

**VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA**

**MONITORAMENTO DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS E  
CINTILAÇÃO DOS SINAIS GNSS: EM TEMPO REAL E  
PÓS-PROCESSADO**



**Dissertação de Mestrado**

**VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA**

**MONITORAMENTO DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS E  
CINTILAÇÃO DOS SINAIS GNSS: EM TEMPO REAL E  
PÓS-PROCESSADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, câmpus de Presidente Prudente, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador:  
Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo

**Presidente Prudente  
2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

P496r Pereira, Vinícius Amadeu Stuani.  
Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais  
GNSS : em tempo real e pós-processado / Vinícius Amadeu Stuani Pereira. -  
Presidente Prudente : [s.n.], 2014.  
159 f.

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia  
Inclui bibliografia

1. Irregularidades Ionosféricas. 2. Cintilação Ionosférica. 3. Redes  
Ativas. 4. GNSS. I. Pereira, Vinícius Amadeu Stuani. II. Camargo, Paulo de  
Oliveira. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e  
Tecnologia. IV. Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação  
dos sinais GNSS : em tempo real e pós-processado.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Presidente Prudente

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO**  
(ORIENTADOR)

**Profa. Dra. CLÁUDIA FERREIRA KRUEGER**  
(UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

**Prof. Dr. MARCIO TADEU DE ASSIS H. MUELLA**  
(UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA)

  
**VINICIUS AMADEU STUANI PEREIRA**

Presidente Prudente (SP), 25 de fevereiro de 2015.

Resultado: APROVADO

## DADOS CURRICULARES

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA

Nascimento	10/10/1989 – Presidente Prudente/SP
Filiação	Salvador Roberval Pereira Simoni Aparecida Stuani Pereira
2008 – 2012	Curso de Graduação Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, câmpus Presidente Prudente
2013 – 2015	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, câmpus Presidente Prudente

## DEDICATÓRIA

*À minha esposa Izabela, pelo amor,  
companheirismo... por tudo!*

*Aos meus amados pais, Salvador e Simoni,  
pelo apoio, atenção e segurança que me  
transmitiram durante a jornada acadêmica e  
que sempre me incentivaram nos momentos  
mais difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo que conquistei até agora, mas peço a Ele para me dar sabedoria para conquistar muito mais.

Agradeço ao meu eterno amigo Paulo de Oliveira Camargo, que muito mais que um orientador, foi e será a figura de um segundo pai. Há mais de 5 anos trabalhando juntos, pude aprender muito sobre ela, a Ionosfera, bem como, vários outros assuntos, não necessariamente relacionados ao meio acadêmico, mas sim sobre a vida. O meu sincero muito obrigado.

Ao professor João Francisco Galera Monico, pelo seu conhecimento GNSS único, pelos ensinamentos, críticas, dicas e por acreditar na minha capacidade em momentos importantes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e a instituição UNESP, por proporcionar ambiente e ferramentas de qualidade para a realização dos estudos.

Às agências de fomento a pesquisa CAPES e FAPESP, pelos apoios financeiros durante o desenvolvimento do projeto.

Ao IBGE, em especial a Sonia Maria Alves Costa (gerente de Redes de Referência Planialtimétricas), projeto CALIBRA e Laboratório de Geodésia Espacial pelo fornecimento dos dados GNSS das redes ativas, sem os quais não seria possível a realização da pesquisa.

Aos membros do GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial), pelas sugestões e comentários.

Ao trio Bruno César Vani, Ítalo Tsuchiya e Rogério Takeshi Oyama, que me ajudaram muito para que essa dissertação tornasse realidade.

Aos demais amigos e professores da Pós-Graduação e todos os funcionários da FCT/UNESP, que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

Um agradecimento especial aos meus pais, Salvador e Simoni, e irmãos, Fernanda e Rodrigo, base familiar indispensável para a formação de um ser humano.

Por fim, mas com muito amor, gostaria de agradecer a minha esposa Izabela, que sempre esteve ao meu lado durante todo esse período de pós-graduação, me incentivando, passando segurança, confiança e, sobretudo, a sua amizade, ente fundamental para o crescimento pessoal.

## EPÍGRAFE

*“A sorte favorece a mente bem preparada”*

*Louis Pasteur*



## RESUMO

A ionosfera é uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*), devido às observáveis serem afetadas por diversas condições ionosféricas decorrentes de alterações do clima espacial. O Brasil, localizado na região tropical, é um dos países que mais sofrem os efeitos provocados pela ionosfera, principalmente os oriundos da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. Desenvolver novos algoritmos e aprimorar os já existentes, com o intuito de minimizar os efeitos da ionosfera, consiste em uma das principais vertentes da Geodésia Espacial, devido ao aumento das atividades solares no triênio 2013-2014-2015. Várias estratégias podem ser utilizadas com o intuito de minimizar os efeitos ionosféricos, seja por meio de modelos ionosféricos, ou a partir de arquivos IONEX, bem como, utilizando a *ion-free*, salvo cada uma dessas estratégias com os respectivos níveis de atenuação. Em se tratando do monitoramento da ionosfera a situação é diferente. A quantidade de instrumentos dedicados ao estudo da camada ionosférica é reduzida no âmbito brasileiro. As poucas ionossondas, imageadores ópticos e receptores geodésicos apropriados no fornecimento de parâmetros relacionados à ionosfera espalhados pelo território são insuficientes para o monitoramento e análises detalhadas das irregularidades e cintilações ionosféricas. Neste contexto foi desenvolvido um aplicativo científico (*Ion\_Index*) com objetivo de estimar indicadores dos níveis de irregularidades da ionosfera e de cintilação dos sinais GNSS para o território brasileiro em tempo real e pós-processado, utilizando a infraestrutura já existente de dados GNSS de redes ativas públicas, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), a GNSS-SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo) e a rede CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRazil*), transformando assim estações monitoras dos sinais GNSS em estações monitoras da camada ionosférica. Dessa forma é proporcionado um aumento na resolução espacial das informações sobre o comportamento da ionosfera na região brasileira, permitindo um melhor entendimento e contribuindo para o desenvolvimento e alimentação de modelos de mitigação. Experimentos foram realizados com o intuito de avaliar as estimativas dos índices de irregularidades e de cintilação dos sinais GNSS para um período de alta variabilidade da densidade de elétrons (28 de fevereiro e 1 de março de 2014) e outro de baixa variação (7 e 11 de junho de 2014). Os resultados obtidos foram comparados com dados provenientes de outras fontes, tais como ionossondas digitais e a ferramenta *web* ISMR Query Tool, e se mostraram compatíveis, com moderadas e altas correlações. Também foram realizados experimentos visando verificar os efeitos da variação sazonal e dos momentos de ascensão e ápice do ciclo solar 24 sobre o território brasileiro; e os mapas de geovisualização permitiram a identificação e o deslocamento das gerações das irregularidades da ionosfera, das 19h às 2h local, no sentido NE-SW ao longo do equador magnético. O monitoramento em tempo real das irregularidades e cintilação foi realizado para o período do solstício de verão, de 20 a 26 de dezembro de 2014, e os resultados obtidos se mostraram compatíveis com os provenientes do modo pós-processado. A proposta de um índice de cintilação baseado nas medidas de SNR (*Signal to Noise Ratio*) foi investigada e apresentada, o qual permite a extração de uma estimativa para as cintilações de amplitude.

**Palavras-chave:** Irregularidades Ionosféricas. Cintilação Ionosférica. Redes Ativas. GNSS.

## ABSTRACT

Ionosphere is one of the largest sources of systematic errors in positioning by GNSS (Global Navigation Satellite System), due to observables be affected by several ionospheric conditions resulting from changes of space weather. Brazil, located in the tropical region, is one of the countries that suffer the effects of the ionosphere, especially those from the Equatorial Ionization Anomaly (EIA), ionospheric irregularities and scintillation of GNSS signals. Develop new algorithms and enhance existing ones, in order to minimize the effects of the ionosphere, is one of the main goals of the Space Geodesy, due to increased solar activity in the triennium 2013-2014-2015. Several strategies can be used in order to minimize the ionospheric effects, either through ionospheric models, or from IONEX files as well as using the ion-free, unless each of these strategies with their respective levels of attenuation. Regarding the monitoring of the ionosphere the situation is different. The amount of instruments dedicated to the study of ionospheric layer is reduced in the Brazilian context. The few ionosondes, optical imagers and specialized geodetic receivers in providing ionosphere-related parameters throughout the territory are insufficient for monitoring and detailed analysis of ionospheric irregularities and scintillation. In this context was developed a scientific application (Ion\_Index) in order to estimate indicators of irregularities levels of the ionosphere and scintillation of GNSS signals for the Brazilian territory in real time and post-processed using the existing infrastructure of active public networks of GNSS data, such as RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems), GNSS-SP (GNSS Active Network of the State of São Paulo) and the CALIBRA network (GNSS Countering high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil), thus transforming monitoring stations of GNSS signals in monitoring stations of ionospheric layer. This way is provided an increase in the spatial resolution of the information on the ionosphere behavior in the Brazilian region, allowing a better understanding and contributing to the development and power mitigation models. Experiments were performed in order to evaluate the estimates of the indices of irregularities and scintillation of GNSS signals for a period of high variability of the electron density (February 28 and March 1, 2014) and a low variation (7 and 11 June 2014). The results were compared with data from other sources, such as digital ionosondes and the web tool ISMR Query Tool, and proved compatible with moderate and high correlations. Experiments were also conducted aiming to check the effects of seasonality and times of rise and peak of the solar cycle 24 on the Brazilian territory; and geovisualization maps allowed the identification and the displacement of generations of irregularities of the ionosphere, from 19h to 2h local time, at the NE-SW direction along the magnetic equator. The real-time monitoring of irregularities and scintillation was conducted for the period of the summer solstice, 20 to 26 December 2014, and the results obtained were consistent with those from the post-processed mode. The proposal for a scintillation index based on SNR (Signal to Noise Ratio) measures was investigated and presented, which allows the extraction of an estimate for the amplitude scintillation.

**Key-words:** Ionospheric Irregularities. Ionospheric Scintillation. Active Networks. GNSS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da fase da onda portadora.....	33
Figura 2 – Sistema Ntrip.....	36
Figura 3 – Estações da rede CALIBRA.....	38
Figura 4 – Estações da rede GNSS-SP.....	39
Figura 5 – Estações da RBMC.....	39
Figura 6 – Estações da RBMC-IP.....	40
Figura 7 – Representação das três camadas solares mais externas.....	42
Figura 8 – Estratificação da atmosfera terrestre.....	43
Figura 9 – Processo de fotoionização.....	45
Figura 10 – Ilustração da curva de ionização.....	46
Figura 11 – Representação esquemática da camada ionosférica.....	47
Figura 12 – Densidade de elétrons durante o dia e a noite.....	48
Figura 13 – Número de manchas solares desde 1700 até 3 de janeiro de 2015.....	54
Figura 14 – Número de manchas solares do final do ciclo 23 e do atual ciclo 24.....	55
Figura 15 – Ilustração do campo geomagnético.....	56
Figura 16 – Ilustração da influência do vento solar no campo geomagnético.....	57
Figura 17 – Suscetibilidade do campo geomagnético estar sendo perturbado por eventos solares.....	58
Figura 18 – Curva Dst entre os dias 5 e 8 de setembro de 1982 com uma intensa tempestade geomagnética.....	59
Figura 19 – Regiões geográficas da ionosfera.....	60
Figura 20 – Esquema das forças agindo no plasma (efeito fonte).....	62
Figura 21 – Mapas globais de TEC produzidos pelo CODE para 3 de julho de 2012.....	63
Figura 22 – Ionogramas de ionosonda digital em Palmas/TO, a) sem a presença de espalhamento e b) com a presença de espalhamento.....	64
Figura 23 – Imagens do imageador all-sky em Palmas/TO, a) sem a presença de bolhas de plasma e b) com a presença de bolhas de plasma.....	64
Figura 24 – Flutuações de fase observadas em Palmas/TO, a) com a presença de flutuações e b) sem a presença de flutuações.....	65
Figura 25 – a) Perfil vertical ionosférico típico para a região equatorial. b) Analogia do perfil mostrado em a) com o caso de um fluido denso sendo suportado por um fluido de menor densidade. c) Ilustração da evolução da instabilidade hidrodinâmica R-T.....	66
Figura 26 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.....	67
Figura 27 – Ilustração de irregularidades na densidade de elétrons da camada ionosférica.....	68

Figura 28 – Morfologia global das cintilações durante anos de atividade solar a) máxima e b) mínima.....	68
Figura 29 – Gráfico do ROT da estação RECF da RBMC para 28 de outubro de 2003 (explosão solar).....	73
Figura 30 – Índice S4 com e sem ruídos do ambiente.....	79
Figura 31 – Esquema do método implementado no aplicativo Ion_Index.....	83
Figura 32 – Cálculo do ROT utilizando o conceito de janela deslizante.....	88
Figura 33 – Fluxograma do Ion_Index_PP.....	90
Figura 34 – Fluxograma do Ion_Index_TR.....	95
Figura 35 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ e d) ROTI, estação BOAV/RBMC, 28/02/2014.....	98
Figura 36 – Parâmetros a) $h'F$ , $hmF2$ e b) $NmF2$ , ionossonda Boa Vista/INPE, 28/02/2014.....	98
Figura 37 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ e d) ROTI, estação BOAV/RBMC, 01/03/2014.....	99
Figura 38 – Parâmetros a) $h'F$ , $hmF2$ e b) $NmF2$ , ionossonda Boa Vista/INPE, 01/03/2014.....	99
Figura 39 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ e d) ROTI, estação CEFT/RBMC, 28/02/2014.....	100
Figura 40 – Parâmetros a) $h'F$ , $hmF2$ e b) $NmF2$ , ionossonda Fortaleza/INPE, 28/02/2014.....	100
Figura 41 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ e d) ROTI, estação CEFT/RBMC, 01/03/2014.....	101
Figura 42 – Parâmetros a) $h'F$ , $hmF2$ e b) $NmF2$ , ionossonda Fortaleza/INPE, 01/03/2014.....	101
Figura 43 – Ionograma da ionossonda de Boa Vista/INPE para o instante 01h00min TU, 01/03/2014.....	103
Figura 44 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ e d) ROTI, estação CEFT/RBMC, 11/06/2014.....	104
Figura 45 – Parâmetros a) $h'F$ , $hmF2$ e b) $NmF2$ , ionossonda de Fortaleza/INPE, 11/06/2014.....	105
Figura 46 – Ionograma da ionossonda de Fortaleza/INPE para o instante 03h40min TU, 11/06/2014.....	106
Figura 47 – Índices a) $\sigma_\phi$ , c) $S_\phi$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_\phi$ (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 28/02/2014.....	108
Figura 48 – Índices a) $\sigma_\phi$ , c) $S_\phi$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_\phi$ (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 28/02/2014.....	108
Figura 49 – Índices a) $\sigma_\phi$ , c) $S_\phi$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_\phi$ (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 28/02/2014.....	109
Figura 50 – Índices a) $\sigma_\phi$ , c) $S_\phi$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_\phi$ (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 28/02/2014.....	109
Figura 51 – Índices a) $\sigma_\phi$ , c) $S_\phi$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_\phi$ (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 28/02/2014.....	110

