recuperação). No intervalo de 0-24h a maior correlação é de 91%, entre os dias 10 e 16 de março, que são os dois dias mais calmos de acordo com o índice Dst, se comparados aos demais dias analisados. O mesmo não pode ser identificado em relação às componentes altimétricas (Tabela 6).

Tabela 6 – Coeficientes de correlação do erro em componentes altimétricas entre o dia 10 e os dias 16, 17 e 18 de março, das estações RBMC a partir do método PPP.

DIAS	0-14h	14-24h	0-24h
10/16	33%	31%	42%
10/17	35%	52%	50%
10/18	24%	5%	25%

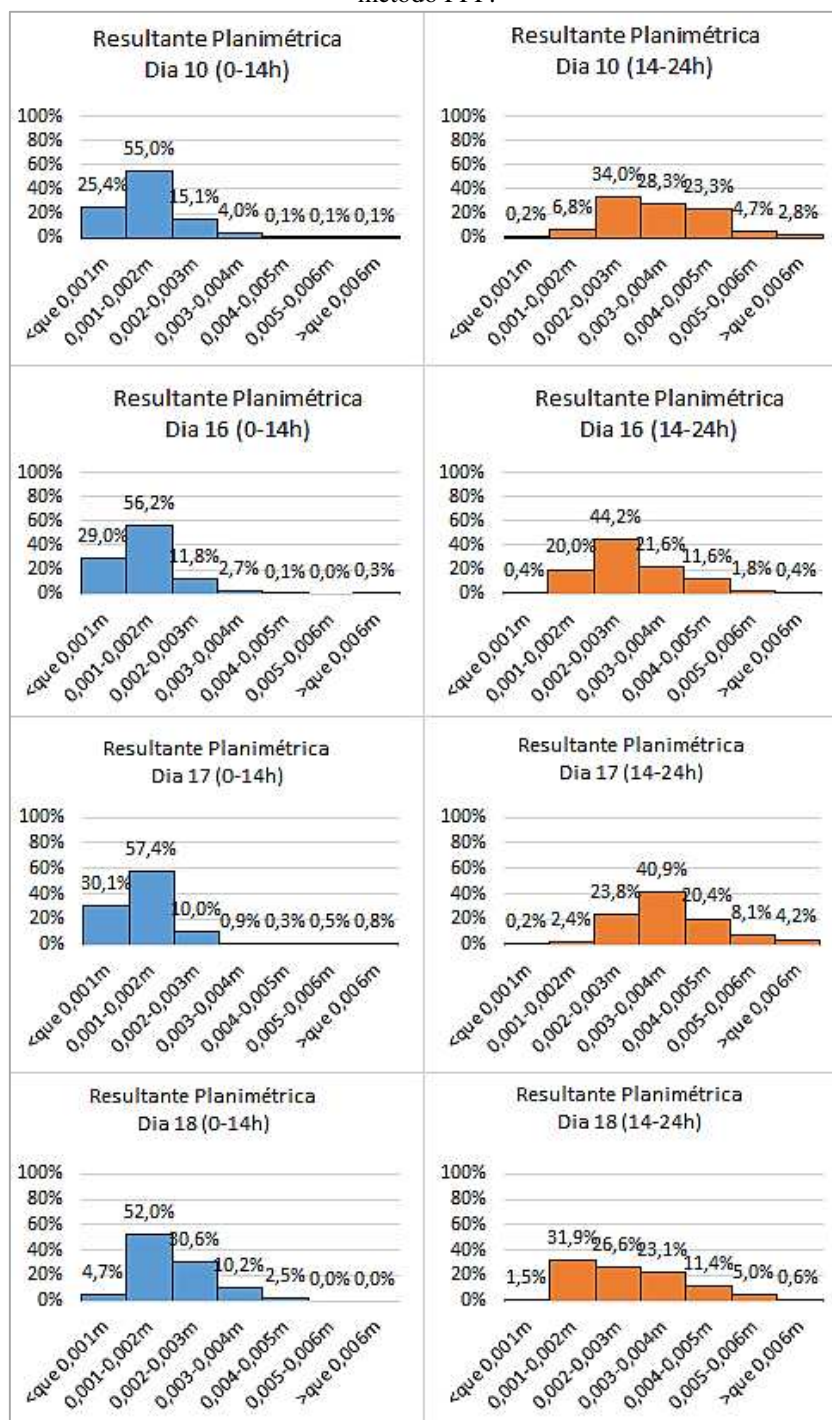
Fonte: Os autores (2021).

Como pode ser visto na Tabela 6, a associação entre as variáveis do dia 10 é positiva em relação aos demais dias, porém não é forte como a correlação do erro em resultantes planimétricas (Tabela 5). Destaca-se a correlação considerada fraca entre os dias 10 e 18, apresentando apenas o valor de 5% entre 14 e 24h.

As análises das Figuras 13 e 14, bem como as correlações apresentadas nas Tabelas 5 e 6, evidenciam que o erro devido a não consideração dos efeitos HOI possa sofrer influência durante a ocorrência da tempestade geomagnética, o que está de acordo com trabalhos de outros autores como em Elmas et al. (2011), que estudaram a influência de tempestades geomagnéticas nos efeitos HOI e no posicionamento GNSS para a região europeia. Concluíram que durante a Tempestade de *Halloween* em 2003, as correções dos efeitos HOI tiveram magnitudes, ao nível milimétrico e poucas ao nível centimétrico. Em Cai et al. (2019), onde também foi feito um estudo envolvendo os efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas, concluíram que a ocorrência de tempestades geomagnéticas aumenta ainda mais os efeitos HOI a nível milimétrico.

Os histogramas da Figura 18 a seguir, representam a frequência com que o valor da classe ocorre no conjunto de dados, ou seja, a frequência com que o erro na planimetria ocorre para os dias 10, 16, 17 e 18 de março, separados nos intervalos de 0 a 14h e 14 a 24h, das estações RBMC a partir do método PPP.

Figura 18 – Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre, para os dias 10, 16, 17 e 18 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas, das estações RBMC a partir do método PPP.



Fonte: Os autores (2021).

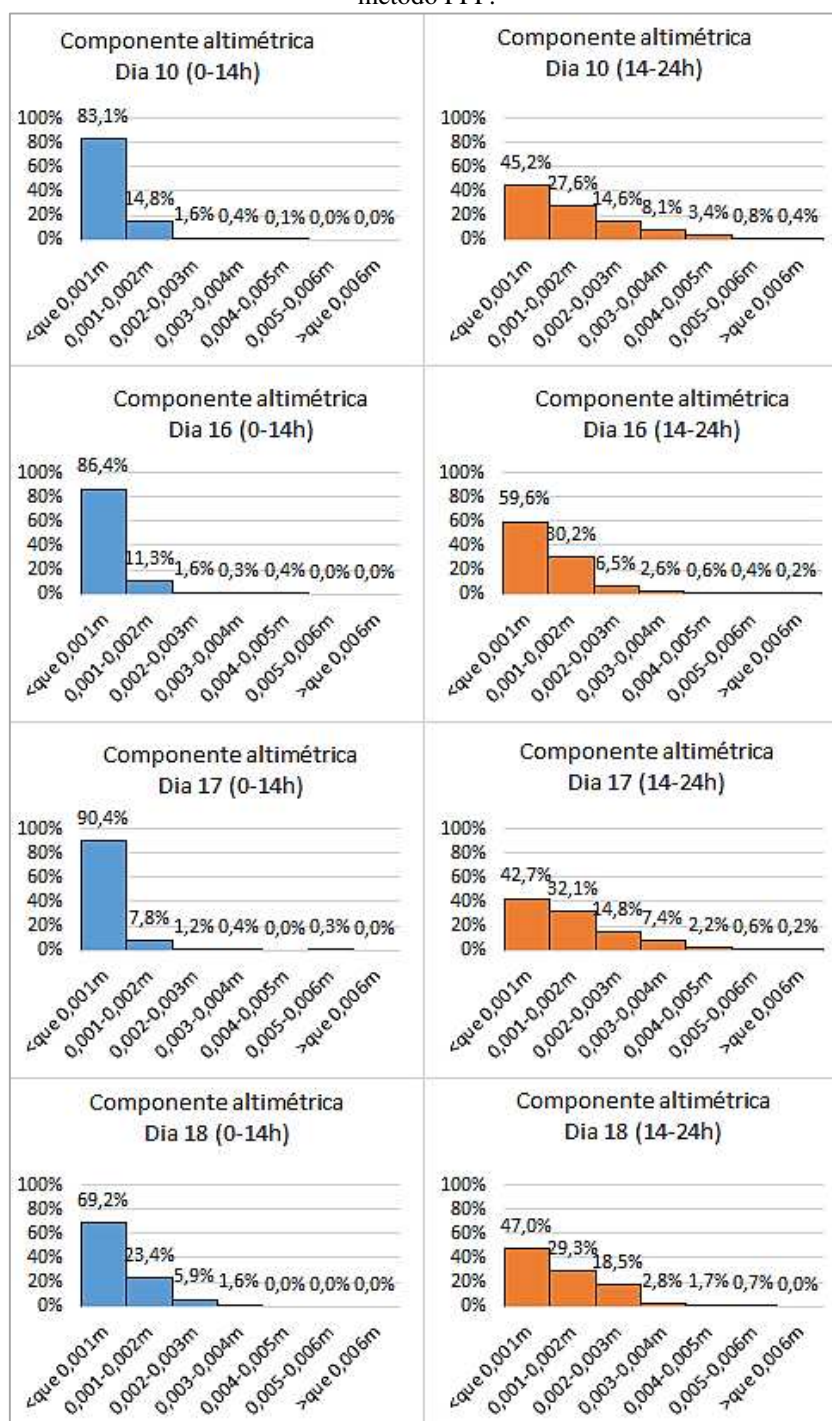
De acordo com a Figura 18, nota-se que para os dias 10, 16 e 17 no período de 0 a 14h, mais de 80% dos valores obtidos para o erro (em resultantes planimétricas) encontram-se menores do que 0,002 m, ao passo que no dia 18, obteve-se 56% dos valores menores que 0,002 m.

No período de 14 a 24h do dia 10, em torno de 7% dos erros estão abaixo de 0,002 m. Já para o dia 16, cerca de 20% dos valores obtidos para o erro estão abaixo de 0,002 m. No dia 17 (14 a 24h) menos de 3% dos erros encontram-se abaixo de 0,002 m. No entanto, destaca-se que

para este dia a maior concentração dos resultados (40,9%) estão no intervalo entre 0,003 e 0,004 m, ao passo que nos outros dias analisados a maioria dos resultados se encontra no intervalo entre 0,002 e 0,003 m. No dia 18, cerca de 33% dos erros encontram-se abaixo de 0,002 m.

De forma análoga aos histogramas de frequência do erro em resultantes planimétricas (Figura 18), serão apresentados na Figura 19 os histogramas para componentes altimétricas.

Figura 19 – Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre, para os dias 10, 16, 17 e 18 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas, das estações RBMC a partir do método PPP.

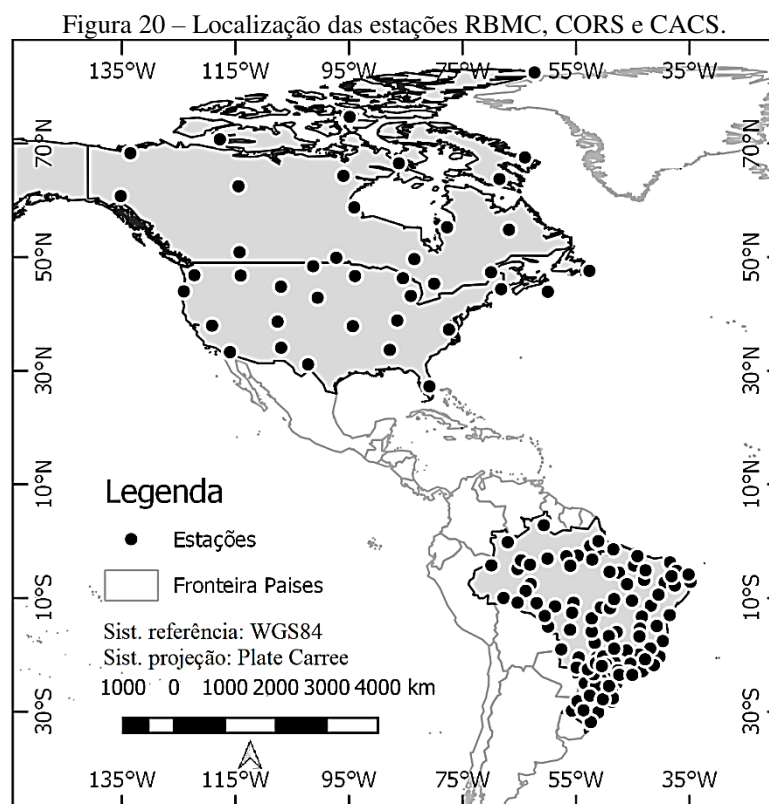


Fonte: Os autores (2021).

De acordo com a Figura 19, nota-se que para os dias 10, 16 e 17 no período de 0 a 14h, pelo menos 90% dos valores obtidos para o erro (em componentes altimétricas) encontram-se menores do que 0,001 m. No dia 18, esse valor diminui para 69,2%. No período de 14 a 24h, para os 4 dias analisados, a maioria dos resultados estão abaixo de 0,002 m, concentrados em sua maior parte em valores menores que 0,001 m.

Portanto, conclui-se que a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 influenciou no aumento do erro devido a não consideração dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP, em sua maior parte a nível milimétrico, principalmente durante as fases principal e de recuperação. Enfatiza-se que essa conclusão se baseia em resultados a partir das estações RBMC, localizadas em sua maioria na região equatorial.

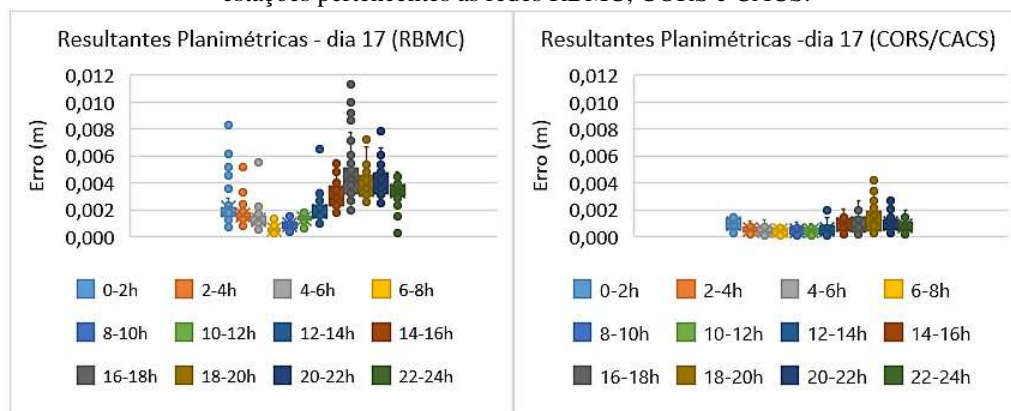
Os resultados já apresentados (do dia 17) das estações RBMC serão a seguir, comparados aos resultados de processamentos de arquivos de observação RINEX de 40 estações ativas pertencentes à rede *Continuously Operating Reference Station* (CORS) - cujos dados e informações detalhadas encontram-se disponíveis no endereço eletrônico <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/data.shtml>, bem como à rede canadense *Canadian Active Control System* (CACS) - com dados disponibilizados no endereço <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/data-donnees/cacs-scca.php?locale=en>, para o mesmo dia. A Figura 20 ilustra a localização das estações RBMC, CORS e CACS utilizadas.



Fonte: Os autores (2021).

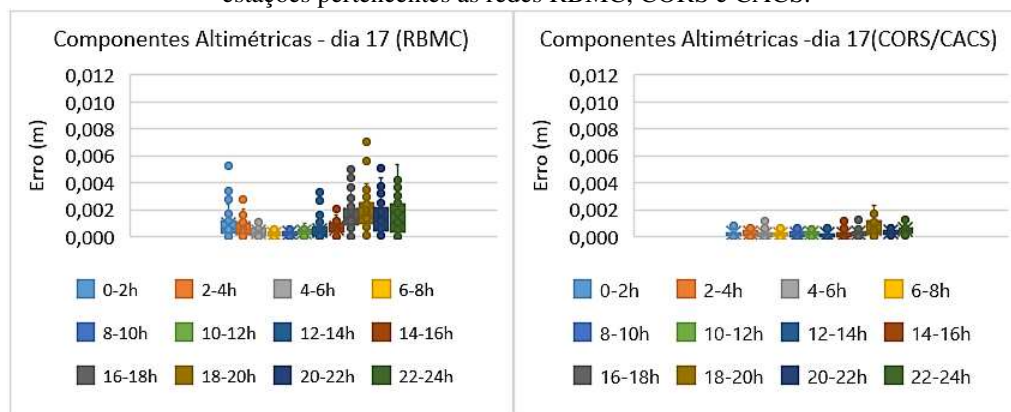
As Figuras 21 e 22 apresentam a comparação entre os resultados por meio de gráficos *boxplot*.

Figura 21 – Gráficos *boxplot* do erro em resultantes planimétricas ao longo do dia 17 de março, nas estações pertencentes as redes RBMC, CORS e CACS.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 22 – Gráficos *boxplot* do erro em componentes altimétricas ao longo do dia 17 de março, nas estações pertencentes as redes RBMC, CORS e CACS.



Fonte: Os autores (2021).

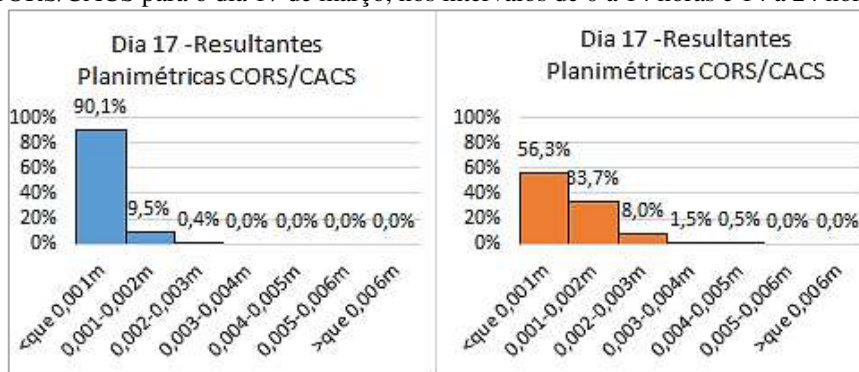
De acordo com as Figuras 21 e 22, nota-se que ao longo do dia o erro na planimetria e na altimetria, em geral, é maior para as estações da RBMC quando comparado ao erro obtido para as estações pertencentes às redes CORS e CACS. Embora a magnitude do erro aumente no período da tarde (após as 12h) tanto para estações localizadas no Brasil quanto para as demais, ainda assim os valores máximos alcançados para as estações CORS e CACS são significativamente menores.

Destaca-se o intervalo de 16 a 18h, em que a média do erro em resultantes planimétricas, nas estações do Brasil, está em torno de 0,005 m e o valor máximo próximo a 0,011 m e média do erro em torno de 0,002 m e valor máximo próximo a 0,007 m em componentes altimétricas (intervalo entre 18 a 20h), estão significativamente maiores que os valores de erros das estações CORS e CACS, que por sua vez alcançam seus máximos no intervalo de 18 a 20h, com seus valores máximos em torno de 0,004 m na planimetria e 0,002 m na altimetria e as médias dos erros próximas a 0,001 m. Dessa forma, durante a ocorrência da tempestade pode-se perceber que a variabilidade dos dados aumenta mais nas estações do Brasil do que nas estações CORS e CACS e o erro em geral é menor e mais consistente (menor variabilidade) nas estações CORS e CACS.

As figuras 23 e 24 mostram os histogramas de frequência do erro (em resultantes planimétricas e componentes altimétricas) das estações CORS e CACS no dia 17. Pode-se notar que cerca de 90% dos erros na planimetria estão menores que 0,001 m no período de 0 a 14h, e

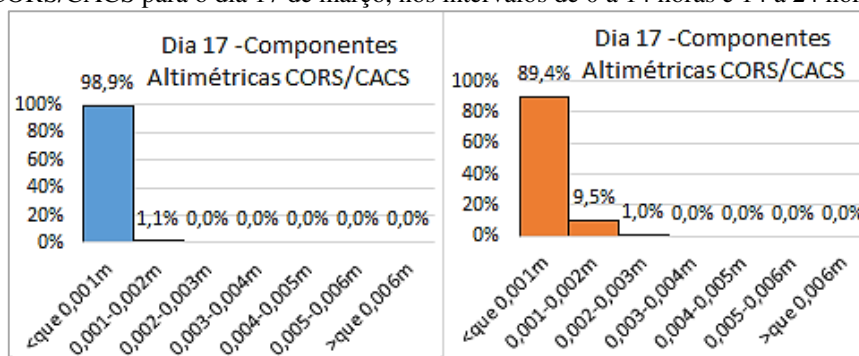
menores que 0,002 m no período de 14 a 24h (Figura 23). Já na altimetria (Figura 24), no período de 0 a 14h, mais de 98% dos erros é menor que 0,001 m, e entre 14 e 24h cerca de 99% dos erros encontra-se abaixo de 0,002 m.

Figura 23 – Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre nas estações CORS/CACS para o dia 17 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 24 – Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre nas estações CORS/CACS para o dia 17 de março, nos intervalos de 0 a 14 horas e 14 a 24 horas.



Fonte: Os autores (2021).