Figura 52 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 28/02/2014.....	110
Figura 53 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 01/03/2014.....	111
Figura 54 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 01/03/2014.....	111
Figura 55 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 01/03/2014.....	112
Figura 56 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 01/03/2014.....	112
Figura 57 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 01/03/2014.....	113
Figura 58 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 01/03/2014.....	113
Figura 59 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 07/06/2014.....	114
Figura 60 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 07/06/2014.....	114
Figura 61 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 07/06/2014.....	115
Figura 62 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 07/06/2014.....	115
Figura 63 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 07/06/2014.....	116
Figura 64 – Índices a) $\sigma_{\Phi}$ , c) $S_{\Phi}$ , d) $\sigma_{CHAIN}$ (Ion_Index) e b) $\sigma_{\Phi}$ (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 07/06/2014.....	116
Figura 65 – Localização das estações RBMC e GNSS-SP selecionadas para a análise da variação sazonal.....	119
Figura 66 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ , d) ROTI, e) $\sigma_{\Phi}$ , f) $S_{\Phi}$ e g) $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 28/02/2014.	120
Figura 67 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ , d) ROTI, e) $\sigma_{\Phi}$ , f) $S_{\Phi}$ e g) $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 01/03/2014.	121
Figura 68 – Índices a) $f_p$ , b) $F_p$ , c) $I_{ROT}$ , d) ROTI, e) $\sigma_{\Phi}$ , f) $S_{\Phi}$ e g) $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 07/06/2014.	122
Figura 69 – Mapa de geovisualização do índice $F_p$ , período 00-01h TU, 28/02/2014.....	125
Figura 70 – Mapas de geovisualização do índice $F_p$ , 28/02/2014.....	126
Figura 71 – Mapas de geovisualização do índice $F_p$ , 01/03/2014.....	127
Figura 72 – Mapas de geovisualização do índice $F_p$ , 07/06/2014.....	128
Figura 73 – Mapas de geovisualização do índice $f_p$ , período 22-24h TU, 01/03/2014.....	129
Figura 74 – Mapas de geovisualização do índice ROTI, período 22-24h TU, 01/03/2014. ...	130

Figura 75 – Mapas de geovisualização do índice $I_{ROT}$ , período 22-24h TU, 01/03/2014. ....	131
Figura 76 – Mapas de geovisualização do índice $\sigma_{\phi}$ , período 22-24h TU, 01/03/2014.....	132
Figura 77 – Mapas de geovisualização do índice $F_p$ , 28/02/2010. ....	134
Figura 78 – Mapas de geovisualização do índice $F_p$ , 01/03/2010. ....	135
Figura 79 – Localização das estações RBMC-IP e GNSS-SP-IP selecionadas para o monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real....	137
Figura 80 – Geovisualização do índice $f_p$ , 20/12/2014, a) tempo real (22h42min12s TU) e b) pós-processado (período 22h30min-22h45min TU)....	138
Figura 81 – Geovisualização do índice $F_p$ , 21/12/2014, a) tempo real (23h29min55s TU) e b) pós-processado (período 23-24h TU). ....	138
Figura 82 – Geovisualização do índice $I_{ROT}$ , 22/12/2014, a) tempo real (23h45min26s TU) e b) pós-processado (período 23h30min-23h45min TU)....	139
Figura 83 – Geovisualização do índice ROTI, 23/12/2014, a) tempo real (22h58min07s TU) e b) pós-processado (período 22h55min-23h00min TU)....	139
Figura 84 – Geovisualização do índice $\sigma_{\phi}$ , 24/12/2014, a) tempo real (22h55min33s TU) e b) pós-processado (período 22h55min-22h56min TU)....	139
Figura 85 – Geovisualização do índice $S_{\phi}$ , 25/12/2014, a) tempo real (23h41min13s TU) e b) pós-processado (período 23h40min-23h41min TU)....	140
Figura 86 – Geovisualização do índice $\sigma_{CHAIN}$ , 26/12/2014, a) tempo real (23h05min52s TU) e b) pós-processado (período 23h05min-23h06min TU)....	140
Figura 87 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 28/02/2014. ....	142
Figura 88 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 28/02/2014. ....	143
Figura 89 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 28/02/2014. ....	143
Figura 90 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 28/02/2014. ....	143
Figura 91 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 28/02/2014. ....	144
Figura 92 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 28/02/2014. ....	144
Figura 93 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 01/03/2014. ....	144
Figura 94 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 01/03/2014. ....	145
Figura 95 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 01/03/2014. ....	145
Figura 96 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 01/03/2014. ....	145

Figura 97 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 01/03/2014.....	146
Figura 98 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 01/03/2014.....	146
Figura 99 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 07/06/2014.....	146
Figura 100 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 07/06/2014.....	147
Figura 101 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 07/06/2014.....	147
Figura 102 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 07/06/2014.....	147
Figura 103 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 07/06/2014.....	148
Figura 104 – Índices a) $S_{SNR}$ (Ion_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 07/06/2014.....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número do canal k para cada uma das posições orbitais do GLONASS. ....	30
Tabela 2 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS. ....	34
Tabela 3 – <i>Status</i> das estações da rede CALIBRA. ....	38
Tabela 4 – Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinação linear <i>ion-free</i> . ....	51
Tabela 5 – Erro máximo do efeito de 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup> ordem devido à ionosfera, na direção vertical. ....	51
Tabela 6 – Classificação da tempestade geomagnética em função do índice Dst. ....	59
Tabela 7 – Parâmetros ionosféricos extraídos do ionograma e suas respectivas nomenclaturas. ....	70
Tabela 8 – Matrizes de dados das estações. ....	92
Tabela 9 – Estações RBMC e GNSS-SP selecionadas para a análise da variação sazonal. ....	119
Tabela 10 – Estações RBMC-IP e GNSS-SP-IP selecionadas para o monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real. ....	136
Tabela 11 – Obtenção das medidas padronizadas de SNR disponibilizadas pelo RINEX. ...	141



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIE	– Anomalia de Ionização Equatorial
AMAS	– Anomalia Magnética do Atlântico Sul
AS	– <i>Anti-Spoofing</i>
ASCII	– <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BKG	– <i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
BNC	– <i>BKG Ntrip Client</i>
C/A	– <i>Coarse Acquisition</i>
CALIBRA	– <i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil</i>
CDMA	– <i>Code Division Multiple Access</i>
CEGAT	– Centro Geodésico Alezi Teodolini
CIGALA	– <i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i>
CME	– <i>Coronal Mass Ejection</i>
CODE	– <i>Centre for Orbit Determination in Europe</i>
DIS	– Distúrbios Ionosféricos Súbitos
Dst	– <i>Disturbance Storm-Time</i>
EGNOS	– <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMBRACE	– Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
ESF	– <i>Equatorial Spread F</i>
FCT	– Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, câmpus Pres. Prudente
FDMA	– <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FP7	– <i>European Community's Seventh Framework Programme</i>
FTP	– <i>File Transfer Protocol</i>
GAGAN	– <i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	– <i>Ground-Based Augmentation System</i>
GEGE	– Grupo de Estudos em Geodésia Espacial
GLONASS	– <i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS-SP	– Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
GRRP	– Gerência de Redes de Referência Planialtimétricas do IBGE
GSA	– <i>European Global Navigation Satellite Systems Agency</i>

GST	– <i>Galileo System Time</i>
GTRF	– <i>Galileo Terrestrial Reference Time</i>
HTTP	– <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	– <i>International Civil Aviation Organization</i>
IERS	– <i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGL	– Órbitas IGS GLONASS Precisas
IGR	– Órbitas IGS Rápidas
IGS	– <i>International GNSS Service</i> ou Órbitas IGS Precisas
IGU	– Órbitas IGS Ultrarrápidas
IGV	– Órbitas IGS GLONASS Ultrarrápidas
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	– <i>Ionosphere Map Exchange Format</i>
IPP	– <i>Ionospheric Pierce Point</i>
IRNSS	– <i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ITRF2000	– <i>International Terrestrial Reference Frame 2000</i>
ITRF2008	– <i>International Terrestrial Reference Frame 2008</i>
JPL	– <i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LF	– <i>Low Frequency</i>
LGE	– Laboratório de Geodésia Espacial
LPIM	– <i>La Plata Ionospheric Model</i>
Mod_Ion	– Modelo Regional da Ionosfera
MSAS	– <i>MSAT Satellite-Based Augmentation System</i>
Ntrip	– <i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
P	– <i>Precise or Protected Code</i>
PRN	– <i>Pseudo Random Noise</i>
PZ90	– <i>Parametry Zemli 1990</i>
QZSS	– <i>Quase-Zenith Satellite System</i>
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RBMC-IP	– RBMC em Tempo Real – <i>Internet Protocol</i>
RIBaC	– Rede INCRA de Bases Comunitárias do GNSS
RINEX	– <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	– <i>Root Mean Square</i>
ROT	– <i>Rate of Change of TEC</i>

R-T	– Instabilidade Tipo Rayleigh-Taylor
RTCM	– <i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i>
SA	– <i>Selective Availability</i>
SBAS	– <i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SCINTEC/LISN	– <i>Low-latitude Ionosphere Sensor Network</i>
SCNet	– Rede de Estações Ativa da Santiago & Cintra
SDCM	– <i>System for Differential Correction and Monitoring</i>
SDF	– <i>Sudden Disappearing Filaments</i>
SGB	– Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS2000	– Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000
SNAS	– <i>Satellite Navigation Augmentation System</i>
SNR	– <i>Signal to Noise Ratio</i>
SOHO	– <i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
STEREO	– <i>Solar Terrestrial Relations Observatory</i>
TAI	– Tempo Atômico Internacional
TCP/IP	– <i>Transfer Control Protocol / Internet Protocol</i>
TEC	– <i>Total Electron Content</i>
TECU	– <i>TEC Unit</i>
TEQC	– <i>Translation, Edition, and Quality Control</i>
TU	– Tempo Universal
UNESP	– Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNIVAP	– Universidade do Vale do Paraíba
UTC	– <i>Universal Time Coordinated</i>
VLF	– <i>Very Low Frequency</i>
WASS	– <i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS84	– <i>World Geodetic System 1984</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Considerações Iniciais e Motivação .....	21
1.2	Objetivos Geral e Específicos.....	24
1.3	Justificativa.....	25
1.4	Conteúdo da Pesquisa.....	26
2	SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE E REDES ATIVAS.....	27
2.1	GPS, GLONASS e Galileo .....	27
2.2	Observáveis GNSS .....	31
2.2.1	Pseudodistância .....	31
2.2.2	Fase da onda portadora .....	32
2.3	Erros Sistemáticos Envolvidos nas Observáveis .....	34
2.4	Transmissão de Dados GNSS Via Internet.....	35
2.5	Redes Ativas .....	37
3	IONOSFERA E IMPACTO NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GNSS .....	41
3.1	Fonte Solar de Ionização .....	41
3.2	Estratificação da Atmosfera Terrestre .....	43
3.3	Formação e Características da Camada Ionosférica .....	44
3.4	Impacto da Ionosfera na Propagação dos Sinais GNSS .....	48
3.5	Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e suas Variações .....	51
3.5.1	Variações diárias e sazonais .....	53
3.5.2	Variações com os ciclos solares .....	53
3.5.3	Variações com a atividade geomagnética.....	55
3.5.4	Regiões geográficas da ionosfera .....	59
3.6	Irregularidades Ionosféricas .....	63
3.7	Cintilação Ionosférica.....	67
3.8	Ionossonda .....	69
4	ÍNDICES DE IRREGULARIDADES E DE CINTILAÇÃO DA IONOSFERA .....	71
4.1	Índices de Irregularidades da Ionosfera.....	71
4.1.1	Índice $f_p$ .....	74
4.1.2	Índice $F_p$ .....	74
4.1.3	Índice $I_{ROT}$ .....	75

4.1.4	Índice ROTI.....	75
4.2	Índices de Cintilação Ionosférica .....	76
4.2.1	Índice S4 .....	76
4.2.2	Índice $\sigma_{\Phi}$ .....	80
4.2.3	Índice $S_{\Phi}$ .....	81
4.2.4	Índice $\sigma_{CHAIN}$ .....	81
5	DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO Ion_Index .....	82
5.1	Modalidade – Pós-Processamento .....	84
5.2	Modalidade – Tempo Real .....	91
6	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES .....	96
6.1	Avaliação da Estimativa dos Índices de Irregularidades da Ionosfera .....	96
6.2	Avaliação da Estimativa dos Índices de Cintilações de Fase .....	106
6.3	Análise da Variação Sazonal e Ascensão e Ápice do Ciclo Solar 24 Utilizando Índices de Irregularidades e de Cintilação da Ionosfera .....	118
6.4	Monitoramento das Irregularidades e Cintilação da Ionosfera em Tempo Real .....	136
6.5	Correspondência do Índice S4 com o Índice Proposto $S_{SNR}$ .....	141
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	153

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais e Motivação

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais avançadas que existem atualmente, tendo impulsionado as atividades relacionadas com posicionamento a partir de observações espaciais e pesquisas direcionadas ao comportamento da atmosfera. Um dos principais componentes do GNSS é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelo governo norte-americano, e o russo GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). Outro componente do GNSS que está sendo desenvolvido pela União Europeia é o Galileo, cuja previsão para que o sistema esteja completo é 2020 (GALILEO, 2015). Há também o sistema chinês BeiDou/Compass que se encontra em implantação (BEIDOU, 2015). Outros componentes, além dos citados, que compõem o GNSS são os sistemas regionais e aumentados designados de SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Um dos fatores limitantes do posicionamento GNSS de alta acurácia é a ionosfera, que passou a ser a maior fonte de erro sistemático após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*) em 2000. O efeito sistemático devido à ionosfera é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Uma característica importante é que o TEC varia no tempo e no espaço, em razão do fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, ciclo de manchas solares, ângulo zenital do Sol, estações do ano, hora local, direção do raio vetor do satélite e localização geográfica, sendo de difícil tratamento (CAMARGO, 1999; LEICK, 1995). Devido ao efeito sistemático da ionosfera sobre os sinais GNSS ser de natureza dispersiva, pode-se a partir de receptores de dupla frequência eliminar o efeito de primeira ordem por meio de uma combinação linear entre as portadoras L1 e L2 (SEEBER, 2003; LIN, 1997), bem como, calcular o TEC presente na ionosfera e o erro nas observáveis (pseudodistância e fase da onda portadora). Para minimizar o efeito da ionosfera no posicionamento por ponto e relativo em regiões com altos gradientes na variação do TEC, os usuários de receptores de uma frequência podem utilizar modelos ionosféricos globais ou regionais (CAMARGO; MONICO; FERREIRA, 2000).