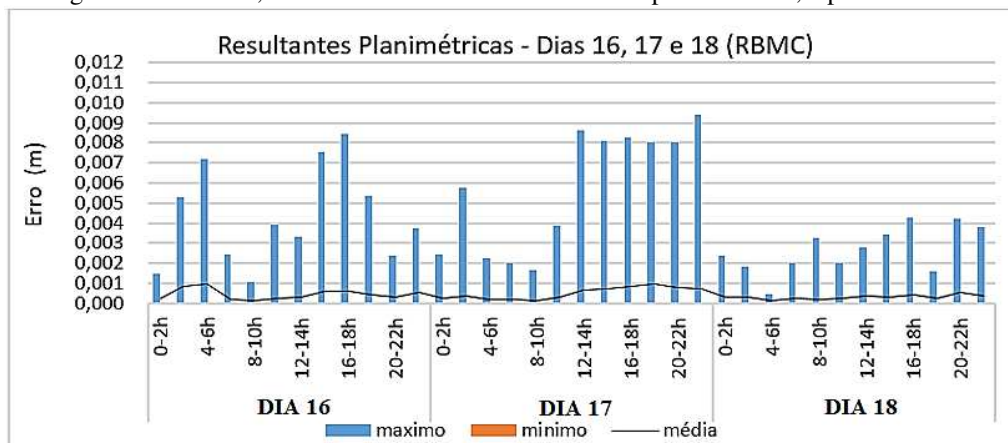
Comparando os histogramas das Figuras 19 e 20 (dia17) com as Figuras 23 e 24, fica evidente como as estações da RBMC tiveram o erro mais significativo do que as estações pertencentes às redes CORS e CACS, no período de ocorrência da tempestade geomagnética. Dessa forma, os efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP foram mais intensos na região equatorial do que nas regiões de latitudes médias e de altas latitudes.

Uma provável explicação para o comportamento desses resultados seria a presença das anomalias, que alteram a concentração de elétrons na ionosfera. Como na América do Sul há a influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e da anomalia equatorial, a ionosfera acaba tendo um comportamento diferente das demais regiões do planeta. Outro evento agravante seria o surgimento das bolhas de irregularidades, que podem proporcionar nos sinais de rádio o efeito da Cintilação Ionosférica (JOHNSON, 1965), (DAVIES, 1990) (WANNINGER, SEEGER e CAMPOS, 1991 e 1992). Conforme verificado em estudos anteriores, a citar Burke et al. (2004), Su, Chao e Liu (2008) e Carter et al. (2013), espera-se que a ocorrência de bolhas de plasma equatorial (*Equatorial Plasma Bubble – EPB*) durante o mês de março seja relativamente alta sobre a América do Sul e o Sudeste Asiático.

5.4 Resultados e análises a partir do método PRE

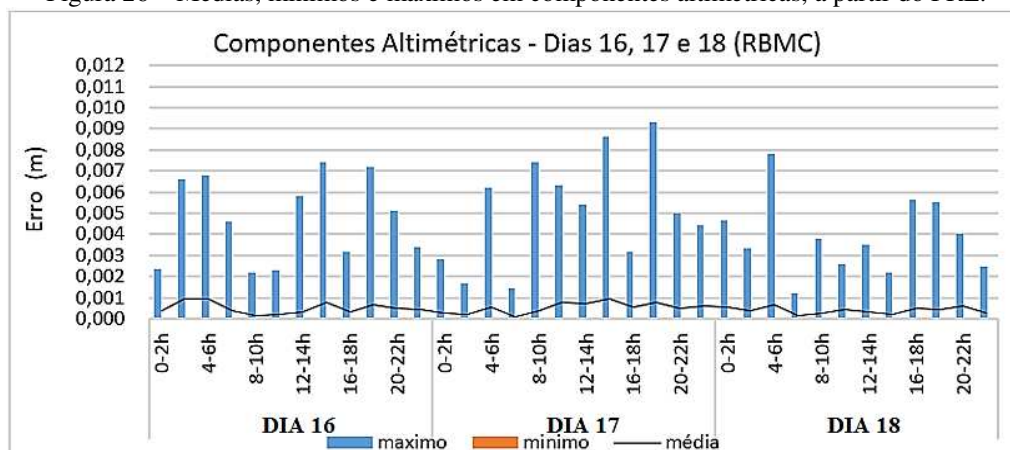
Analogamente aos resultados obtidos a partir do método PPP (Figuras 13 e 14), tem-se os resultados a partir do PRE utilizando estações RBMC, apresentados através das Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Médias, mínimos e máximos em resultantes planimétricas, a partir do PRE.



Fonte: Os autores (2021).

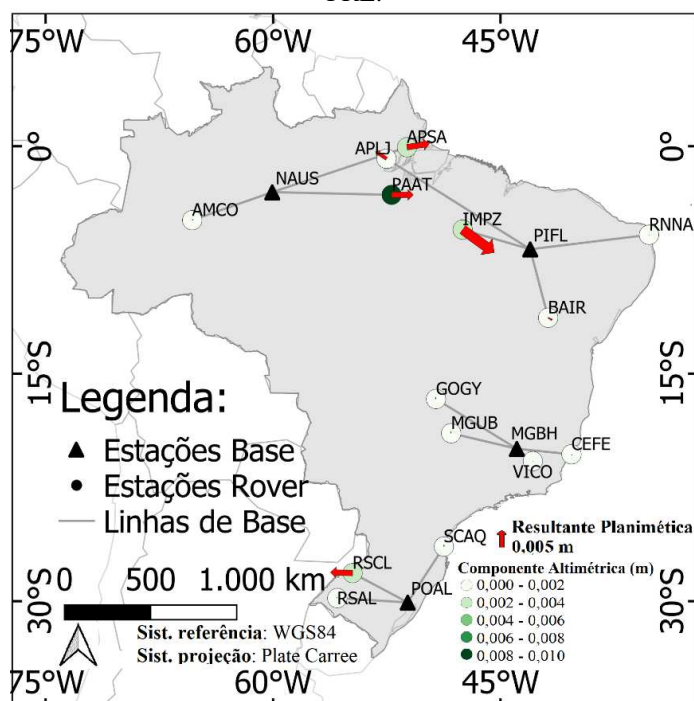
Figura 26 – Médias, mínimos e máximos em componentes altimétricas, a partir do PRE.



Fonte: Os autores (2021).

Como pode ser visto nas Figuras 25 e 26, os resultados obtidos a partir do PRE não apresentaram comportamento similar aos apresentados a partir do método PPP (Figuras 13 e 14). Contudo, destaca-se o aumento dos valores máximos na planimetria (Figura 25) para o dia 17 após as 12h. Na altimetria (Figura 26), o maior valor máximo pode ser observado também no dia 17, no intervalo de 18 a 20h. Tanto em resultantes planimétricas quanto em componentes altimétricas, os valores máximos para o erro aproximaram-se de 0,009 m. As médias do erro apresentaram-se mais constantes ao longo do dia, alcançando valores em torno de 0,001 m. A Figura 27 ilustra os efeitos HOI nas posições dos receptores, no intervalo de 18 a 20h.

Figura 27 – Efeitos HOI nas posições dos receptores no dia 17 de março, entre 18 e 20h, utilizando o PRE.



Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 27, as setas vermelhas indicam o erro em resultantes planimétricas. O erro em componentes altimétricas é indicado pela escala de cores verde. É possível notar que a tendência direcional do vetor das resultantes planimétricas foi afetada não somente pelas variações do campo geomagnético, que são maiores no sentido norte-sul (BASSIRI e HAJJ, 1993), mas também pela direção da linha de base.

A Tabela 7 apresenta os valores de erro máximo e médias máximas obtidas a partir dos métodos PPP e PRE utilizando estações RBMC.

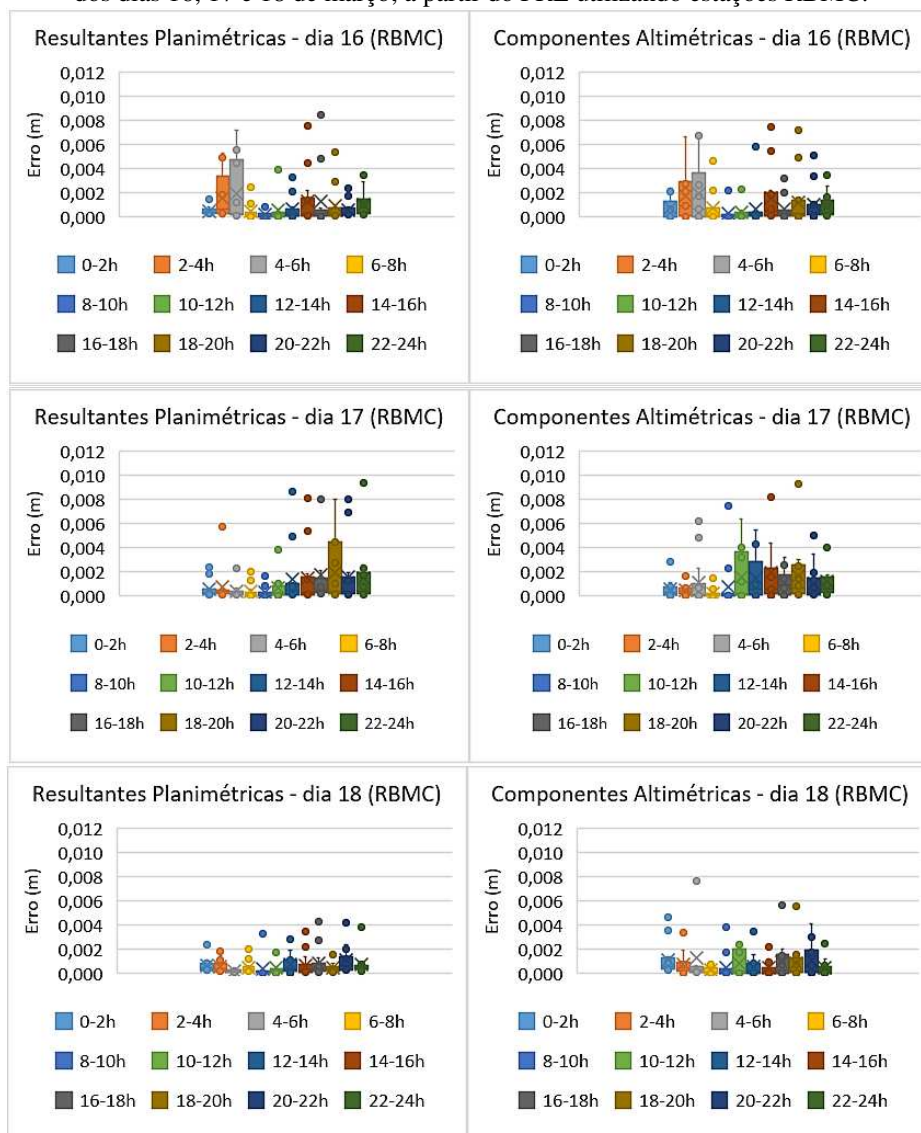
Tabela 7 – Valores de erro máximo e médias máximas obtidas a partir dos métodos PPP e PRE utilizando estações RBMC

		PPP	PRE
Resultantes Planimétricas	Valores máximos (m)	0,011	0,009
	Médias máximas (m)	0,005	0,001
Componentes Altimétricas	Valores máximos (m)	0,007	0,009
	Médias máximas (m)	0,002	0,001

Fonte: Os autores (2021).

De acordo com a Tabela 7, nota-se que a diferença entre os valores máximos e as médias máximas obtidas a partir do PRE é mais acentuada que as obtidas a partir do método PPP. A Figura 28 apresenta os gráficos *boxplot* do erro na planimetria e na altimetria, dos resultados obtidos no PRE utilizando estações RBMC, para os dias 16, 17 e 18 de março.

Figura 28 – Gráficos *boxplot* do erro em resultantes planimétricas e componentes altimétricas ao longo dos dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE utilizando estações RBMC.

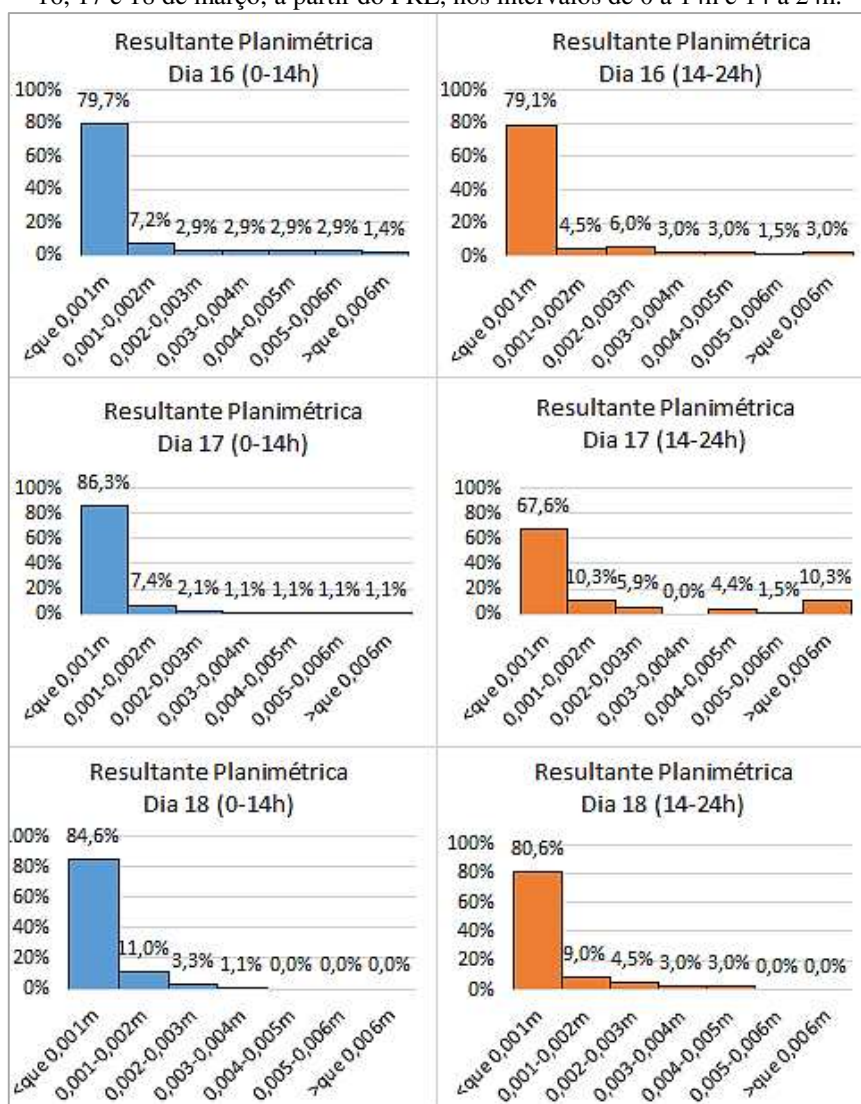


Fonte: Os autores (2021).

Comparando os resultados do PPP (Figura 21 e 22) com o PRE (Figura 28) em relação ao dia 17, nota-se que, na planimetria, durante a fase principal da tempestade a variabilidade dos dados aumenta mais nos resultados do PPP e o erro em geral é menor e mais consistente para os resultados do PRE (com exceção do pico que ocorre entre 18-20h). Na altimetria, os máximos no PPP se destacam durante a fase principal da tempestade (a partir das 16h), contudo no PRE os máximos são observados a partir das 10h da manhã, tendendo a diminuir ao longo do dia.

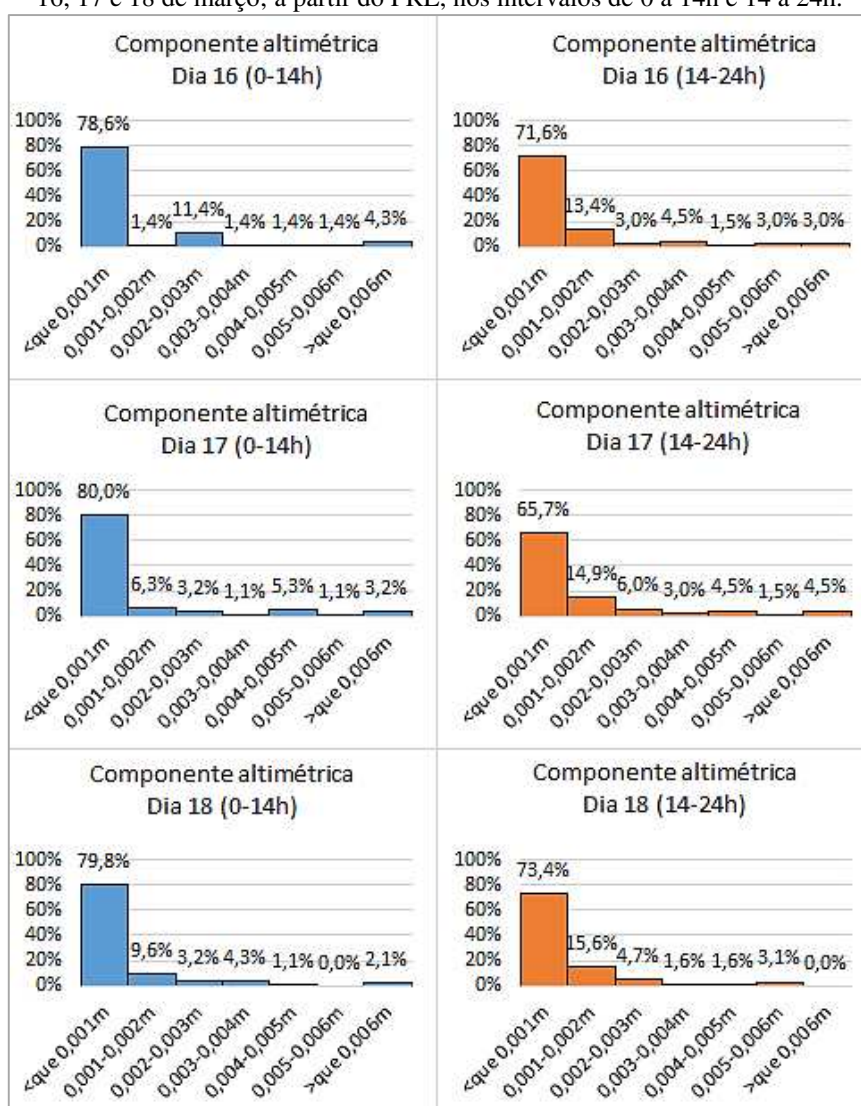
As Figuras 29 e 30 ilustram os histogramas de frequência do erro para os dias 16, 17 e 18 de março, elaborados a partir dos resultados advindos do PRE utilizando estações RBMC.

Figura 29 – Histogramas de frequências com que o erro em resultantes planimétricas ocorre, para os dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE, nos intervalos de 0 a 14h e 14 a 24h.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 30 – Histogramas de frequências com que o erro em componentes altimétricas ocorre, para os dias 16, 17 e 18 de março, a partir do PRE, nos intervalos de 0 a 14h e 14 a 24h.



Fonte: Os autores (2021).

É interessante notar que, em todos os histogramas das Figuras 29 e 30, a maioria dos resultados apresentados revelam que o erro é menor que 0,001 m.

Além disso, deve-se enfatizar que no PRE o erro foi maior no período da manhã quando comparado aos resultados do PPP (Figuras 18 e 19).

6. CONCLUSÕES

Os valores máximos para os efeitos de segunda e terceira ordens no domínio das observações foram identificados no dia 17 de março, no intervalo que contempla a fase principal da tempestade. O efeito foi maior no código e menor na fase. Dessa forma, o efeito de segunda ordem atingiu valor máximo em torno de 0,05 m e o efeito de terceira ordem, cerca de 0,02 m, para a frequência L_2 utilizando o código. Utilizando a fase, os efeitos de segunda e terceira ordens alcançaram valores próximos a 0,02 e 0,007 m, respectivamente. Os resultados obtidos podem ser comparados aos de Hernández-Pajares et al. (2014), que mostraram que o efeito de segunda ordem na faixa L, alcançou valores de até 0,02 m. Os autores Morton, Zhou e Van Graas (2009) também

apresentaram resultados passíveis de comparação, onde observaram que os efeitos de segunda ordem da ionosfera em observáveis GPS para a frequência L_1 , alcançaram máximos em torno 0,03 m.

Os efeitos no domínio do posicionamento foram menores do que no domínio das observações. No PPP, o erro devido a não consideração dos efeitos HOI alcançou valor máximo e média de aproximadamente 0,011 m e 0,005 m na planimetria, e valor máximo e média em torno de 0,007 m e 0,002 m na altimetria, observados durante a fase principal da tempestade geomagnética. O impacto mais visível mostra uma tendência direcional no sentido norte-sul. Enfatiza-se que os valores máximos e mínimos na planimetria e na altimetria foram obtidos a partir das mesmas estações em que foram detectados os valores máximos para o efeito de segunda ordem no dia da tempestade. No PRE, o valor máximo do erro foi em torno de 0,009 m e média cerca de 0,001 m, na planimetria e na altimetria.

Comparando os resultados do PPP com o PRE em relação ao dia 17, nota-se que, na planimetria, durante a fase principal da tempestade a variabilidade dos dados aumenta mais nos resultados do PPP e o erro em geral é menor e mais consistente nos resultados do PRE (com exceção do pico que ocorre entre 18 e 20h). Na altimetria, os máximos no PPP se destacam durante a fase principal da tempestade (a partir das 16h), contudo no PRE os máximos são observados a partir das 10h da manhã, tendendo a diminuir ao longo do dia. As médias do erro no PRE, apresentaram-se mais constantes ao longo dos dias, alcançando valores em torno de 0,001 m. À vista disso, mesmo considerando que as linhas de base processadas são longas (menor comprimento igual a 142 km), o processo de duplas diferenças das observáveis GNSS foi eficiente para minimizar os efeitos HOI. Uma vez que os efeitos de segunda ordem são dados em função do vetor indução geomagnética e as variações do campo geomagnético são maiores no sentido norte-sul (BASSIRI e HAJJ, 1993), foi possível notar que não somente as linhas de força do campo geomagnético influenciaram a direção dos vetores das resultantes planimétricas, mas também a direção das linhas de base formadas no PRE.