Em consequência da alta radiação solar na região equatorial e da configuração do campo magnético da Terra, a densidade de elétrons nesta região sofre

sensíveis efeitos, sendo um deles denominado de efeito fonte (WEBSTER, 1993). O efeito fonte gera a Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) ou Anomalia de Appleton, que consiste em duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico, localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético. Nas faixas da anomalia que se localizam sobre o território brasileiro as densidades de elétrons atingem valores maiores do que em outras regiões da Terra. A maior intensidade ocorre nos dois lados do equador magnético, entre as latitudes geomagnéticas de  $\pm 10^\circ$  e  $20^\circ$  (RODRIGUES, 2003).

A ionosfera também provoca diversos efeitos nos sinais GNSS, como o atraso do grupo e o avanço da fase devido ao TEC. A variação na densidade de elétrons causa um efeito denominado de cintilação ionosférica, que por sua vez provoca variações de amplitude, de fase, no ângulo e na polarização do sinal, quando o mesmo atravessa uma região de plasma de densidade irregular da ionosfera (KLOBUCHAR, 1996). As cintilações são fortes nas zonas aurorais e nas regiões tropicais durante o período noturno, próximos aos equinócios de primavera e outono, e a ocorrência da cintilação aumenta durante os períodos de alta atividade solar e outras atividades extremas tal como a ocorrência de tempestades geomagnéticas (SILVA et al., 2010; CONKER et al., 2003; DAVIES, 1990). No Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de maio a agosto e máximas de setembro a abril. Os horários de cintilação mais intensos são limitados ao período entre o pôr do Sol até, aproximadamente, meia noite local, e têm o potencial de afetar todos os serviços GNSS (FU et al., 1999).

A ionosfera no setor brasileiro está localizada nas regiões equatorial e de baixas latitudes. Nestas regiões a ionosfera possui características peculiares e que devem ser consideradas para a mitigação do seu efeito. Com os experimentos já realizados (PEREIRA; CAMARGO, 2013; OLADIPO; SCHULER, 2013; CHU et al., 2008; SHAN et al., 2002) verifica-se que é possível, a partir de redes ativas, realizar estudos do comportamento da camada ionosférica utilizando dados GNSS coletados com receptores de dupla frequência. Com esses dados pode-se calcular o TEC, o ROT (*Rate of Change of TEC*) e índices de irregularidades da ionosfera, tais como:  $f_p$  e  $F_p$  (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000),  $I_{ROT}$  (PI et al., 1997) e ROTI (WANNINGER, 1993), bem como, alguns índices específicos para o estudo da cintilação ionosférica:  $S_4$  e  $\sigma_\phi$  (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993),  $S_\phi$  (FORTE, 2007) e  $\sigma_{CHAIN}$  (MUSHINI et al., 2012); além disso gerar mapas de cintilação e das irregularidades, que permitem observar o comportamento espacial e temporal e entender o ciclo de atividades da ionosfera, possibilitando a mitigação dos efeitos da mesma, principalmente no posicionamento GNSS.

Devido ao ápice do ciclo solar 24 – triênio 2013-2014-2015 – e ao desenvolvimento e estabelecimento do sistema de posicionamento europeu Galileo, principalmente com relação à disponibilização e comercialização de receptores no território brasileiro, estudos relacionados aos efeitos da ionosfera na propagação dos sinais GNSS são imprescindíveis e estão sendo desenvolvidos no Brasil, num projeto sob os auspícios da União Europeia denominado CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), financiado e supervisionado pela *European Community's Seventh Framework Programme (FP7)* e *European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA)*, respectivamente. O projeto está sendo executado pelo consórcio composto pela *University of Nottingham* do Reino Unido, *University of Nova Gorica* da Eslovênia, *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, Itália, pela empresa belga *Septentrio Satellite Navigation*, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCT/UNESP) e pela empresa brasileira ConsultGEL. Trata-se de uma continuação do projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*), também financiado pelo FP7 e desenvolvido pelas mesmas instituições de ensino, no período de março de 2010 a fevereiro de 2012. Em ambos os projetos foram instaladas estações exclusivas para o monitoramento da ionosfera, compondo assim a rede CALIBRA, com um total de 13 estações.

Em Aguiar (2010), Matsuoka (2007), Dal Poz (2005), Camargo, Monico e Ferreira (2000) e Camargo (1999) pode-se verificar as limitações proporcionadas pela camada ionosférica na região brasileira, no caso específico de elaboração de modelos analíticos de correção do erro da ionosfera para aplicação em posicionamento com receptores de simples frequência.

O Brasil dispõe de dados GNSS para a realização do monitoramento das irregularidades da ionosfera, uma vez que o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), que iniciou com nove estações espalhadas pelo Brasil coletando dados continuamente (FORTES, 1997). Atualmente a RBMC conta com mais de 110 estações. Os receptores GNSS da RBMC coletam dados a cada 15 segundos, que por sua vez são disponibilizados a cada 24 horas, exceto as estações da RBMC-IP (RBMC em Tempo Real – *Internet Protocol*), num total de 88, que os transmitem em tempo real, a cada segundo, via Ntrip (*Networked Transport of RTCM via Internet*



*Protocol*). Também transmitem dados via Ntrip as 21 estações da rede GNSS-SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo).

Considerando a importância do monitoramento das irregularidades e da cintilação da ionosfera, a pesquisa visa o estudo e a estimativa de índices que melhor represente o comportamento da ionosfera na região brasileira, bem como, a dinâmica da mesma sobre o território, a partir dos dados GNSS das redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC, tanto no modo pós-processado quanto em tempo real, uma vez que a quantidade de instrumentos dedicados ao monitoramento da ionosfera no Brasil é reduzida. Com isso, o território brasileiro terá indicadores das irregularidades e cintilação da ionosfera, que poderão ser utilizados no desenvolvimento de modelos/algoritmos para minimizar os efeitos da ionosfera, principalmente da cintilação, no posicionamento GNSS de alta acurácia.

## **1.2 Objetivos Geral e Específicos**

Esta pesquisa tem como objetivo geral estimar, analisar, representar e monitorar diversos índices de irregularidades da ionosfera e de cintilação dos sinais GNSS em tempo real e pós-processado. Para isso é realizada a integração dos dados GNSS das redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC. Os objetivos específicos consistem em:

- Produzir gráficos e mapas dos índices de irregularidades e de cintilação e comparar com os produzidos pela rede CALIBRA;
- Analisar os índices de irregularidades e de cintilação da ionosfera e disponibilizar dados e informações concisas do comportamento da ionosfera, visando à otimização de desenvolvimento de modelos/algoritmos para minimizar os efeitos da ionosfera no posicionamento de alta acurácia;
- Direcionar esforços para promover o sinergismo com áreas do conhecimento que tenham como tema principal de estudo a ionosfera, visando à troca de conhecimentos teóricos e de técnicas de observação;
- Correlacionar as irregularidades e cintilações ionosféricas obtidas com dados GNSS com dados provenientes de outras fontes, como ionossondas digitais; e
- Se possível, gerar ferramentas para o programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial).

### 1.3 Justificativa

A ionosfera é uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento pelo GNSS, devido às medidas serem afetadas por diversas condições ionosféricas em decorrência de alterações do clima espacial. Desta forma, investigações relacionadas com a ionosfera são de extrema importância. Indiretamente, o clima espacial é o principal fator que altera as condições ionosféricas devido aos fenômenos solares.

Nos últimos anos o clima espacial tem despertado grande interesse nacional e principalmente internacional. Com o advento de várias missões com o objetivo de estudar o Sol por sensoriamento remoto, tais como a missão SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) e a mais recente missão STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*), dentre outras missões, houve um maior interesse em entender a influência do Sol e o seu impacto nas geotecnologias. No Brasil o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), que vem se destacando no estudo de fenômenos espaciais, é responsável pelo programa EMBRACE, que teve início em 2008, cuja missão é o monitoramento, modelagem e difusão da informação do clima espacial, com investigações dos fenômenos e previsões dos efeitos significativos no território brasileiro, incluindo impactos em sistemas tecnológicos espaciais e terrestres.

Desenvolver novos algoritmos e melhorar os já existentes, com o intuito de minimizar os efeitos da ionosfera, principalmente nas técnicas GNSS de alta acurácia, consiste em uma das principais vertentes da Geodésia Espacial, devido ao aumento das atividades solares no triênio 2013-2014-2015. O posicionamento por ponto e o relativo, principalmente em tempo real, especialmente em áreas de baixas latitudes, podem ser significativamente prejudicadas pelos efeitos ionosféricos, em especial pela cintilação ionosférica. Cintilações fortes podem ocasionar a perda do rastreamento dos sinais GNSS, fato este crucial para obtenção da alta acurácia das soluções GNSS (CALIBRA, 2012).

A modelagem ionosférica e conhecimento das irregularidades e cintilações ionosféricas também são de suma importância para a navegação aérea e a agricultura de precisão, principalmente para as regiões ionosféricas ativas, como o caso brasileiro. Fortes cintilações ionosféricas tem o potencial de afetar todos os serviços GNSS, que por sua vez afetam a navegação e vigilância do tráfego aéreo, como por exemplo, durante as fases de aproximação e aterrissagem de aeronaves em aeroportos, quando fazem o uso do GBAS. No Brasil mais de 90% da agricultura de precisão depende do RTK (*Real Time Kinematic*), que é fortemente prejudicada, principalmente após o ocaso do Sol.

Pesquisas recentes sobre os efeitos ionosféricos têm sido realizadas nas mais diversas instituições de pesquisa, das quais, por exemplo, podem-se citar: Sojka (2013), Tanna, Karia e Pathak (2013), Aquino e Sreeja (2013), Hsueh, Fotopoulos e Adve (2013), projeto CIGALA, finalizado em 2012, e Muella, De Paula e Monteiro (2013).

#### **1.4 Conteúdo da Pesquisa**

O conteúdo da pesquisa está dividido em sete capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma introdução ao GNSS e redes ativas, com destaque para os sistemas de posicionamento GPS, GLONASS e Galileo, as características dos sinais GNSS, as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora, os erros sistemáticos envolvidos, a transmissão de dados GNSS via internet e as principais redes ativas brasileiras. O capítulo 3 compreende uma revisão sobre a ionosfera e o impacto da mesma na propagação dos sinais GNSS, abordando tópicos como a fonte solar de ionização, a estratificação da atmosfera terrestre, formação e características da camada ionosférica, o erro devido à camada nos sinais GNSS, o TEC e suas variações, as irregularidades e cintilação da ionosfera, e as características e dados provenientes de ionossondas. O capítulo 4 é dedicado a apresentação dos índices de irregularidades ( $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ ) e de cintilação ( $S4$ ,  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ ) da ionosfera estudados na pesquisa. No quinto capítulo é apresentado o desenvolvimento de um aplicativo para estimativa e visualização de índices de irregularidades e de cintilação da ionosfera: o *Ion\_Index*. No capítulo 6 são apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos nesta pesquisa tanto no modo pós-processado quanto em tempo real. Por fim, o último capítulo contém as conclusões e recomendações.

## 2 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE E REDES ATIVAS

Concebido no início da década de 90 pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*), durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea, o GNSS traduz no que há de mais moderno e atual quando se trata de posicionamento por satélites, seja nas modalidades terrestre, marítima, aérea ou espacial (MONICO, 2008).

Amplamente conhecido pela comunidade usuária e científica, o GNSS não se resume basicamente no GPS norte-americano, mas também em outros sistemas globais de navegação, tais como o completo e ativo GLONASS da Rússia, o proeminente Galileo da União Europeia e o chinês BeiDou/Compass.

Sistemas regionais e aumentados também fazem parte do GNSS, como o QZSS (*Quase-Zenith Satellite System*) do Japão, o IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) da Índia, os SBAS's, por exemplo, WAAS (*Wide Area Augmentation System*) dos Estados Unidos, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) da Europa, o japonês MSAS (*MSAT Satellite-Based Augmentation System*), o indiano GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*), o chinês SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) e o SDCM (*System for Differential Correction and Monitoring*) da Rússia, além dos GBAS's espalhados pela Terra (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

Uma breve descrição dos três principais sistemas GNSS – GPS, GLONASS e Galileo – é apresentada na sequência. As observáveis GNSS, os erros sistemáticos envolvidos, a transmissão dos dados GNSS por meio da internet e as principais redes ativas brasileiras também são abordados.

### 2.1 GPS, GLONASS e Galileo

O GPS consiste de um sistema espacial que proporciona a posição, a velocidade e a disseminação do tempo num sistema padrão, a qualquer instante, em qualquer ponto nas proximidades da Terra e independente das condições meteorológicas, sendo necessário no mínimo medidas simultâneas provenientes de quatro satélites (MONICO, 2008; SEEGER, 2003).

Três segmentos compõem o GPS: espacial, de controle e de usuários. O segmento espacial está associado com a constelação de satélites e seus respectivos sinais. Em 1995, quando foi declarado totalmente operacional, o segmento consistia de 24 satélites,

distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados e inclinados  $55^\circ$  em relação ao equador geográfico, com quatro satélites em cada plano, situados a uma altura de 20.200 km, com período de revolução de 12 horas siderais e emitindo sinais continuamente (MONICO, 2008).

Atualmente a constelação GPS conta com 30 satélites operacionais (GPS, 2015), transmitindo três frequências na banda L, denominadas de portadoras L1, L2 e L5 (apenas os oito satélites do bloco IIF transmitem as três frequências). As portadoras L1, L2 e L5 são geradas a partir da multiplicação da frequência fundamental (10,23 MHz) pelas constantes 154 (1.575,42 MHz), 120 (1.227,60 MHz) e 115 (1.176,45 MHz), respectivamente (MONICO, 2008).

A portadora L1 é modulada por dois códigos, o *Pseudo Random Noise* (PRN), conhecido como *Coarse/Acquisition* (C/A), e o código *Precise or Protected* (P). O código P é de uso restrito aos militares norte-americanos e usuários autorizados quando o *Anti-Spoofing* (AS) está ativado. O AS consiste na não permissão de acesso ao código P, que é criptografado, resultando em um código protegido contra fraudes, denominado de Y. A portadora L2 é modulada pelo código P e pelo código civil L2C (MONICO, 2008).