Foi percebido que as estações localizadas no Brasil (pertencentes à RBMC), tiveram o erro devido a não consideração dos efeitos HOI pouco maiores (a nível milimétrico) do que as estações pertencentes às redes CORS e CACS, o que se justifica pelo fato do Brasil possuir grande parte de sua área localizada na região equatorial, muito afetada por efeitos ionosféricos principalmente em períodos de alta atividade ionosférica, no qual ocorrem muitas irregularidades como a anomalia equatorial, que exerce grande influência nas variações temporais e espaciais do TEC na região brasileira, ao contrário de regiões de latitude médias, onde se encontram as estações CORS e boa parte das estações CACS utilizadas neste experimento. À vista disso, futuramente, pretende-se analisar a correlações entre os efeitos HOI e os índices ionosféricos e geomagnéticos, tais como os índices de irregularidades ($F_p, I_{ROT}, ROTI$) e de cintilação ionosférica ($S4, \sigma\phi$) para os resultados obtidos na data da tempestade analisada.

Em resultantes planimétricas, a média do erro nas estações do Brasil está em torno de 0,005 m e o valor máximo próximo a 0,011 m e média do erro em torno de 0,002 m e valor máximo próximo a 0,007 m em componentes altimétricas, pouco maiores que os valores de erros das estações CORS e CACS, que por sua vez alcançaram seus máximos em torno de 0,004 m na planimetria e 0,002 m na altimetria e as médias dos erros próximas a 0,001 m. Dessa forma, durante a fase principal da tempestade, nota-se que a variabilidade dos dados aumenta mais nas estações do Brasil do que nas estações CORS e CACS, onde o erro em geral é menor e mais consistente.

Conclui-se que a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015

influenciou no aumento do erro devido a não consideração dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP, em sua maior parte a nível milimétrico, principalmente durante a fase principal da tempestade. Outros autores tiveram conclusões similares, como Elmas et al. (2011) que estudaram a influência a Tempestade de *Halloween* em 2003 nos efeitos HOI no domínio das observações e do posicionamento GNSS e concluíram que durante a Tempestade as correções dos efeitos HOI tiveram magnitudes ao nível milimétrico e poucas ao nível centimétrico. Em Cai et al. (2019), também foi feito um estudo envolvendo os efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas e concluíram que a ocorrência de tempestades geomagnéticas aumenta ainda mais os efeitos HOI a nível milimétrico.

Ressalta-se que as conclusões deste trabalho se baseiam em uma tempestade classificada com intensa. Neste sentido, conforme concluíram Xiaomin et al. (2018), o nível de degradação dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP geralmente depende da intensidade da tempestade e, portanto, resultados divergentes do presente trabalho podem ser encontrados, caso sejam realizados durante a ocorrência de tempestades de intensidades diferentes.

Referências

- APPLETON, E.V. **Two anomalies in the ionosphere**. Nature, v.157, 691, 1946.
- ASTAFYEVA, E.; YASYUKEVICH, Y.; MAKSIKOV, A.; ZHIVETIEV, I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. **Space Weather** 2014, 12, 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>.
- BASSIRI S & HAJJ GA. 1993. **Higher-order ionospheric effects on the global positioning systems observables and means of modeling them**. Manuscr. Geod., 18: 280–289.
- BECKER-GUEDES, F., SAHAI Y., FAGUNDES, P. R., ESPINOZA E. S., PILLAT V. G., LIMA W. L. C., BASU SU., OTSUKA Y., SHIOKAWA K., MACKENZIE E. M., PI W., BITTENCOURT J. A. The ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003. **Annales Geophysicae**, v 25. p 863-873, 2007.
- BOWRING, B.R. **Transformation from spatial to geographical coordinates**. Survey Review, XXIII, 181, July, 1976.
- BRUNNER, F.; GU, M. **An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observation**, Manuscr. Geod., v. 16, p. 205-214, jan. 1991.
- BUONSANTO, M. J. (1999), Ionospheric Storm – A review, Space Sci. Rev., 88, 563–601.
- BURKE, W. J., L. C. GENTILE, C. Y. HUANG, C. E. VALLADRES, and S. Y. SU (2004), Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1, **J. Geophys. Res.**, 109, A12301, doi:10.1029/2004JA010583.
- CAI, C., LIU, G., YI, Z., CUI, X. and KUANG, C. (2019). Effect analysis of higher-order ionospheric corrections on quad-constellation GNSS PPP. **Meas. Sci. Technol.** 30 02400.1
- CARTER, B. A., K. ZHANG, R. NORMAN, V. V. KUMAR, and S. KUMAR (2013), On the occurrence of equatorial F-region irregularities during solar minimum using radio occultation measurements, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 118, 892– 904, doi:10.1002/jgra.50089.
- CARTER, B.A.; YIZENGAW, E.; PRADIPTA, R.; RETTERER, J.M.; GROVES, K.; VALLADARES, C.; CATON, R.; BRIDGWOOD, C.; NORMAN, R.; ZHANG, K. Global equatorial plasma bubble occurrence during the 2015 St. Patrick’s Day storm. **J. Geophys. Res. A Space Phys.** 2016, 121, 894–905. <https://doi.org/10.1002/2015JA022194>.

- CHERNIAK, I., ZAKHARENKOVA, I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: a case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. **Earth Planet Sp** 67, 151 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0316-x>.
- DACH, R., S. LUTZ, P. WALSER, P. FRIDEZ (Eds); 2015: **Bernese GNSS Software Version 5.2**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- ELMAS, Z. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G. Higher order ionospheric effects in GNSS positioning in the European region. **Ann. Geophys.**, 29, 1383–1399, DOI:10.5194/angeo-29-1383-2011, 2011.
- EMBRACE. **Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/tec-map-inicio/>>. Acesso em: janeiro de 2019.
- FRITSCH, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates, **Geophysical Research Letters**, v. 32, L23311, DOI:10.29/2005GL024342, 2005.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994.
- GONZALEZ, W.D.; TSURUTANI, B.T.; GONZALEZ, A.L.C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Science Reviews**, v.88, p.529–562, 1999.
- HADAS, T.; KRYPIAK-GREGORCZYK, A.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; KAPŁON, J.; PAZIEWSKI, J.; WIELGOSZ, P.; GARCÍA-RIGO, A.; KAZMIERSKI, K.; SOŚNICA, K.; KWASNIAK, D.; et al. Impact and Implementation of Higher-Order Ionospheric Effects on Precise GNSS Applications. **J. Geophys. Res. Solid Earth** 2017, 122, 9420–9436
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, À.; DEFRAIGNE, P.; BERGEOT, N.; PRIETO-CERDEIRA, R.; GARCÍA-RIGO, A. (2014). Distribution and mitigation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS processing. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 119(4), 3823-3837.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN J.M.; SANZ, J.; ORÚS, R.; SALAZAR, D. 2005. **Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning** (Summary). Barcelona, Spain. Research group of Astronomy and Geomatics – Technical University of Catalonia, 23 p.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, H. M.; JUAN, J.; SANZ, J.; ORÚS, R.: Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates, **Journal Geophys. Res.**, Vol. 112, B08417, doi:10.1029/2006JB004707, 2007.
- HOQUE, M.M., JAKOWSKI, N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. **J Geod** 81, 259–268 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0106-0>.
- ISGI (International Service of Geomagnetic Indices) – online – endereço eletrônico: http://isgi.unistra.fr/about_indices.php, acesso em outubro de 2018.
- JACOBSEN, K.S.; ANDALSVIK, Y.L. Overview of the 2015 St. Patrick’s day storm and its consequences for RTK. and PPP positioning in Norway. **J. Space Weather Space Clim.** 2016, 6, A9. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016004>.
- JACOBSEN, K.S.; SCHÄFER, S. Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes. **J. Space Weather Space Clim.** 2012, 2, A13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2012013>.

- JOHNSON, F.S. *Satellite Environment Handbook*. 2. ed. California: Stanford University Press, 1965.
- JOHNSTON, G.; RIDDELL, A.; HAUSLER, G. The international GNSS Service. In *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*; Teunissen, P.J., Montenbruck, O., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 967–982.
- KENDALL, MAURICE GEORGE; GIBBONS, JEAN DICKINSON (1990). **Rank correlation methods**. [S.l.]: E. Arnold.
- KLOBUCHAR, J.A. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr., J. J.. ed. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).
- KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System**, 1997. 248p. Ph. D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188. University of New Brunswick. New Brunswick, Canada.
- LEHMAN, ANN; O'ROURKE, NORM; HATCHER, LARRY; STEPANSKI, EDWARD (2013). **JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: Methods for Researchers and Social Scientists**, Second Edition (em inglês). [S.l.]: SAS Institute. ISBN 9781612906034.
- LIU, Z.; LI, Y.; GUO, J; LI, F. (2016) Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning. **Geodesy and Geodynamics**. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.005>.
- MARQUES, H. A., MONICO, J. F. G., AQUINO, M. (2014). Análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, 20(4), 879-901.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. (2011). RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. **GPS Solutions**, 15(3), 305–314. doi:10.1007/s10291-011-0220-1.
- MARQUES, H. A; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. ROSA, G. P. S. Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil. **Rev. Bras. Geof.**. Vol. 27, n 3, 2009.
- MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991, 237p.
- MENDILLO, M. (2006), Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content, **Rev. Geophys.**, 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
- MORTON, Y. T.; ZHOU, Q.; VAN GRAAS, F. (2009) Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements, **Radio Sci.**, 44, RS1002, doi:10.1029/2008RS003888.
- NAVA, B.; RODRÍGUEZ-ZULUAGA, J.; ALAZO-CUARTAS, K.; KASHCHEYEV, A.; MIGOYA-ORUÉ, Y.; RADICELLA, S.M.; AMORY-MAZAUDIER, C.; FLEURY, R. Middle- and low-latitude ionospheric response to 2015 St.Patrick's Day. **J. Geophys. Res. Space Phys.** 2016, 121, 3421–3438. <https://doi.org/10.1002/2015JA022299>.
- NOAA/SWPC – SPACE WEATHER PREDICTION CENTER / NATIONAL OCEANICS AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – Site do órgão governamental norte-americano que conduz pesquisas relacionadas aos oceanos e atmosfera terrestre. Disponível em: <<http://swpc.noaa.gov>>. Acesso em Jun. 2018.
- ODIJK D. 2002. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft. 242 f.