O sinal L5 é modulado por uma taxa de transmissão dez vezes maior que o C/A. Esse sinal é protegido mundialmente para uso da radionavegação da aeronáutica e apoio a aplicações de segurança na aviação (MONICO, 2008).

As tarefas do segmento de controle são: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, prever as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites e atualizar periodicamente as mensagens de navegação (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

O que diz respeito aos receptores GPS está relacionado com o segmento de usuários. Os mesmos são desenvolvidos de acordo com os propósitos a que se destinam, tais como para a Geodésia, para a navegação, para a agricultura, etc. (MONICO, 2008).

Com relação ao referencial geodésico, as efemérides transmitidas pelos satélites GPS estão associadas ao *World Geodetic System 1984* (WGS84). Já as efemérides precisas produzidas pelo *International GNSS Service* (IGS) estão disponibilizadas no *International Terrestrial Reference Frame 2008* (ITRF2008).

As efemérides precisas visam atender os usuários que necessitam de posicionamento com acurácia melhor que a proporcionada pelas efemérides transmitidas (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Três tipos de efemérides são disponibilizados pelo IGS (IGS, 2015; MONICO, 2008):

- IGS: resultante da combinação das órbitas de vários centros de análises, disponíveis com latência da ordem de 13 dias após a coleta de dados;
- IGR: órbitas IGS rápidas, disponíveis com latência de 17 horas; e
- IGU: órbitas IGS ultrarrápidas, compostas de duas partes: uma predita, disponível em tempo real, e outra com inclusão de observáveis, disponível com latência de três horas. Elas são disponibilizadas quatro vezes por dia (às 3h, 9h, 15h e às 21h TU (Tempo Universal)).

O sistema de tempo do GPS é o Tempo Universal Coordenado (UTC – *Universal Time Coordinated*), sem a introdução das correções de segundos inteiros (*leap seconds*) (MONICO, 2008).

Desenvolvido na extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e hoje mantido pela Rússia, o sistema GLONASS é similar ao sistema norte-americano, salvo algumas características.

O segmento espacial foi declarado operacional em 1996, contendo 24 satélites ativos e um reserva. Todavia, devido à falta de manutenção e recursos por parte do governo russo, o número de satélites GLONASS decresceu nos anos seguintes. Hoje a constelação encontra-se completa, com 28 satélites (24 operacionais, um reserva, dois em testes e um em verificação) (GLONASS, 2015). Os satélites estão distribuídos em três planos orbitais separados de 120° e com inclinação de 64,8° em relação ao equador geográfico, o que possibilita uma maior cobertura latitudinal em comparação ao GPS. As órbitas têm altura de 19.100 km e período de 11 horas e 15 minutos (MONICO, 2008).

O sistema GLONASS transmite sinais em duas bandas denominadas de L1 e L2, análogas ao GPS, no entanto, utiliza divisões múltiplas de frequências para diferenciar cada satélite (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*). Os valores nominais das frequências para as portadoras L1 ( $f_1$ ) e L2 ( $f_2$ ), em MHz, são dados pelas equações (1) e (2) (MONICO, 2008; SANTOS; FERREIRA; LAGO, 2001):

$$f_1(k) = 1.602 + k \cdot 0,5625, \quad (1)$$

$$f_2(k) = 1.246 + k \cdot 0,4375, \quad (2)$$

onde  $k$  representa o número do canal, informação essa fornecida pelo almanaque. Inicialmente cada satélite teria sua própria frequência, sendo  $k$  um valor positivo maior ou igual a zero e

menor ou igual a 24. Posteriormente foi introduzida uma alteração, na qual dois satélites antípodas podem utilizar um mesmo k. Atualmente k varia entre -7 a 6, sendo os números 5 e 6 reservados para testes (SEEBER, 2003; SANTOS; FERREIRA; LAGO, 2001). A Tabela 1 apresenta a distribuição do número do canal k para cada uma das oito posições orbitais destinadas aos satélites (*slots*) dentro dos planos orbitais 1, 2 e 3 (GLONASS, 2015):

Tabela 1 – Número do canal k para cada uma das posições orbitais do GLONASS.

<b>Plano Orbital 1/slot</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Número do canal k</b>	1	-4	5	6	1	-4	5	6
<b>Plano Orbital 2/slot</b>	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Número do canal k</b>	-2	-7	0	-1	-2	-7	0	-1
<b>Plano Orbital 3/slot</b>	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>Número do canal k</b>	4	-3	3	2	4	-3	3	2

Fonte: GLONASS (2015).

No entanto, o GLONASS conseguiu uma aprovação para adicionar o código de divisão de acesso múltiplo (CDMA – *Code Division Multiple Access*) utilizado no GPS e Galileo. Com isso os futuros satélites do sistema GLONASS, que serão CDMA, terão maior interoperabilidade com os demais sistemas. No sistema CDMA os satélites são distinguidos pelos diferentes ruídos pseudoaleatórios do código na mesma frequência. Como atualmente o GLONASS é FDMA, não há facilidade em realizar combinações entre os sistemas GNSS na execução do posicionamento (MONICO, 2008).

Com relação ao referencial geodésico, o sistema russo utiliza o *Parametry Zemli 1990* (PZ90) na definição das órbitas transmitidas pelos satélites (MONICO, 2008; SANTOS; FERREIRA; LAGO, 2001).

O sistema de tempo GLONASS também se baseia no UTC, porém realizado pela Rússia e que faz a inclusão do *leap seconds*.

A Comunidade Europeia, em conjunto com a GSA, vem desenvolvendo o sistema de posicionamento Galileo. O Galileo é um sistema aberto e global, com controle civil e compatível com o GPS. A constelação de satélites Galileo está dividida em três planos orbitais com inclinação de 56° em relação ao equador geográfico, com previsão para conter nove satélites igualmente espaçados em cada plano, com uma altura de 23.616 km (GALILEO, 2015; SEEBER, 2003).

Em relação aos sinais, o sistema possui E1-L1-E2, E5 A/B e E6, utilizando quatro portadoras – E1 com frequência 1.575,42 MHz, E5A com 1.176,45 MHz, E5B com 1.207,14 MHz e E6 com 1.278,75 MHz – (GALILEO, 2015; HOFMANN-WELLENHOF;

LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Vale salientar que as portadoras L1 e L5 do GPS encontram-se nas mesmas frequências da E1 e E5A do Galileo, respectivamente. Dessa forma é uma fonte potencial de interferências, entretanto, isso é reduzido com técnicas particulares de modulação. Por outro lado, essa interoperabilidade dos sinais facilita o desenvolvimento de antenas que rastreiam simultaneamente os dois sistemas (SEEBER, 2003).

No momento há quatro satélites Galileo em operação. Em 22 de agosto de 2014 foram lançados o quinto e o sexto satélites, no entanto, devido à falha na separação dos satélites do foguete Soyuz, os mesmos não atingiram a órbita prevista. Esperava-se que o sistema estivesse com capacidade operacional inicial em abril de 2014, com 18 satélites em órbita. Já a constelação completa é pretendida para 2020 (GALILEO, 2015).

O Galileo possui o seu próprio sistema de tempo (GST – *Galileo System Time*), o qual é mantido pelo TAI (Tempo Atômico Internacional). O mesmo acontece para o referencial geodésico, denominado GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*), compatível com o ITRF (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

## 2.2 Observáveis GNSS

As observáveis básicas do GNSS que possibilitam determinar posição, velocidade e tempo são denominadas de pseudodistância e fase de batimento da onda portadora, também conhecida por fase da onda portadora ou simplesmente por fase da portadora (MONICO, 2008). Outras observáveis também podem ser obtidas com o GNSS, tais como a variação Doppler e o SNR (*Signal to Noise Ratio*). Nas subseções a seguir são descritas as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora.

### 2.2.1 Pseudodistância

A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão ( $t^s$ ) e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção ( $t_r$ ). O modelo funcional da pseudodistância, em metros, entre o satélite (s) e o receptor (r) pode ser escrito como (MONICO, 2008):

$$PD_r^s(t) = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s + v_{PD_r^s}, \quad (3)$$



onde:

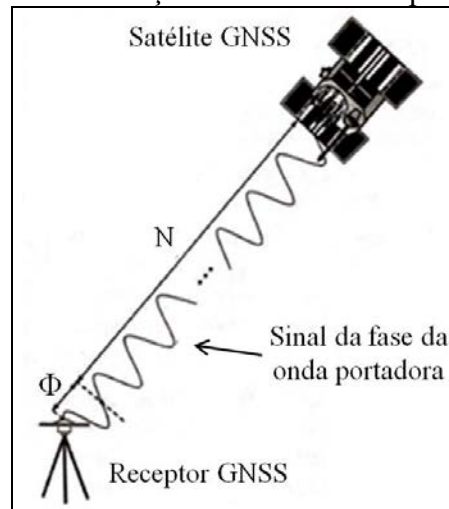
- $\rho_r^s$  – distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal;
- $c$  – velocidade da luz no vácuo;
- $dt_r$  – erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante de recepção;
- $dt^s$  – erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante de transmissão;
- $I_r^s$  – erro devido à ionosfera;
- $T_r^s$  – erro devido à troposfera;
- $dm_r^s$  – erro devido ao multicaminho;
- $Orb^s$  – erro da posição do satélite; e
- $V_{PD_r^s}$  – erro da pseudodistância devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor, fase *wind-up*, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios.

Embora a pseudodistância obtida pelo código seja a observável mais utilizada, sua precisão é da ordem de metros. Uma observável mais precisa é a fase da onda portadora, cuja precisão é da ordem centimétrica a milimétrica. Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) apresentam a magnitude aproximada da precisão da pseudodistância (3 metros) e da fase da onda portadora (3 centímetros).

### 2.2.2 Fase da onda portadora

A medida da fase da onda portadora é obtida a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor, no instante de recepção. Apenas uma medida fracionária é obtida ( $\Phi$ ), restando como incógnita um número inteiro de ciclos desconhecido denominado de ambiguidade ( $N_r^s$ ) (Figura 1) (MONICO, 2008).

Figura 1 – Ilustração da fase da onda portadora.



Fonte: Adaptado de Monico (2008).

O modelo funcional da fase da onda portadora, com unidade em ciclos, é dado pela equação (4) (MONICO, 2008; SEEBER, 2003):

$$\Phi_r^s(t) = f \left( \frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\Phi^s(t_0) - \Phi_r(t_0)) + N_r^s + v_{\Phi_r^s}, \quad (4)$$

onde:

$f$  – frequência nominal da onda portadora;

$\Phi^s(t_0)$  – fase inicial no satélite, correspondente à época de referência  $t_0$ ;

$\Phi_r(t_0)$  – fase inicial no receptor, correspondente à época de referência  $t_0$ ;

$N_r^s$  – ambiguidade da fase no instante inicial de rastreamento; e

$v_{\Phi_r^s}$  – erro da fase da portadora devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor, fase *wind-up*, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios.

Observa-se que o termo referente ao erro devido à ionosfera ( $I_r^s$ ) na equação da fase é negativo, ao passo que na equação da pseudodistância é positivo. Isso se deve ao avanço que a observável fase da onda portadora sofre ao atravessar a ionosfera, ao contrário da pseudodistância que sofre retardo (MONICO, 2008; CAMARGO, 1999).

### 2.3 Erros Sistemáticos Envolvidos nas Observáveis

As observáveis GNSS estão sujeitas a erros aleatórios, grosseiros e sistemáticos. Os erros sistemáticos são aqueles cuja causa é conhecida, podendo ser parametrizados ou reduzidos por técnicas apropriadas de observação ou de processamento dos dados. Os erros grosseiros são oriundos de falhas humanas e/ou de equipamentos, devendo ser eliminados. Por fim, os erros aleatórios não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são, em geral, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros forem eliminados e os sistemáticos minimizados. Os erros aleatórios são inevitáveis, sendo considerados uma propriedade inerente das observações (MONICO, 2008).

A Tabela 2 apresenta os principais tipos de erros sistemáticos envolvidos no GNSS, tal como suas respectivas fontes.

Tabela 2 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS.

<b>Fontes</b>	<b>Erros</b>
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do Pólo Carga oceânica Pressão atmosférica

Fonte: Monico (2008).

O tratamento de cada um desses erros é necessário para a obtenção de resultados de alta precisão. Grande maioria deles são praticamente eliminados quando se

realiza o posicionamento relativo ou por meio de combinação linear entre as portadoras L1 e L2. Outros são reduzidos na adoção de modelos matemáticos adequados.

O erro relacionado à propagação do sinal na ionosfera será descrito detalhadamente no próximo capítulo.

Detalhes e informações quanto às demais fontes e efeitos dos erros envolvidos no GNSS podem ser consultados em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), Monico (2008), Seeber (2003) e Leick (1995).

## 2.4 Transmissão de Dados GNSS Via Internet

O registro das observáveis GNSS (pseudodistância e fase da onda portadora), dos parâmetros orbitais e saúde dos satélites, dos coeficientes para correção do relógio dos satélites, entre outros dados, são realizados em cada receptor utilizando o seu próprio formato (MONICO, 2008). Com o intuito de facilitar o intercâmbio de dados, o Instituto Astronômico da Universidade de Berne desenvolveu o formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), que consiste de três arquivos do tipo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*): arquivo de observações, de dados meteorológicos e de mensagens de navegação. Estes arquivos contêm um cabeçalho, com informações gerais sobre o arquivo, e uma seção de dados. Os arquivos de observações e meteorológicos contêm dados para uma determinada estação e seção, enquanto que os arquivos de navegação fornecem parâmetros orbitais, coeficientes para a correção ionosférica, informações sobre os satélites e sinais por estes transmitidos.

Três versões de RINEX estão disponíveis: RINEX 1, 2 e 3, sendo a última a mais recente e recomendada para uso, pois contempla além do GPS o GLONASS, o Galileo, o SBAS, dentre outros sistemas (MONICO, 2008). Informações a respeito da estrutura dos arquivos RINEX 3 podem ser consultadas em Gurtner e Estey (2013).

A maioria dos fabricantes de receptores geodésicos fornecem programas para converter os dados do formato proprietário para o RINEX. Um programa de domínio público chamado TEQC (*Translation, Edition, and Quality Control*), desenvolvido pela UNAVCO, realiza essa tarefa e outras atividades relacionadas à conversão de formatos, edição, análise e controle de qualidade de arquivos e dados GNSS (UNAVCO, 2013).