- QI, L. GUO, J. XIA, Y. YANG, Z. Effect of Higher-Order Ionospheric Delay on Precise Orbit Determination of GRACE-FO Based on Satellite-Borne GPS Technique. In **IEEE Access**, vol. 9, pp. 29841-29849, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059296.
- RAMA RAO, P. V. S., GOPI KRISHNA, S., VARA PRASAD, J., PRASAD, S. N. V. S., PRASAD, D. S. V. V. D., AND NIRANJAN, K.: Geomagnetic storm effects on GPS based navigation, **Ann. Geophys.**, 27, 2101–2110, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2101-2009>, 2009.
- RISHBETH, H., O. K. GARRIOTT (1969), **Introduction to Ionospheric Physics**, 331 pp., Elsevier, New York.
- SALOMONI, C.S.; MATSUOKA, M.T.; SOUZA, S.F. Efeitos de tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira: estudo de caso para 29 de outubro de 2003. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.63, p.449-459, 2011.
- SIRGAS (2021) **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)**. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-definition/>>. Acesso em: março de 2021.
- SKONE, S. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance. **Journal of Geodesy** 75, 457–468 (2001). <https://doi.org/10.1007/s001900100198>.
- SPACEWEATHER. **News and information about the Sun-Earth environment**. Disponível em: <www.spaceweather.com>. Acesso em: janeiro de 2019.
- SPACEWEATHER. **News and information about the Sun-Earth environment**. Disponível em: < www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/18/kp >. Acesso em: junho de 2018.
- SPEARMAN, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**. 15 (1): 72–101. doi:10.2307/1412159.
- SU S.-Y., CHAO C. K., and LIU C. H. (2008), On monthly/seasonal/longitudinal variations of equatorial irregularity occurrences and their relationship with the postsunset vertical drift velocities, **J. Geophys. Res.**, 113, A05307, doi:10.1029/2007JA012809.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3rd completely ver. And extended ed. Berlim; New York: de Gruyter, 2001.
- WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A. Limitations of GPS in equatorial regions due to the ionosphere. In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, May 10-14. 1993. In: International Conference Cartography - Geodesy, Maracaibo, Venezuela, Nov. 24 - Dec. 4, 1992.
- WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. In: IAG Symposium 111, Heidelberg, Aug. 13, 1991.
- WDC KYOTO. **World Data Center for Geomagnetism, Kyoto**. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Research, Publication list, Staff, Access Guide and Map, WDC system and others. Disponível em: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201503/index.html>. Acesso em: junho de 2018.
- XIAOMIN L.; SHENGFENG GU; YIDONG L.; CHAO X.; BIYAN C.; XUEYUAN J. Assessing the Performance of GPS Precise Point Positioning Under Different Geomagnetic Storm Conditions during Solar Cycle 24. **Sensors (Basel)**. 2018 Jun; 18(6): 1784. Published online 2018 Jun 1. doi: 10.3390/s18061784.
- XI, K. WANG, X. Higher order ionospheric error correction in BDS precise orbit determination. **Advances in Space Research**, 2021, ISSN 0273-117. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.002>.
- YAMASHITA, C.S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

- YANG, H.; YANG, X.; ZHANG, Z.; SUN, B.; QIN, W. Evaluation of the Effect of Higher-Order Ionospheric Delay on GPS Precise Point Positioning Time Transfer. **Remote Sens.** 2020, 12, 2129. <https://doi.org/10.3390/rs12132129>.
- YAO, Y.; LIU, L.; KONG, J.; ZHAI, C. Analysis of the global ionospheric disturbances of the March 2015 great storm. **J. Geophys. Res. Space Phys.** 2016, 121, 12157–12170. <https://doi.org/10.1002/2016JA023352>.
- ZHANG, S.; FANG, L.; WANG, G.; LI, W. The impact of second-order ionospheric delays on the ZWD estimation with GPS and BDS measurements. **GPS Solut.** 2020, 24, 1–11.
- ZHANG, Z.; GUO, F.; ZHANG, X. The Effects of Higher-Order Ionospheric Terms on GPS Tropospheric Delay and Gradient Estimates. **Remote Sens.** 2018, 10, 1561.

CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos experimentos realizados neste trabalho, puderam ser observados o comportamento dos efeitos HOI no domínio das observações e do posicionamento GNSS sob a influência das variações temporais da densidade de elétrons na ionosfera (que compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos), abrangendo períodos envolvendo a ocorrência de irregularidades ionosféricas (como as tempestades geomagnéticas).

Para determinadas finalidades a que se propõe ou se destina o posicionamento, os valores máximos do erro devido a não consideração dos efeitos HOI, obtidos nos experimentos, podem ser significativos a nível milimétrico, principalmente durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas e em períodos de alta atividade solar. Conclusões similares em outros trabalhos sustentam tais considerações, como em Hoque e Jakowski (2007) que mostraram que o erro de segunda ordem é significativo e não pode ser negligenciado se a precisão de nível milimétrico for necessária no posicionamento GNSS preciso, conclusão pertinente também ao presente trabalho. Elmas et al. (2011) concluíram que os efeitos HOI precisam ser considerados para aplicações que exigem maior precisão, especialmente em períodos de alta atividade solar. Kashcheyev, Nava e Radicella (2012) mostraram que os efeitos HOI de alcance de nível centimétrico no domínio das observações, podem causar erros milimétricos no posicionamento. Hernández-Pajares et al. (2014), apontam que os efeitos HOI são um dos principais fatores limitantes no posicionamento que demanda acurácia milimétrica, o que converge aos resultados apresentados na presente pesquisa.

No capítulo 1, foi realizado o estudo dos efeitos de ordem superior da ionosfera ao longo do ciclo solar 24 e sua influência no posicionamento GNSS, de acordo com as regiões ionosféricas. Além disso, verificou-se o comportamento dos efeitos HOI sazonalmente e como influenciaram no domínio do posicionamento GPS de acordo com as regiões ionosféricas. Por fim, foi analisada a correlação entre os efeitos HOI, o número de manchas solares e o fluxo solar.

Foi observado que os valores do erro para os anos de 2013 e 2014 (alta atividade solar) estão em sua maior parte mais elevados se comparados aos valores obtidos para os anos 2010 e 2018 (baixa atividade solar), para todas as regiões ionosféricas analisadas.

No período de alta atividade solar do ciclo 24, os valores do erro obtidos na planimetria para a RAL (na região da Capa Polar) se agruparam, constituindo nos menores resultados (máximos em torno de 0,0005m), o que permitiu inferir que esta região não foi afetada pelos efeitos HOI no posicionamento pelo PPP, ao passo que a RE constitui os maiores resultados para o erro (alcançando cerca de 0,004m). Esta última região, em alguns momentos se funde aos resultados da RLM. Contudo, na altimetria, nas RE e RLM não foi possível observar um comportamento padrão do erro e seus valores se apresentam em geral menores que os obtidos na planimetria, o que também pode ser verificado em Liu et al. (2016).

A partir das análises de correlações por médias mensais, constatou-se que o erro devido a não consideração dos efeitos HOI está fortemente correlacionado com o número de manchas solares bem como com o fluxo solar. Além disso, o coeficiente de correlação varia para cada estação assim como por região ionosférica.

É proveitoso ressaltar que o ciclo solar analisado foi o de menor amplitude dentre os últimos e isso pode ter contribuído para a atenuação dos resultados máximos obtidos para o erro se comparados, por exemplo, aos valores máximos para o ciclo anterior, como observado em outros trabalhos, a citar Elmas et al. (2011). Dessa forma, ciclos mais "intensos" podem contribuir para valores de erros maiores e afetar o posicionamento mais significativamente, uma vez que o erro está altamente correlacionado com o número de manchas solares bem como com o fluxo solar.

No capítulo 2 foram investigados os efeitos de ordem superior da ionosfera durante a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 e sua influência no posicionamento GNSS no Brasil. Os valores máximos para os efeitos de segunda e terceira ordens no domínio das observações foram identificados no dia 17 de março, durante a fase principal da tempestade. O efeito foi maior no código e menor na fase. Dessa forma, o efeito de segunda ordem atingiu valor máximo em torno de 0,05 m e o efeito de terceira ordem, cerca de 0,02 m, para a frequência L_2 utilizando o código.

Utilizando a fase, os efeitos de segunda e terceira ordens alcançaram valores próximos a 0,02 e 0,007 m, respectivamente. Tais resultados podem ser comparados aos de outros autores como Hernández-Pajares et al. (2014), que mostraram que o efeito de segunda ordem na faixa L, alcançou valores de até 0,02 m. Os autores Morton, Zhou e Van Graas (2009) observaram que os efeitos de segunda ordem nas observáveis GPS para a frequência L_1 alcançaram máximos em torno 0,03 m.

No domínio do posicionamento pelo PPP, o erro devido a não consideração dos efeitos HOI alcançou valor máximo e média cerca de 0,011m e 0,005 m na planimetria, e valor máximo e média em torno de 0,007 m e 0,002m na altimetria, observados durante a fase principal da tempestade. No PRE, o valor máximo do erro foi em torno de 0,009 m e média cerca de 0,001 m, na planimetria e na altimetria.

Notou-se que as estações localizadas no Brasil tiveram o erro devido a não consideração dos efeitos HOI pouco maiores (a nível milimétrico) do que as estações pertencentes às redes CORS e CACS, o que se justifica pelo fato do Brasil possuir grande parte de sua área localizada na região equatorial, muito afetada por efeitos ionosféricos, ao contrário de regiões de latitude médias, onde se encontram as estações CORS e boa parte das estações CACS utilizadas neste experimento. Além disso, durante a fase principal da tempestade, nota-se que a variabilidade dos dados aumenta mais nas estações do Brasil do que nas estações CORS e CACS, onde o erro em geral é menor e mais consistente.

Embasado nos resultados apresentados, conclui-se que a tempestade geomagnética ocorrida no dia 17 de março de 2015 influenciou no aumento do erro devido a não consideração dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP, em sua maior parte a nível milimétrico, principalmente durante as fases principal e de recuperação. Conclusões similares podem ser verificadas em outros trabalhos, como em Elmas et al. (2011) que estudaram a influência a Tempestade de *Halloween* em 2003 nos efeitos HOI e no posicionamento GNSS e concluíram que durante a tempestade as correções dos efeitos HOI tiveram magnitudes, ao nível milimétrico e poucas ao nível centimétrico. Em Cai et al. (2019), também foi feito um estudo envolvendo os efeitos HOI durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas e concluíram que a ocorrência de tempestades geomagnéticas aumenta ainda mais os efeitos HOI a nível milimétrico.

É oportuno enfatizar que as conclusões deste trabalho se baseiam em uma tempestade classificada com intensa. Neste sentido, conforme concluíram Xiaomin et al. (2018), o nível de degradação dos efeitos HOI no domínio do posicionamento pelo PPP geralmente depende da intensidade da tempestade e, portanto, resultados divergentes do presente trabalho podem ser encontrados, caso sejam realizados durante a ocorrência de tempestades de intensidades diferentes.

Pôde-se verificar também a potencialidade do *software* Bernese como ferramenta no estudo dos efeitos HOI, a partir de dados ionosféricos advindos da constelação GPS.

Dessa forma, futuramente pretende-se realizar no mesmo *software*, estudos envolvendo dados de outras constelações GNSS. Uma vez que os valores para o TEC utilizados nos experimentos deste trabalho foram obtidos a partir do modelo global disponibilizado pelo CODE (que utiliza poucas estações do Brasil em sua modelagem), pretende-se ainda, testar outros modelos de TEC regionais que representem melhor o comportamento do TEC sob as condições da ionosfera brasileira, no cálculo dos termos de correção dos efeitos HOI.