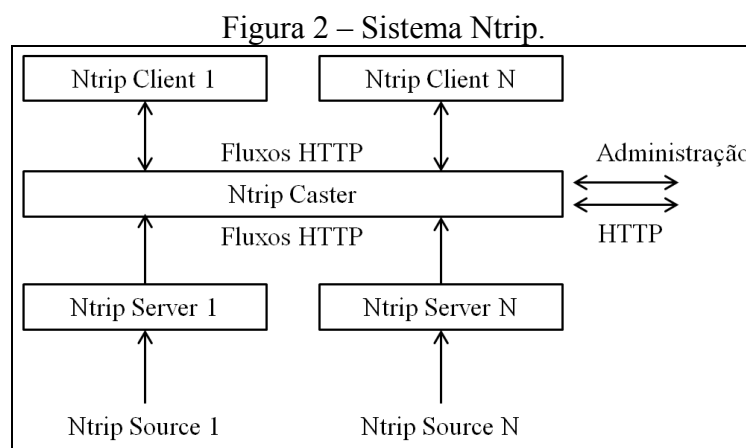
Em se tratando da transmissão dos dados GNSS via internet, duas modalidades se distinguem: para fins de pós-processamento e para aplicações em tempo real. Atividades pós-processadas podem realizar o *download* dos arquivos RINEX armazenados

nos servidores das redes ativas através do FTP (*File Transfer Protocol*). Já para as atividades em tempo real, a Agência de Cartografia e Geodésia Alemã (BKG – *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*), em cooperação com a Universidade de Dortmund, desenvolveu o Ntrip, o qual utiliza o formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) para transmissão dos dados GNSS (NTRIP, 2014).

O Ntrip é um protocolo concebido de forma a disseminar correções diferenciais ou outros tipos de dados GNSS em fluxos contínuos por meio da internet (NTRIP, 2014). As principais características são (NTRIP, 2014; COSTA et al. 2008):

- Está baseado em HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*);
- Tem a capacidade de aceitar vários usuários simultaneamente;
- O acesso aos dados é realizado de forma segura sem a necessidade de o usuário estar em contato direto com as estações das redes ativas; e
- Está habilitado a fornecer o fluxo de dados por meio de qualquer rede móvel TCP/IP (*Transfer Control Protocol / Internet Protocol*).

O Ntrip é basicamente composto por três componentes: o Ntrip Server, o Ntrip Caster e o Ntrip Client. A Figura 2 esquematiza a comunicação entre os componentes.



Fonte: Adaptado de NTRIP (2014).

O Ntrip Server é o aplicativo que cria um canal de transferência de dados GNSS entre o receptor (Ntrip Source) e o servidor. O Ntrip Caster é o distribuidor dos dados RTCM do servidor para os usuários por meio da internet. No Caster convergem várias estações de referência e cada uma delas tem um nome identificador denominado de *mountpoint*; uma tabela (*sourcetable*) com todos os *mountpoints* e suas respectivas configurações e informações está contida nesse componente. Outras responsabilidades do

Caster são verificar a qualidade e integridade dos dados recebidos e a autenticação dos usuários por meio de *login* e senha. Por fim, o Ntrip Client consiste em um aplicativo que se instala em um computador/notebook para que possa receber os dados GNSS. O acesso aos dados é realizado selecionando no Ntrip Client um dos *mountpoints* que estão na *sourcetable* do Ntrip Caster (NTRIP, 2014; COSTA et al., 2008).

## 2.5 Redes Ativas

Rede ativa consiste em um conjunto de receptores de sinais GNSS, instalados em pontos com coordenadas conhecidas, que operam continuamente ou por um determinado período de tempo, sendo gerenciada por um centro operacional responsável por manter o sistema e divulgar os dados (MONICO, 2008). Há redes ativas que produzem dados para fins de pós-processamento e/ou para aplicações em tempo real. No Brasil destacam-se as seguintes redes ativas públicas e particulares:

- RBMC, tendo incorporada a RIBaC (Rede INCRA de Bases Comunitárias do GNSS);
- GNSS-SP;
- CALIBRA;
- SCINTEC/LISN – *Low-latitude Ionosphere Sensor Network*;
- SCNet – Rede de Estações Ativa da Santiago & Cintra (particular);
- CEGAT – Centro Geodésico Alezi Teodolini (particular).

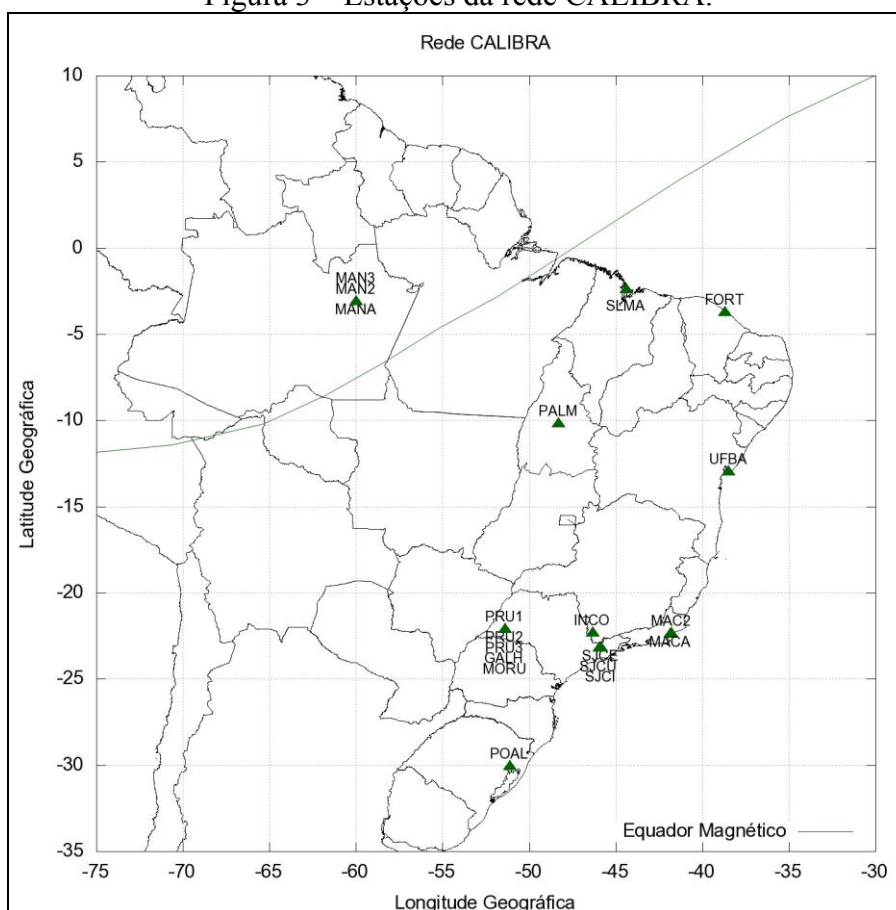
As principais redes ativas públicas – RBMC, GNSS-SP e CALIBRA –, cujos dados são utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, são detalhadas a seguir.

A rede CALIBRA é uma rede dedicada exclusivamente ao estudo e monitoramento dos distúrbios ionosféricos no Brasil. Resultante da instalação de receptores PolaRxS da Septentrio durante o desenvolvimento do projeto CIGALA, finalizado em fevereiro de 2012, e do atual projeto CALIBRA, a rede é composta atualmente por 13 estações, sendo que houveram algumas estações temporárias (Tabela 3). A Figura 3 apresenta a localização das estações.

Tabela 3 – Status das estações da rede CALIBRA.

Estação	Data de Início	Data de Remoção	Estação	Data de Início	Data de Remoção
FORT	24/10/2013	Ativa	POAL	04/07/2011	Ativa
GALH	02/05/2013	Ativa	PRU1	09/02/2011	Ativa
INCO	01/11/2013	Ativa	PRU2	14/02/2011	Ativa
MACA	18/05/2011	03/01/2012	PRU3	12/08/2013	03/03/2014
MAC2	21/03/2012	Ativa	SJCE	21/12/2012	Ativa
MANA	16/06/2011	27/10/2012	SJCI	28/04/2011	12/12/2012
MAN2	23/03/2013	Ativa	SJCU	17/06/2011	Ativa
MORU	03/05/2013	12/06/2013	SLMA	10/08/2014	Ativa
PALM	05/04/2011	Ativa	UFBA	08/11/2013	Ativa

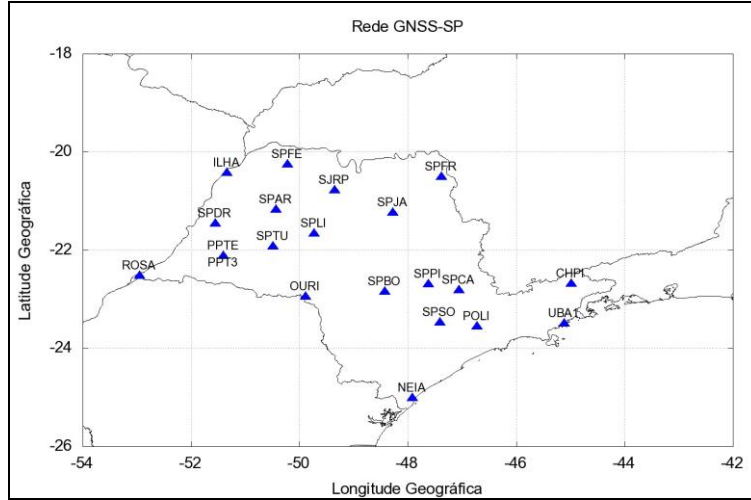
Figura 3 – Estações da rede CALIBRA.



A rede GNSS-SP é composta por 21 estações (Figura 4), sendo 18 homologadas pelo IBGE: CHPI, ILHA, NEIA, OURI, POLI, PPTE, ROSA, SJRP, SPAR, SPBO, SPCA, SPDR, SPJA, SPLI, SPPI, SPSO, SPTU e UBA1; o restante encontra-se em processo de homologação. Implantadas durante o desenvolvimento do projeto temático junto a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – proc. n° 2006/04008-2), finalizado em julho de 2013, a rede é utilizada para estudos atmosféricos, bem como, para

o posicionamento relativo e RTK, graças à disponibilização dos dados em tempo real por meio do protocolo Ntrip.

Figura 4 – Estações da rede GNSS-SP.



Já a RBMC conta com mais de 110 estações espalhadas pelo território brasileiro (Figura 5). Oitenta e oito dessas estações também transmitem dados em tempo real (Figura 6), formando a RBMC-IP.

Figura 5 – Estações da RBMC.

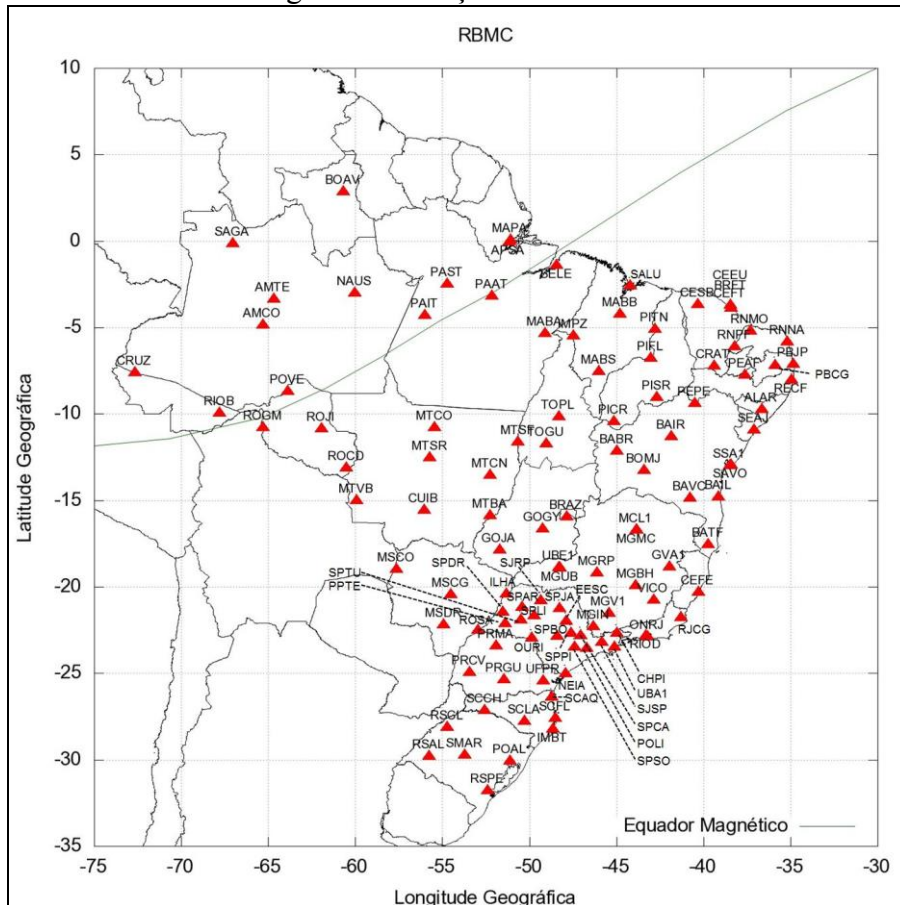
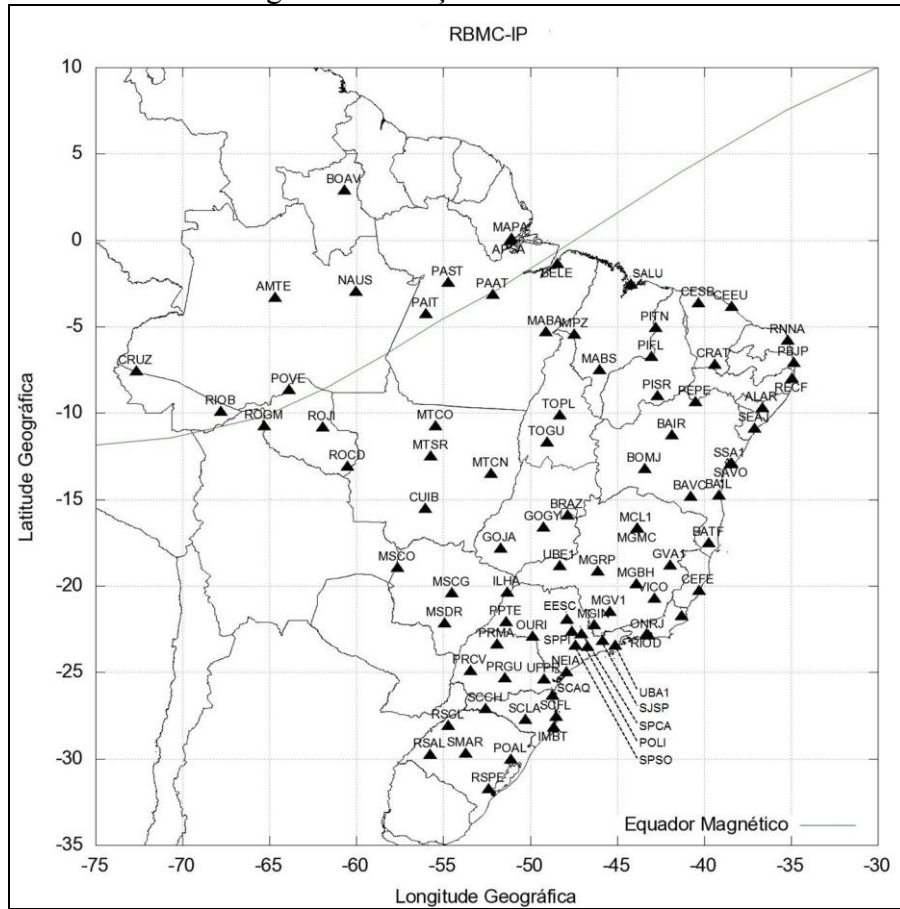




Figura 6 – Estações da RBMC-IP.



### 3 IONOSFERA E IMPACTO NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GNSS

Devido a variações periódicas observadas em medições do campo geomagnético no início do século XX, a existência de uma camada ionizada na parte superior da atmosfera terrestre foi levantada pela comunidade científica (KIRCHHOFF, 1991).

O termo “ionosfera” foi utilizado pela primeira vez em 1926, pelo cientista britânico Robert Alexander Watson-Watt, quando submeteu uma correspondência ao *British Radio Research Board* (McNAMARA, 1991). A partir daí a expressão começou a ser bastante utilizada entre os anos de 1932 e 1934, quando Edward Victor Appleton, John Ashworth Ratcliffe e o próprio Watson-Watt e outros autores citaram o vocábulo “ionosfera” em seus artigos científicos.

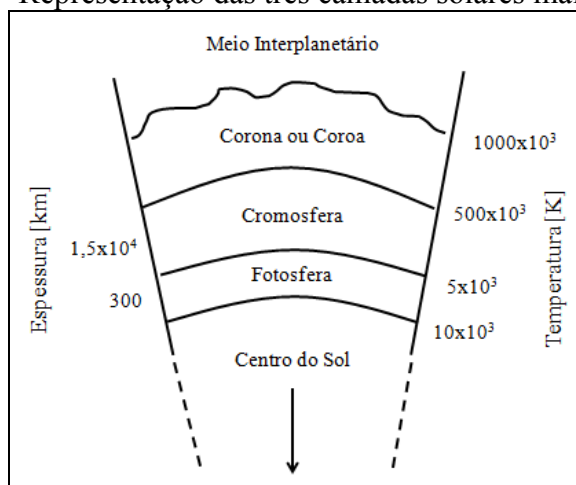
A parte superior da Terra é ionizada devido à radiação eletromagnética e corpuscular do Sol. Portanto, conceitos relacionados ao Sol são de suma importância para o melhor entendimento de alguns fenômenos que acontecem na camada ionosférica.

#### 3.1 Fonte Solar de Ionização

O Sol é uma estrela média, com raio aproximadamente de  $7 \times 10^5$  km, o que equivale a 100 vezes o raio da Terra, e uma massa de cerca de  $2 \times 10^{30}$  kg, equivalente a 300 mil vezes a massa terrestre (McNAMARA, 1991). O Sol pode ser considerado uma grande esfera de gás incandescente, onde a geração de energia ocorre em seu núcleo por meio de reações termonucleares. A composição química do Sol é de aproximadamente 90% de hidrogênio, 9,9% de hélio e 0,1% de outros elementos químicos, tais como: carbono, nitrogênio e oxigênio. Esses constituintes sofrem ionização devido às várias interações eletrodinâmicas e reações nucleares, criando temperaturas que excedem a energia de ligação dos átomos (GUIMARÃES; SILVA, 2003).

A radiação eletromagnética solar, responsável pelo processo de ionização da camada ionosférica, provém de três camadas da atmosfera do Sol. A Figura 7 apresenta a localização das referidas camadas (KIRCHHOFF, 1991).

Figura 7 – Representação das três camadas solares mais externas.



Fonte: Adaptado de Kirchhoff (1991).

A camada mais externa e que apresenta as temperaturas mais elevadas, da ordem de milhões de Kelvin (K), é a corona (também denominada de coroa). A fotosfera é uma camada que possui espessura de cerca de 300 km, onde se origina a radiação mais intensa, situada na região visível do espectro eletromagnético. Entre a corona e a fotosfera está a cromosfera, com cerca de 15.000 km de espessura, sendo que a radiação proveniente da mesma é muito mais fraca do que a da fotosfera (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2000).

Conforme apresentado na Figura 7, percebe-se que na cromosfera e na corona a temperatura solar aumenta repentinamente à medida que se afasta do centro do Sol. Na cromosfera a temperatura pode oscilar de 5.000 a 500.000 K, enquanto na corona ela varia de 500.000 a 1.000.000 K. Esse aquecimento da cromosfera e da corona deve ter uma fonte de energia que não são os fótons produzidos no interior do Sol, pois se fosse essa fonte de energia, a cromosfera e a corona deveriam ter temperaturas menores do que a fotosfera, no entanto, isso não ocorre. Pesquisadores postulam que a fonte de energia são campos magnéticos variáveis, formados na fotosfera e transportados para a cromosfera e corona através de correntes elétricas, deixando parte de sua energia nessas duas regiões (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2000).

O Sol também emite, além da radiação eletromagnética, um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas denominado de vento solar. A radiação eletromagnética, assim como o vento solar, envia para a Terra energia, que por sua vez contribui para a formação da ionosfera (KIRCHHOFF, 1991). Enquanto a radiação eletromagnética viaja a velocidade da luz no vácuo, o vento solar possui uma velocidade de, aproximadamente, 400 km/s (McNAMARA, 1991). O vento solar consiste em um fluxo de plasma ionizado que parte do campo magnético solar preenchendo o meio interplanetário. É

formado por, aproximadamente, 50,9% de elétrons, 47,3% de prótons e 1,8% de  $\text{He}^{2+}$  (GUIMARÃES; SILVA, 2003). Não é possível notar o vento solar na superfície terrestre, devido à densidade do vento ser muito baixa (McNAMARA, 1991). Entretanto, sendo as partículas carregadas eletricamente, as mesmas afetam o campo magnético da Terra e a camada ionosférica.

A radiação solar eletromagnética e o vento solar são suscetíveis a várias alterações devido às tempestades solares, o que acarreta na alteração das condições da ionosfera e do campo geomagnético. De acordo com Kirchoff (1991), uma tempestade solar caracteriza-se pelo aumento significativo na radiação solar eletromagnética, na velocidade e concentração do vento solar. No instante em que a radiação e as partículas atingem a Terra, ocorrem os fenômenos denominados de tempestades ionosféricas e tempestades geomagnéticas. Esses fenômenos modificam significativamente o comportamento da ionosfera.

### 3.2 Estratificação da Atmosfera Terrestre

A atmosfera pode ser considerada um conjunto de camadas de gases concêntricas e esféricas a Terra. A sua estrutura está relacionada com diversos elementos, sejam eles eletromagnéticos, térmicos e químicos (SEEBER, 2003). Esses elementos variam sensivelmente em função de vários parâmetros: hora, latitude, longitude, época do ano e atividade solar. A atmosfera terrestre pode ser dividida em função de fatores, tais como: temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (SEEBER, 2003). A Figura 8 apresenta a estratificação da atmosfera de acordo com os fatores citados e respectivos intervalos de altura:

Figura 8 – Estratificação da atmosfera terrestre.

Altura [km]	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação
100.000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera
10.000		Ionosfera		
1.000	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera
100				
10	Estratosfera			
	Troposfera			

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

De acordo com a proposta da pesquisa é considerada a divisão da atmosfera em relação à propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera, pois, ao se propagarem nestas camadas, os sinais GNSS sofrem diferentes influências.

A camada compreendida entre a superfície física terrestre até, aproximadamente, 50 km de altura é a troposfera, constituída por partículas neutras (SEEBER, 2003); a maior concentração de gases situa-se até uma altura de 12 km, composta por oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d'água, entre outros compostos (SAPUCCI, 2001). Nesta camada a propagação do sinal depende, exclusivamente, do conteúdo do vapor d'água, da temperatura e da pressão atmosférica, desde que a frequência do sinal transmitido seja inferior a 30 GHz, caracterizando assim um meio não dispersivo para os sinais GNSS (LEICK, 1995).

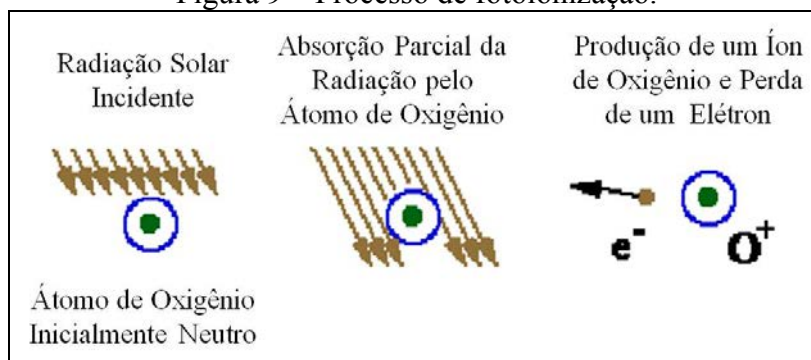
A camada superior da atmosfera entre, aproximadamente, 50 e 1.000 km de altura é a ionosfera. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera.

### **3.3 Formação e Características da Camada Ionosférica**

A ionosfera, diferentemente da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, meio onde a propagação dos sinais depende da frequência. Constituída por partículas livres carregadas, ou seja, íons e elétrons (LIN, 1997), a formação da ionosfera está relacionada, principalmente, com a radiação solar eletromagnética e com a radiação corpuscular incidente na atmosfera terrestre e, com menor importância, com a radiação cósmica (FEDRIZZI, 1999).

No instante que a radiação solar eletromagnética, principalmente na faixa espectral do extremo ultravioleta e do raio-X, incide sobre a atmosfera neutra há uma produção de grande quantidade de íons e elétrons livres através do processo de fotoionização (EL GIZAWY, 2003; McNAMARA, 1991). O processo de fotoionização para um átomo de oxigênio é esquematizado na Figura 9.

Figura 9 – Processo de fotoionização.



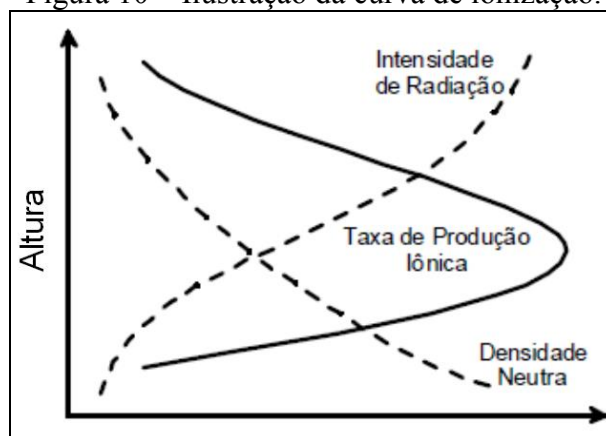
Fonte: Adaptado de El Gizawy (2003).

Quando a energia dos fótons que atingem o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização ocorre a perda de elétrons do referido elemento, dando origem a um íon positivo ( $O^+$ ) e elétrons livres ( $e^-$ ). A colisão de partículas energéticas carregadas de origem solar (vento solar) ou galáctica (raios cósmicos) também produzem íons e elétrons livres.

A recombinação consiste no processo inverso da fotoionização, sendo este o principal processo nos quais elétrons livres são perdidos na parte superior da ionosfera (McNAMARA, 1991). A recombinação é dividida em dois tipos: radiativa e dissociativa. A primeira caracteriza-se por elétrons combinarem diretamente com íons positivos, gerando átomos neutros. Já a recombinação dissociativa ocorre em duas etapas: na 1ª etapa íons positivos  $Y^+$  (formados por fotoionização) interagem com moléculas neutras  $A_2$  (por exemplo oxigênio e nitrogênio) formando  $Y^+ + A_2 = AY^+ + A$ ; na 2ª etapa elétrons combinam com as moléculas de cargas positivas  $AY^+$  resultando em dois átomos neutros e novamente ocorrendo a perda de elétrons livres ( $AY^+ + e^- = A + Y$ ) (McNAMARA, 1991).

À medida que a radiação solar eletromagnética percorre a atmosfera mais densa, a produção de elétrons se eleva até um patamar onde a densidade de elétrons é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons (FEDRIZZI, 1999). A Figura 10 apresenta uma ilustração da curva de ionização.

Figura 10 – Ilustração da curva de ionização.



Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997) apud Rodrigues (2003).

A ionosfera é dividida em três camadas ou regiões principais, denominadas de D, E e F, devido à diversidade de moléculas e átomos presentes na atmosfera e às suas diferentes taxas de absorção (MATSUOKA, 2007; FEDRIZZI, 1999; DAVIES, 1990). Essas camadas são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons à medida que a altura se eleva. A camada D consiste na região da ionosfera que vai de 50 a 90 km de altura (DAVIES, 1990). Possui como fontes primárias de ionização a radiação Lyman- $\alpha$ , a radiação cósmica e o raio-X (LIU, 2004). Essa camada é influenciada, principalmente, pela radiação solar. O nível de densidade de elétrons livres é maior durante o dia, ao contrário da noite, onde a densidade atinge baixos níveis. De acordo com Davies (1990), a camada D é importante na propagação de ondas, atuando como uma fonte refletora dos sinais de baixa frequência, nas faixas VLF (*Very Low Frequency*), de 10 a 30 kHz, e LF (*Low Frequency*), de 30 a 300 kHz.