Baseado nas exposições supra apresentadas, as investigações deste trabalho apontam que a importância do erro devido à não consideração dos efeitos HOI consiste em sua associação ao posicionamento de alta acurácia a nível milimétrico, a citar o processamento/estabelecimento/monitoramento de redes e a modelagem de séries temporais, principalmente em períodos de alta atividade solar ou durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Salienta-se que atualmente está em vigor o ciclo solar 25 e, portanto, os estudos dos efeitos HOI no ciclo 24 (que finalizou em dezembro de 2019) apresentados neste trabalho, bem como a influência de uma tempestade geomagnética intensa ocorrida neste período poderão contribuir no entendimento do que se pode esperar dos efeitos HOI para o atual ciclo solar e em suas futuras tempestades, bem como seus impactos no posicionamento GNSS no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAI, C., LIU, G., YI, Z., CUI, X. AND KUANG, C. (2019). Effect analysis of higher-order ionospheric corrections on quad-constellation GNSS PPP. **Meas. Sci. Technol.** 30 02400.1

ELMAS, Z. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G. Higher order ionospheric effects in GNSS positioning in the European region. **Ann. Geophys.**, 29, 1383–1399, DOI:10.5194/angeo-29-1383-2011, 2011.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, À.; DEFRAIGNE, P.; BERGEOT, N.; PRIETO-CERDEIRA, R.; GARCÍA-RIGO, A. (2014). Distribution and mitigation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS processing. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 119(4), 3823-3837.

HOQUE, M. M. & JAKOWSKI, N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. **J Geod** (2007) 81: 259. doi:10.1007/s00190-006-0106-0.

KASHCHEYEV, A., B. NAVA, S. M. RADICELLA (2012), Estimation of higher-order ionospheric errors in GNSS positioning using a realistic 3-D electron density model, **Radio Sci.**, 47, RS4008, doi:10.1029/2011RS004976.

LIU, Z.; LI, Y.; GUO, J; LI, F. (2016) Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning. **Geodesy and Geodynamics**. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.005>.

MORTON, Y. T.; ZHOU, Q.; VAN GRAAS, F. (2009) Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements, **Radio Sci.**, 44, RS1002, doi:10.1029/2008RS003888.

XIAOMIN L.; SHENGFENG GU; YIDONG L.; CHAO X.; BIYAN C.; XUEYUAN J. Assessing the Performance of GPS Precise Point Positioning Under Different Geomagnetic Storm Conditions during Solar Cycle 24. **Sensors (Basel)**. 2018 Jun; 18(6): 1784. Published online 2018 Jun 1. doi: 10.3390/s18061784.

APÊNDICES

a) Estratégia de processamento de dados no Bernese GNSS (Capítulos 1 e 2)

A estratégia de processamento utilizada nos experimentos foi basicamente o modo *default* do programa, com poucas alterações. Foi utilizada a mesma estratégia em todos os processamentos, variando apenas a correção dos efeitos HOI. Dessa forma, independente da estratégia utilizada, a comparação entre os resultados tem apenas os efeitos HOI como variante.

- O intervalo entre as observações foi de 300 segundos.
- A máscara de elevação varia de módulo a módulo no *software*. No GPSEST por exemplo, no pré-processamento da fase e na estimativa das coordenadas a máscara foi de 3° e na estimativa dos parâmetros da ionosfera a máscara foi 10°. No cálculo das ambiguidades no PRE, a máscara foi de 10°. A máscara mais restritiva utilizada foi de 10°.
- Não foram utilizados dados além do GPS, pois nem todas as estações selecionadas possuíam dados de outras constelações para todas as datas dos processamentos utilizadas na pesquisa.
- Modelo troposférico: GMF (global).
- Modelo ionosérico: Modelo Global da Ionosfera.
- Portadoras: IONFREE (L3) para correções de primeira ordem da ionosfera. Porém, ao realizar a correção dos efeitos HOI, é utilizado o modelo global do CODE.
- Placas tectônicas: de acordo com as Convenções IERS2010.
- Modelo de velocidade: o modo *default* do programa sugere a utilização do modelo NUVEL. Porém, neste trabalho não se aplicou nenhum modelo de velocidade porque não foi necessária a atualização das coordenadas, visto que foi feita a comparação entre as coordenadas corrigidas e não corrigidas dos efeitos HOI na data do rastreo.
- Época de referência: época do rastreo.
- Sistema de referência: PPP= vinculado ao referencial das coordenadas do satélite. No caso, o IGS (IGS00, IGS08, IGS14,..mais recente para cada época). PRE= de acordo com as coordenadas da base.
- Coordenadas a priori: estimadas pelo Bernese, a partir das coordenadas dos descritivos das estações, presentes no cabeçalho do RINEX.
- Calibração de antenas: disponibilizado pelo CODE.
- Erro do relógio do satélite: disponibilizado pelo CODE.
- TEC: disponibilizado pelo CODE.
- Parâmetros de rotação da Terra: aplicados de acordo com as convenções IERS2010 que utiliza, por exemplo, o modelo do pólo e o modelo de nutação (IAU2000ROE).
- Maré terrestre: de acordo com as convenções IERS2010, que sugere o modelo TIDE2000.
- Carga oceânica: de acordo com as convenções IERS2010, que sugere o modelo FES2004.

- Carga atmosférica: de acordo com as convenções IERS2010, que sugere o modelo RAY AND PONTE.

b) Obtenção dos resultados em Resultantes Planimétricas e Componentes Altimétricas (Capítulos 1 e 2)

A rotina para a obtenção dos resultados do erro em resultantes planimétricas e componentes altimétricas inicia-se a partir das coordenadas cartesianas advindas dos processamentos com e sem correção dos efeitos HOI. Ao final, as discrepâncias calculadas (tendência ou vício do estimador) representam o erro devido a não consideração dos efeitos HOI.

As coordenadas cartesianas estimadas no Bernese foram convertidas para coordenadas elipsoidais. A transformação das coordenadas cartesianas em geodésicas foi realizada utilizando o método direto, proposto por Bowring (1976). Neste caso, foram adotados os parâmetros do elipsoide GRS80, com semi-eixo maior (a) = 6378137 metros, e achatamento (f) = 1/298,257222101 - Parâmetros SIRGAS2000 (SIRGAS, 2021).

Em seguida, foram calculadas as discrepâncias. O cálculo se dá por:

$$\Delta\phi_{rad} = |\phi_{calc} - \phi_{ref}| \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{rad} = |\lambda_{calc} - \lambda_{ref}| \quad (2)$$

$$\Delta h_{(m)} = |h_{calc} - h_{ref}| \quad (3)$$

Onde,

$\Delta\phi_{rad}$, $\Delta\lambda_{rad}$ e $\Delta h_{(m)}$ = discrepâncias geodésicas calculadas;

ϕ_{ref} e λ_{ref} são as coordenadas geodésicas de referência (considerou-se como coordenadas de referência as advindas dos processamentos com correção dos efeitos HOI), em radianos;

ϕ_{calc} e λ_{calc} são as coordenadas geodésicas calculadas (considerou-se como coordenadas calculadas as advindas dos processamentos sem correção dos efeitos HOI), em radianos;

h_{ref} = altitudes geométricas de referência, em metros; e

h_{calc} = altitudes geométricas calculadas, em metros.

Tanto as coordenadas de referência quanto as coordenadas calculadas estão na época de coleta dos dados, no sistema de referência IGS mais recente para cada época. Para a conversão das unidades para metros, pode-se fazer (TORGE, 2001):

$$\Delta\phi_{(m)} = M * \Delta\phi_{rad} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{(m)} = N * \Delta\lambda_{rad} * \cos \phi \quad (5)$$

Em seguida, calcularam-se as resultantes planimétricas das discrepâncias por:

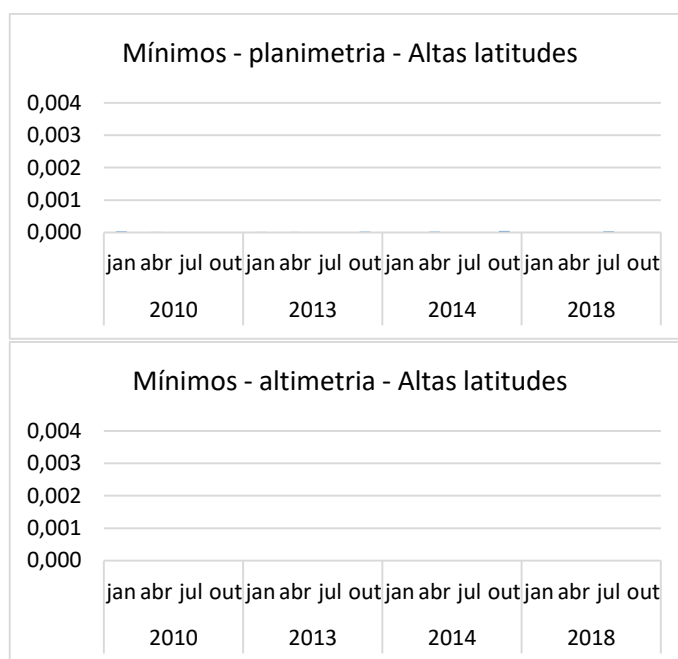
$$T = \sqrt{\Delta\phi_{(m)}^2 + \Delta\lambda_{(m)}^2} \quad (6)$$

Onde T é a resultante planimétrica das discrepâncias, em metros. A componente altimétrica é o próprio $\Delta\lambda_{(m)}$ em metros (equação 3).

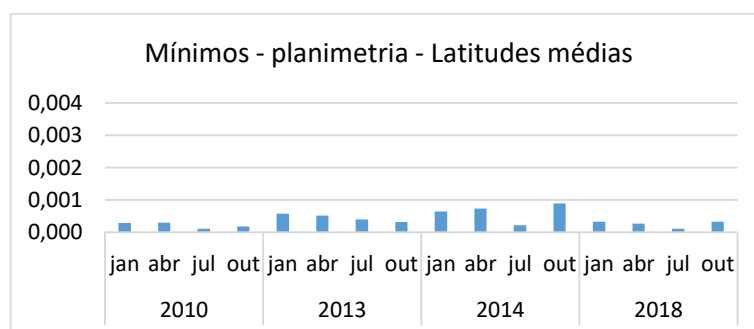
Dessa forma, tem-se o “erro” devido a não consideração dos efeitos HOI em resultantes planimétricas (T) e componentes altimétricas (Δh).

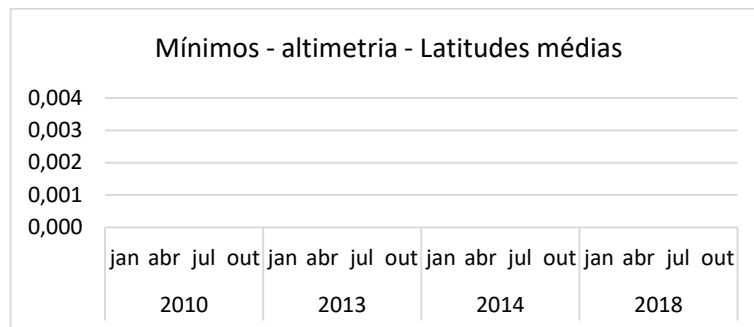
Capítulo 1

- a) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Altas Latitudes.

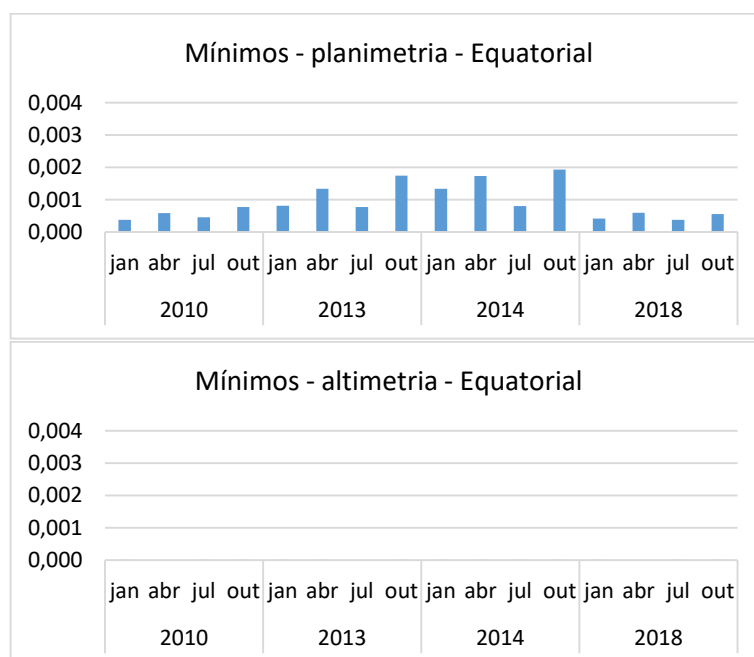


- b) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Latitudes Médias.

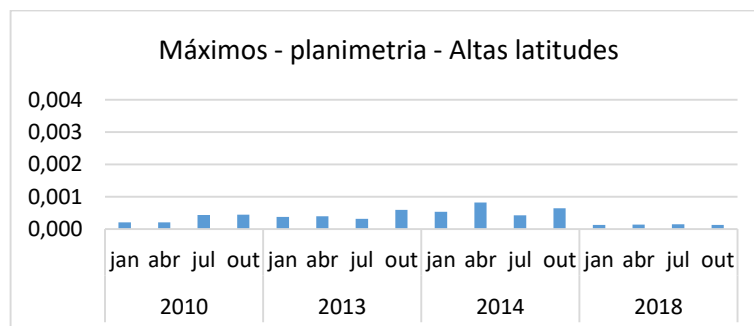


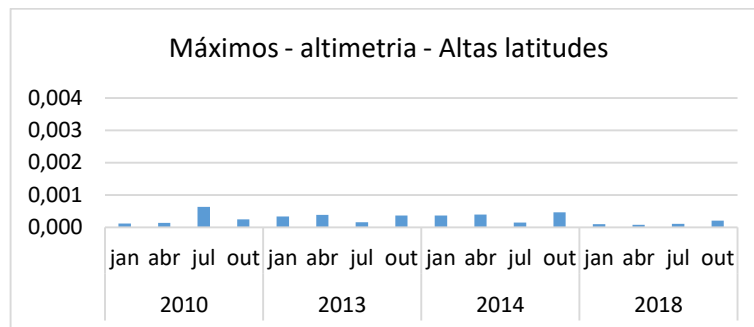


c) Valores mínimos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região Equatorial.

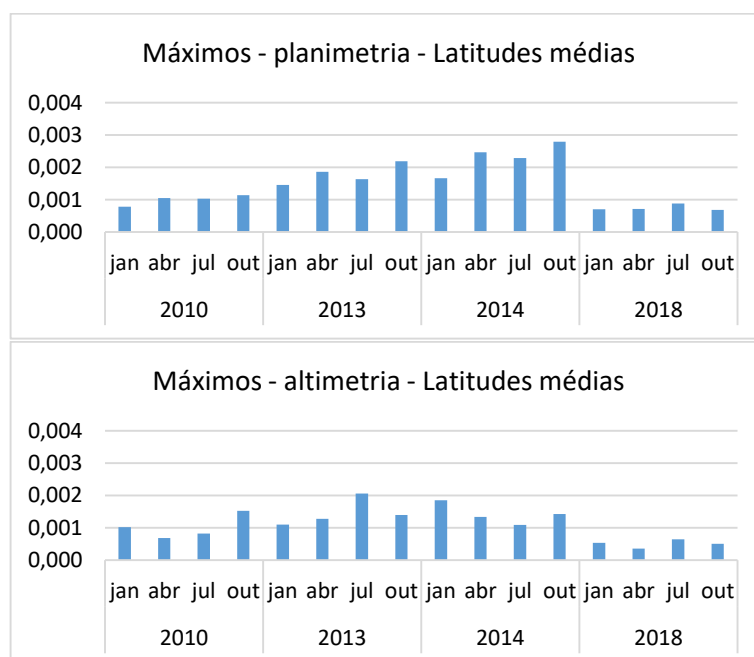


d) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Altas Latitudes.

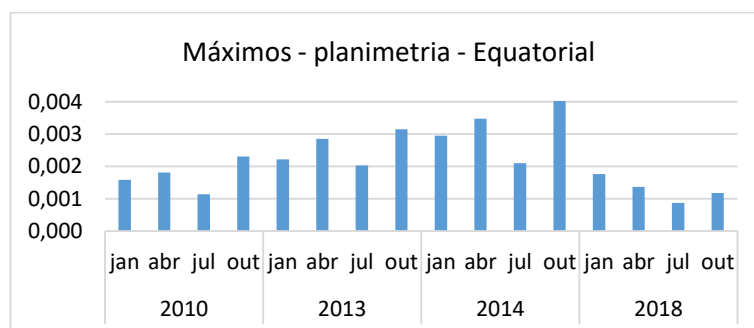


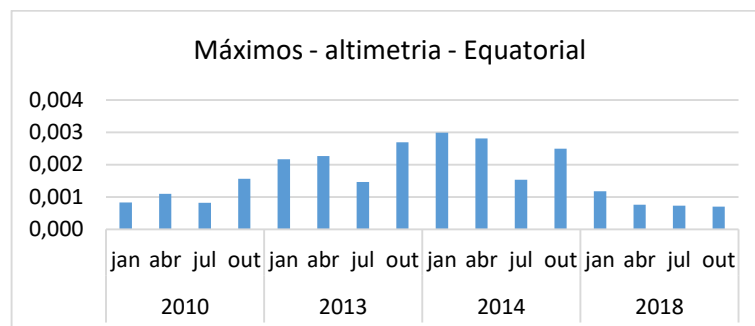


- e) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região de Latitudes Médias.



- f) Valores máximos mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI – Região Equatorial.





- g) Coeficientes de correlação de Spearman entre as médias mensais do erro devido a não consideração dos efeitos HOI e as variáveis ‘número de manchas solares’ e ‘fluxo solar’, por estação.

	Região de Altas latitudes			
	ALRT	INVK	QIKI	RESO
Planimetria x Mancha:	85,2%	90,2%	75,2%	88,1%
Altimetria x Mancha:	76,7%	64,2%	29,4%	76,2%
Planimetria x Fluxo:	83,5%	85,3%	75,9%	86,2%
Altimetria x Fluxo:	74,1%	61,5%	27,9%	80,0%

	Região de Latitudes médias							
	IMBT	POAL	SMAR	MCD6	NMSF	OKTU	PLO5	TXDR
Planimetria x Mancha:	88,9%	87,9%	91,8%	85,7%	86,2%	88,6%	83,7%	85,7%
Altimetria x Mancha:	77,9%	68,4%	66,7%	63,4%	50,2%	57,7%	48,1%	82,0%
Planimetria x Fluxo:	85,0%	82,9%	85,9%	82,6%	84,7%	86,2%	80,9%	83,5%
Altimetria x Fluxo:	74,1%	74,4%	76,2%	59,1%	42,1%	53,8%	43,8%	71,5%

	Região Equatorial							
	BOAV	POVE	ROCD	TOPL	BELE	PAIT	PITN	MTCO
Planimetria x Mancha:	83,3%	85,2%	83,6%	89,9%	82,3%	81,3%	72,1%	83,1%
Altimetria x Mancha:	72,6%	80,8%	71,5%	66,4%	71,2%	75,0%	65,4%	66,4%
Planimetria x Fluxo:	82,1%	83,8%	82,6%	86,8%	81,5%	80,5%	70,5%	81,5%
Altimetria x Fluxo:	69,7%	79,1%	70,9%	65,9%	71,5%	75,8%	65,5%	62,6%

Capítulo 2

- a) Valores máximos mínimos e médias para os erros de segunda e terceira ordens no domínio das observações.

	Fase - L1		Fase - L2		Código - L1		Código - L2	
	2ª ordem	3ª ordem	2ª ordem	3ª ordem	2ª ordem	3ª ordem	2ª ordem	3ª ordem
AMTE								
Máxima:	0,01254	0,00200	0,02649	0,00544	0,02507	0,00601	0,05299	0,01631
Mínima:	7,13E-07	1,25E-06	1,51E-06	3,38E-06	1,43E-06	3,74E-06	3,02E-06	1,01E-05
Média:	0,00251	0,00031	0,00531	0,00084	0,00503	0,00093	0,01063	0,00253
RSCL								
Máxima:	0,01186	0,00296	0,02507	0,00803	0,02372	0,00888	0,05014	0,02409
Mínima:	3,36E-07	1,54E-06	7,11E-07	4,18E-06	6,73E-07	4,63E-06	1,42E-06	1,25E-05
Média:	0,00185	0,00028	0,00391	0,00075	0,00375	0,00085	0,00793	0,00232
MAPA								
Máxima:	0,01359	0,00250	0,02873	0,00679	0,02719	0,00751	0,05747	0,02038
Mínima:	2,08E-06	4,11E-06	4,39E-06	1,11E-05	4,16E-06	1,23E-05	8,79E-06	3,34E-05
Média:	0,00269	0,00033	0,00568	0,00089	0,00545	0,00101	0,01151	0,00273
UBA1								
Máxima:	0,00998	0,00153	0,02110	0,00414	0,01997	0,00458	0,04220	0,01243
Mínima:	3,86E-08	1,35E-06	8,16E-08	3,67E-06	7,72E-08	4,06E-06	1,63E-07	1,10E-05
Média:	0,00151	0,00022	0,00319	0,00059	0,00308	0,00067	0,00651	0,00181
NAUS								
Máxima:	0,0125	0,0025	0,0265	0,0067	0,0251	0,0074	0,0530	0,0201
Mínima:	9,32E-08	1,74E-06	1,97E-07	4,73E-06	1,86E-07	5,23E-06	3,94E-07	1,42E-05
Média:	0,00280	0,00036	0,00591	0,00099	0,00562	0,00110	0,01187	0,00298
PIFL								
Máxima:	0,01195	0,00273	0,02526	0,00739	0,02391	0,00818	0,05053	0,02218
Mínima:	4,08E-07	3,17E-06	8,62E-07	8,59E-06	8,16E-07	9,50E-06	1,72E-06	2,58E-05
Média:	0,00232	0,00033	0,00489	0,00091	0,00461	0,00100	0,00973	0,00270