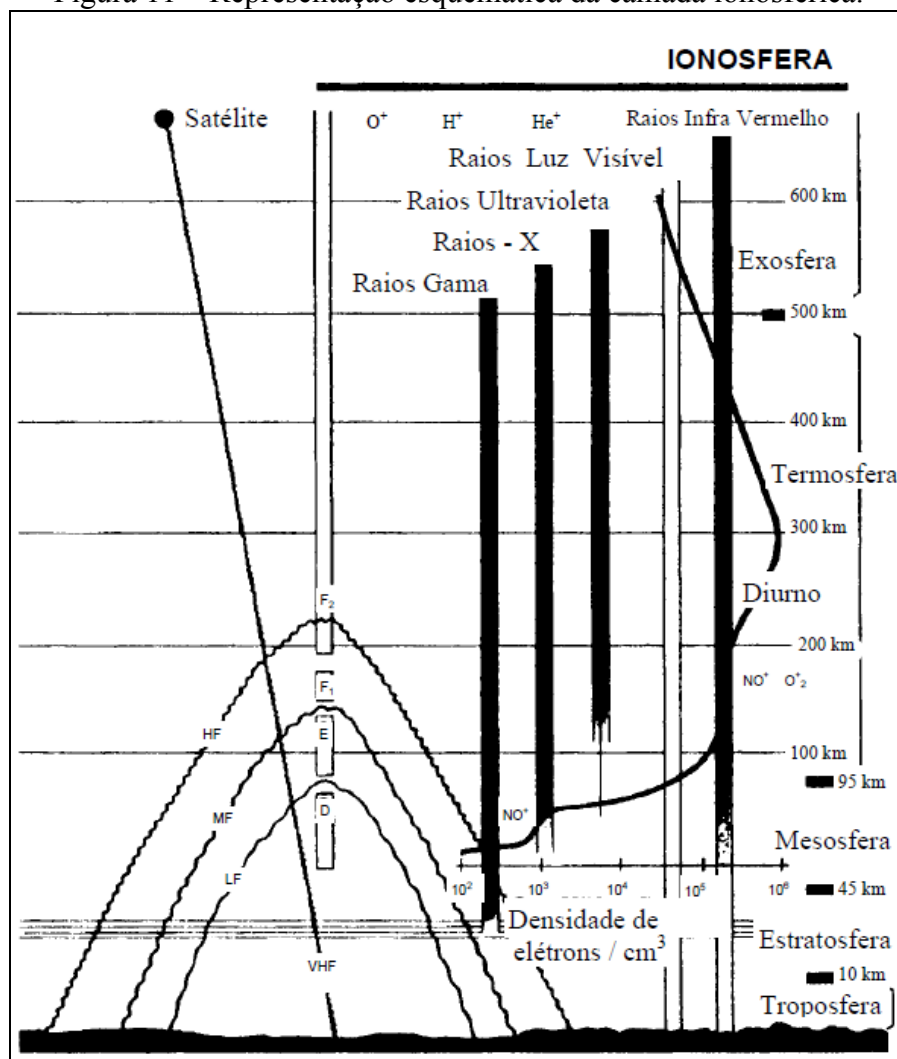
Ainda de acordo com Davies (1990), a próxima subcamada da ionosfera é a camada E, que vai de 90 a 140 km de altura. O comportamento dessa subcamada depende do nível de atividade solar e do ângulo zenital do Sol. Uma das principais características da camada E é que a mesma é livre de distúrbios e somente está presente durante o dia. A fonte primária de ionização consiste na radiação solar eletromagnética na faixa do raio-X.

Já a camada F corresponde ao intervalo da ionosfera entre 140 e 1.000 km de altura, sendo subdividida em outras duas camadas: F1 e F2. A camada F1 vai da altura de 140 km até, aproximadamente, 200 km e apresenta uma típica concentração de elétrons variando com relação à atividade solar de  $2,3 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> a  $3,3 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup>. Durante a noite essa região completamente desaparece, pois a densidade de elétrons é controlada principalmente pelo ângulo zenital do Sol. A fonte primária de ionização dessa camada é a radiação solar do extremo ultravioleta. Por outro lado, a camada F2 corresponde ao intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 até 1.000 km. É nessa região que ocorre o pico máximo de

densidade de elétrons (entre 300 e 450 km). A radiação ionizante desta camada é basicamente a mesma responsável pela ionização da camada F1, porém, ao contrário desta, a camada F2 não segue a mesma variação diurna e sazonal (DAVIES, 1990).

A Figura 11 apresenta a distribuição das camadas, bem como, a densidade de elétrons ao longo do dia e os vários tipos de ondas que propagam na ionosfera.

Figura 11 – Representação esquemática da camada ionosférica.

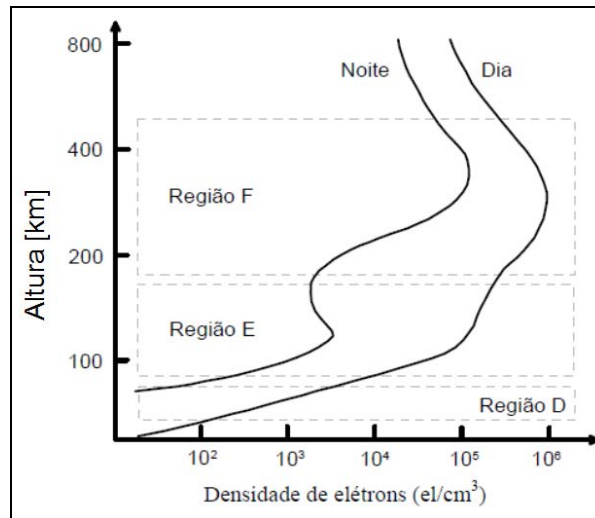


Fonte: Adaptado de Osório (1992) apud Camargo (1999).

A ionosfera possui um comportamento distinto entre os períodos diurno e noturno. A diferença consiste na queda da densidade de elétrons durante o período noturno, devido à ausência da radiação solar. A Figura 12 ilustra essa diferença.



Figura 12 – Densidade de elétrons durante o dia e a noite.



Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997) apud Rodrigues (2003).

Em relação ao comportamento da ionosfera, vários fatores influenciam, tais como a localização geográfica, a estação do ano, nível de atividade solar e geomagnética e as variações dia-a-dia.

### 3.4 Impacto da Ionosfera na Propagação dos Sinais GNSS

Devido às propriedades dispersivas da ionosfera, as ondas eletromagnéticas ao se propagarem nessa camada podem ser refratadas, refletidas e absorvidas. Os erros sistemáticos devido à camada ionosférica devem ser determinados para o período de tempo em que as observações foram realizadas, visando melhorar a acurácia no posicionamento GNSS e na navegação de precisão. Os efeitos ionosféricos nas observações GNSS, de acordo com Leick (1995), são: atraso de grupo e avanço na fase.

As observáveis fase da onda portadora e pseudodistância são determinadas com base na suposição de que o comprimento de onda e a velocidade do sinal são iguais aos valores válidos para uma onda eletromagnética se propagando no vácuo. Entretanto, devido às características físicas da ionosfera, o índice de refração da mesma possui um valor não unitário. As velocidades da fase e de grupo podem ser obtidas conforme as equações (5) e (6), respectivamente (SEEBER, 2003; CAMARGO, 1999):

$$v_f = \frac{c}{n_f} = \frac{c}{1 - \frac{40,3n_e}{f^2}} \approx c \left( 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \right), \quad (5)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{1 + \frac{40,3 n_e}{f^2}} \approx c \left( 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2} \right), \quad (6)$$

onde:

$n_f$  – índice de refração de fase;

$n_g$  – índice de refração de grupo;

$n_e$  – densidade de elétrons; e

$f$  – frequência da onda portadora.

Observando as equações (5) e (6) nota-se que o índice de refração de grupo ( $n_g$ ) é sempre maior que o índice de refração da fase ( $n_f$ ), acarretando, assim, um atraso na velocidade de propagação dos sinais GNSS para o grupo e um avanço na fase, que por sua vez provocam um aumento nas distâncias obtidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase.

O efeito da refração ionosférica pode ser determinado a partir da subtração da distância geométrica satélite-receptor ( $S$ ), a qual é afetada pela refração ionosférica, da distância geométrica livre da refração ionosférica ( $\rho$ ). A distância  $S$  entre o satélite ( $s$ ) e a antena do receptor ( $r$ ), considerando apenas o erro devido à refração ionosférica, é definida por (LEICK, 1995):

$$S = \int_r^s n ds, \quad (7)$$

onde  $n$  consiste no índice de refração para o grupo ou fase.

Já a distância geométrica ( $\rho$ ) entre o satélite e a antena do receptor é determinada quando o índice de refração ( $n$ ) possui um valor unitário:

$$\rho = \int_r^s ds. \quad (8)$$

Portanto, o erro devido à refração da ionosfera ( $I_r^s$ ) é dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n ds - \int_r^s ds. \quad (9)$$

Substituindo os índices de refração de fase ( $n_f$ ) e de grupo ( $n_g$ ), implícitos nas equações (5) e (6), na equação (9) obtêm-se os erros sistemáticos devido à ionosfera para a fase da onda portadora ( $I_{fr}^s$ ), equação (10), e para o código ( $I_{gr}^s$ ), equação (11):

$$I_{fr}^s = \int_r^s \left( 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2} \right) ds - \rho = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (10)$$

$$I_{gr}^s = \int_r^s \left( 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2} \right) ds - \rho = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds. \quad (11)$$

O termo  $\int_r^s n_e ds$  presente nas equações (10) e (11) representa o TEC, ou seja, a quantidade de elétrons livres contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite, e cuja área da base é unitária ( $1 \text{ m}^2$ ) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Portanto, o erro devido à refração ionosférica para a fase da onda portadora e para os sinais modulados pelo código, em função do TEC e da frequência, são obtidos respectivamente por:

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (12)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (13)$$

De acordo com as equações (12) e (13) verifica-se que os erros devido à ionosfera para o código e a fase são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. Seeber (2003) apresenta o efeito que a ionosfera causa na propagação para diferentes frequências, bem como, o erro residual na vertical para combinação linear *ion-free* entre duas frequências. Esses valores estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinação linear *ion-free*.

<b>Uma frequência</b>	<b>400 MHz</b>	<b>1600 MHz</b>	<b>2000 MHz</b>	<b>8000 MHz</b>
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% < do que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
<b>Duas frequências</b>	<b>150/400 MHz</b>	<b>400/2000 MHz</b>	<b>1227/1572 MHz</b>	<b>2000/8000 MHz</b>
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3cm	0,04 cm
90% < do que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, obtido pelas equações (12) e (13), representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos de receptores de dupla frequência.

A respeito das frequências dos sinais GNSS, a Tabela 5 apresenta o erro máximo do efeito de primeira, segunda e terceira ordem, na direção vertical, esperado para as portadoras L1 e L2 e para a *ion-free* (SEEBER, 2003).

Tabela 5 – Erro máximo do efeito de 1ª, 2ª e 3ª ordem devido à ionosfera, na direção vertical.

<b>Frequência</b>	<b>Efeito de 1ª ordem (1/f<sup>2</sup>)</b>	<b>Efeito de 2ª ordem (1/f<sup>3</sup>)</b>	<b>Efeito de 3ª ordem (1/f<sup>4</sup>)</b>
L1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
<i>ion-free</i>	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

### 3.5 Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e suas Variações

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, o qual representa o número de elétrons contidos no caminho percorrido pelo sinal, do satélite ao receptor.

O TEC é dado em elétrons/m<sup>2</sup>, entretanto, devido os valores apresentarem uma ordem de grandeza elevada, adota-se como unidade o TECU (*TEC Unit*), sendo 1 TECU equivalente a  $1 \times 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>.

O TEC pode ser convertido em erro na distância medida pela fase ou código, nas frequências das portadoras L1, L2 e L5, utilizando as equações (12) e (13). O

módulo do erro é o mesmo para as duas observáveis, diferenciando apenas o sinal (positivo para o código e negativo para fase):

- Portadora L1, tem-se que 1 TECU  $\approx \pm 0,162$  m;
- Portadora L2, tem-se que 1 TECU  $\approx \pm 0,267$  m; e
- Portadora L5, tem-se que 1 TECU  $\approx \pm 0,291$  m.

O conteúdo total de elétrons pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias ( $PD_{1r}^s, PD_{2r}^s$ ) advindas dos códigos em L1 e L2, a partir da seguinte combinação linear (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (PD_{2r}^s - PD_{1r}^s) - e_{PD_{12}} \right], \quad (14)$$

sendo:

$f_1$  – frequência da onda portadora L1;

$f_2$  – frequência da onda portadora L2; e

$e_{PD_{12}}$  – erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

A estimativa do TEC também pode ser determinada a partir da combinação linear entre as medidas de fase ( $\Phi_{1r}^s, \Phi_{2r}^s$ ) das portadoras L1 e L2 (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\lambda_2 \Phi_{2r}^s - \lambda_1 \Phi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\Phi_{12}} \right], \quad (15)$$

onde:

$\lambda_1$  – comprimento de onda da portadora L1;

$\lambda_2$  – comprimento de onda da portadora L2;

$N_{1r}^s$  – ambiguidade da fase da portadora L1;

$N_{2r}^s$  – ambiguidade da fase da portadora L2; e

$e_{\Phi_{12}}$  – erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

De acordo com Skone (1998), os valores de TEC calculados por meio da pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que aqueles obtidos através da fase da onda portadora. Isso se deve a magnitude da precisão da pseudodistância ser da ordem métrica, ao contrário da fase que é da ordem centimétrica a milimétrica (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Em relação ao estado da ionosfera, várias variáveis influenciam no comportamento, tais como: variações diárias e sazonais, ciclos de longos períodos, variações com a atividade geomagnética, influências da latitude, longitude, dentre outras (MATSUOKA, 2007; LEICK, 1995). Elas são abordadas na sequência.

### **3.5.1 Variações diárias e sazonais**

A alteração da densidade de elétrons na ionosfera está relacionada com as variações temporais, que correspondem às variações diárias, sazonais e ciclos de longos períodos (devido aos ciclos solares) (CAMARGO, 1999).

As variações diárias são provocadas por mudanças que acontecem em determinados locais da ionosfera, no entanto desaparecem no período noturno devido à recombinação dos elétrons. Há a variação diária simplesmente devido à iluminação do Sol, ou seja, devido à radiação solar. No decorrer do dia a densidade de elétrons depende da hora local, atingindo um valor máximo entre as 12 e 16 horas (WEBSTER, 1993). Um segundo valor máximo acontece na região de baixas latitudes, logo após o ocaso do Sol, entre 21 e 22 horas local, devido a formação noturna da AIE (McNAMARA, 1991; DAVIES, 1990).

Com relação às variações sazonais, a densidade de elétrons varia durante os meses do ano em uma determinada região devido ao ângulo zenital do Sol possuir uma variação sazonal (McNAMARA, 1991). Para o setor brasileiro, os menores valores de densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses do solstício de inverno, e os maiores valores nos meses de março, abril, maio, setembro e outubro (equinócios de outono e primavera) e nos meses do solstício de verão.

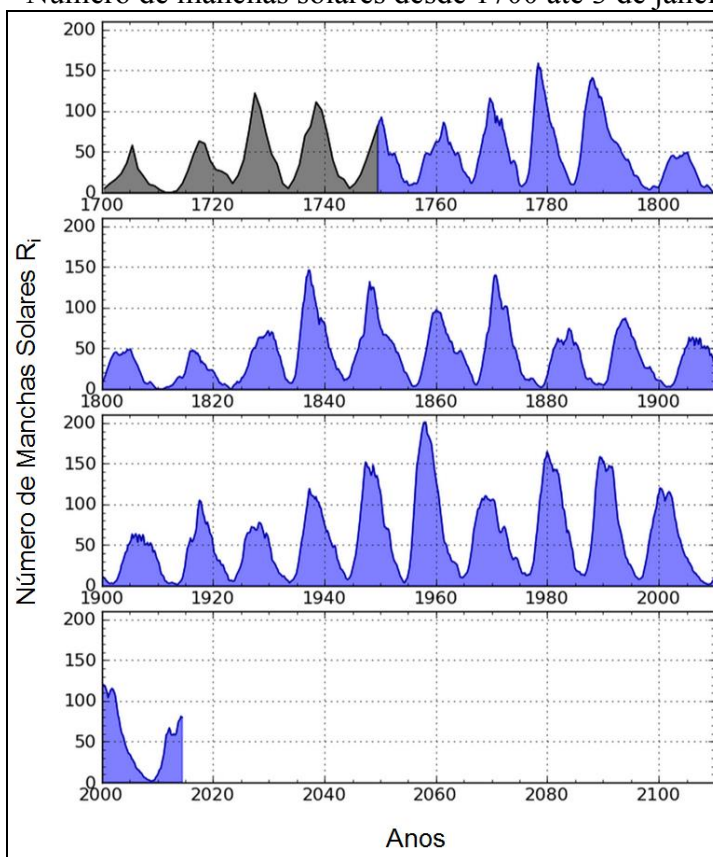
### **3.5.2 Variações com os ciclos solares**

As variações de ciclos de longos períodos correspondem a ciclos de, aproximadamente, 11 anos e estão relacionadas à ocorrência de manchas solares; o aumento da ionização da camada é proporcional ao número de manchas. As manchas solares são

regiões frias e escuras que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões brilhantes que emitem um nível elevado de radiação ultravioleta. Assim, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (McNAMARA, 1991). O período de duração de uma mancha solar não é constante; algumas manchas aparecem por apenas alguns dias, enquanto outras permanecem por várias rotações solares, cujo período é de 27 dias aproximadamente (SCHAER,1999 apud MATSUOKA, 2007).

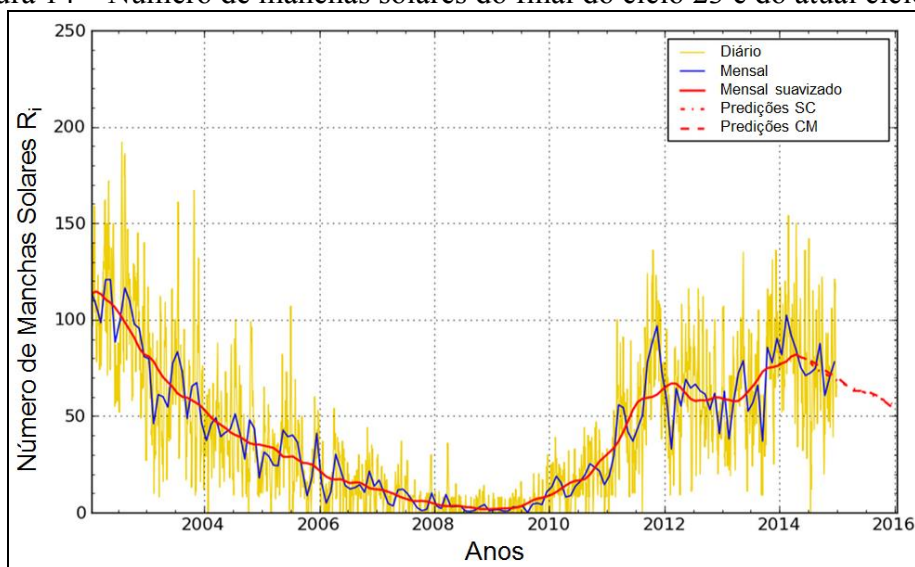
A Figura 13 apresenta os registros de manchas solares desde 1700 até 3 de janeiro de 2015. Importante ressaltar que, de 1700 até 1750, as médias dos números de manchas foram anuais (em preto), ao passo que, de 1750 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pelas médias mensais (em azul). Atualmente o Sol encontra-se no ápice do ciclo 24 (Figura 14).

Figura 13 – Número de manchas solares desde 1700 até 3 de janeiro de 2015.



Fonte: Adaptado de <<http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

Figura 14 – Número de manchas solares do final do ciclo 23 e do atual ciclo 24.



Fonte: Adaptado de <<http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

### 3.5.3 Variações com a atividade geomagnética

A variabilidade da quantidade de radiação eletromagnética emitida pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que vão de alguns minutos a algumas semanas (WEBSTER, 1993). Essas variações da radiação solar estão associadas a três tipos de fenômenos: explosões solares, buracos na coroa e manchas solares.

As explosões solares são caracterizadas por uma rápida elevação do nível de energia na superfície do Sol, com emissão de radiação em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, especialmente nas faixas do raio-X e extremo ultravioleta. A duração de uma explosão pode variar de três minutos a algumas horas, sendo o tempo médio aproximadamente 30 minutos (DAVIES, 1990).

Se as explosões solares forem muito intensas têm-se as ejeções de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) (McNAMARA, 1991; DAVIES, 1990), que consistem de bolhas de gás quentes (plasma), de bilhões de toneladas, aquecidas pelo campo magnético do Sol. As CME's viajam a aproximadamente  $10^6$  km/h e levam de um a quatro dias para atingir a Terra. As tempestades geomagnéticas mais intensas são frequentemente relacionadas à ocorrência de uma CME (MATSUOKA et al., 2013).

Caso a radiação proveniente de uma explosão solar seja direcionada a Terra, uma série de fenômenos pode ser desencadeada na ionosfera, genericamente denominados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS). Durante os eventos de DIS podem ocorrer rápidas

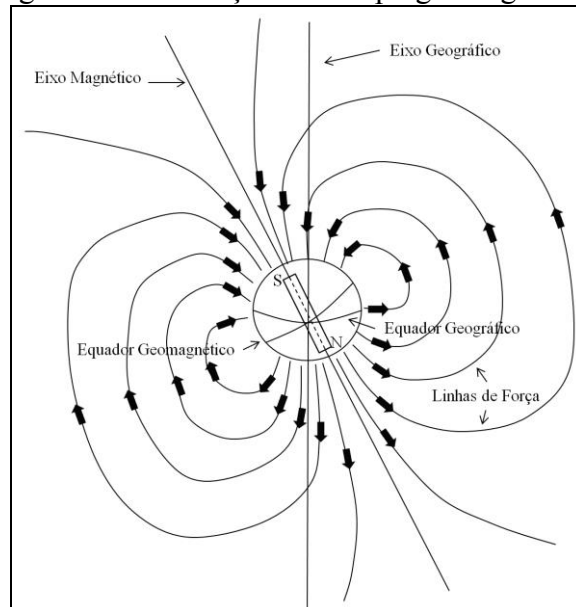


variações na fase e/ou amplitude e perda de potência do sinal GNSS (RUVIARO; MATSUOKA; CAMARGO, 2013).

Os buracos na coroa consistem nas fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, sendo mais comuns no período de declínio da atividade solar (DAL POZ, 2010). O fenômeno relacionado às manchas solares foi descrito na subseção 3.5.2.

O campo geomagnético (também denominado de campo magnético terrestre) está localizado próximo à superfície da Terra e pode ser aproximado a um dipolo, cujo eixo não coincide com o eixo de rotação terrestre (FONSECA JUNIOR, 2002; McNAMARA, 1991). A Figura 15 apresenta uma ilustração do campo geomagnético com as suas linhas de força.

Figura 15 – Ilustração do campo geomagnético.



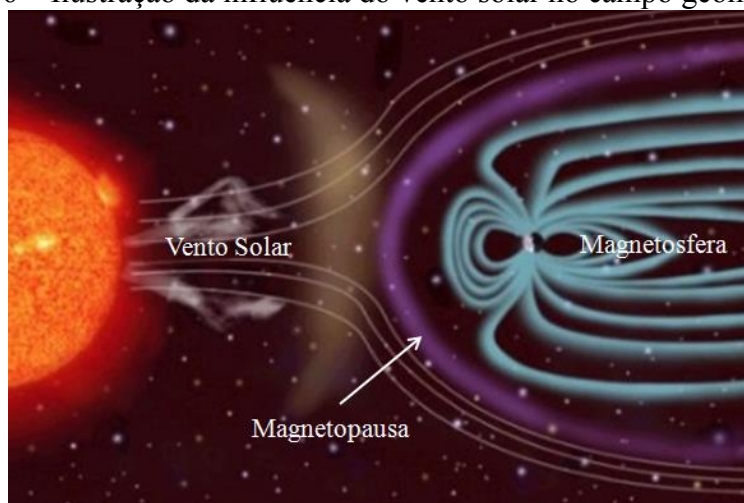
O campo possui a forma aproximada de uma barra magnética, similar a um ímã, na qual possui dois Pólos magnéticos: Pólo Norte e Pólo Sul magnético. O plano do equador geomagnético é perpendicular ao eixo magnético, análogo ao plano do equador geográfico que é perpendicular ao eixo geográfico, entretanto, os dois eixos não são coincidentes. Na realidade, o eixo magnético é inclinado com relação ao eixo geográfico num valor aproximado de  $-18^\circ$  (para região de Presidente Prudente/SP), denominado declinação magnética (ON, 2014).

A variação da densidade de elétrons sofre influências do campo magnético da Terra. Na ionosfera, as linhas de força controlam os movimentos das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético proporcionará alterações nas

condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns percebidas são aquelas produzidas por meio das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Podem ocorrer também variações bruscas e intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

Ressalta-se que sob a influência de intensos eventos solares, que proporcionam fortes ventos solares, as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas, exercendo grande influência na ionosfera terrestre, causando as tempestades geomagnéticas, que por sua vez originam as tempestades ionosféricas (DAL POZ, 2010; FEDRIZZI, 2003). A Figura 16 ilustra a influência do vento solar no campo geomagnético.

Figura 16 – Ilustração da influência do vento solar no campo geomagnético.



Fonte: <<http://sci.esa.int/cluster/36645-solar-wind/>>. Acesso em: 26 jun. 2014.

A velocidade do vento solar pode passar de 300-400 km/s para mais de 1.000 km/s durante eventos solares intensificados. Dependendo do grau de intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, passando de 10 para seis raios terrestres (BATISTA, 2003).

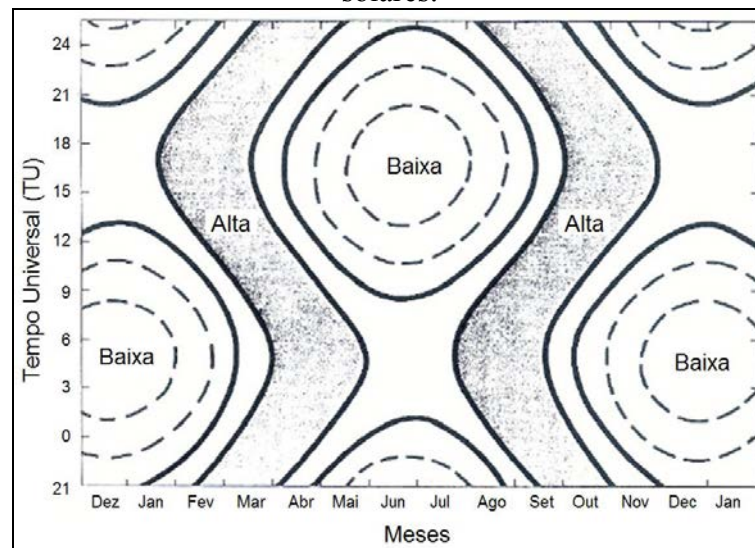
Os eventos solares que causam tempestades geomagnéticas são: explosões solares, corrente de vento solar de alta velocidade proveniente de buracos na coroa e desaparecimento súbito de filamentos (SDF – *Sudden Disappearing Filaments*). De acordo com Gonzalez et al. (1994), os SDF e as explosões solares são fenômenos típicos de períodos de alta atividade solar, ao passo que os buracos na coroa ocorrem com maior frequência durante períodos de baixa e média atividade.

Os filamentos são grandes estruturas relativamente frias na cromosfera solar, que desaparecem subitamente, jogando material do filamento em direção ao meio

interplanetário, similar ao efeito de uma explosão solar (McNAMARA, 1991). O súbito desaparecimento de filamento pode afetar o campo magnético da Terra e, conseqüentemente, a ionosfera.

A rotação da Terra sobre o seu eixo conduz a situações no qual o eixo do campo geomagnético fica perpendicular com a direção do vento solar. Isto acarreta uma variação de suscetibilidade por um período de 24 horas (THOMPSON, 1985 apud McNAMARA, 1991), conforme apresentado na Figura 17. A probabilidade (suscetibilidade) de ocorrer dias geomagneticamente perturbados é alta nas duas áreas mais escuras em formato de S da Figura 17, e baixa nas demais áreas.

Figura 17 – Suscetibilidade do campo geomagnético estar sendo perturbado por eventos solares.



Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

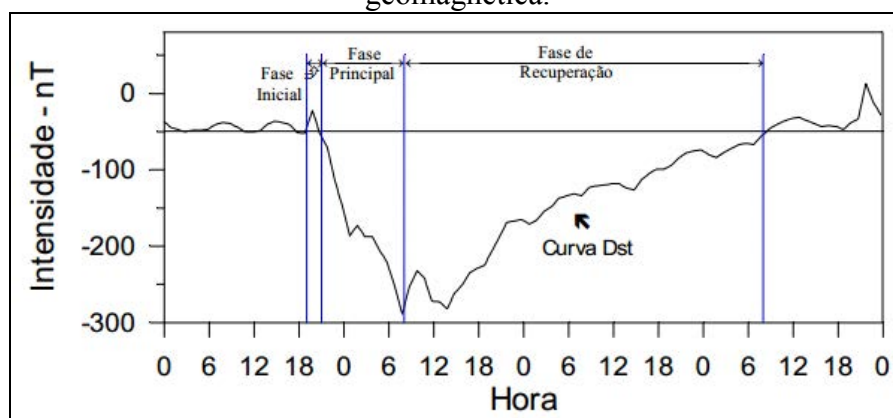
Analisando a Figura 17 percebe-se a variação sazonal e diária de suscetibilidade do campo geomagnético. Em geral, os efeitos geomagnéticos de uma explosão solar, vento solar de alta velocidade ou SDF serão maiores durante os equinócios do que durante os solstícios.

Para descrever em escala planetária a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas utiliza-se, por exemplo, o índice geomagnético Dst (*Disturbance Storm-Time*) (FEDRIZZI, 2003).

O índice Dst, dado em nanoTesla (nT), representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial (YAMASHITA, 1999). É a partir desse índice que se melhor define uma tempestade geomagnética, pois, antes do início da tempestade o índice apresenta um pico de

intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito; após esse pico se desenvolve a fase principal que é caracterizada pela brusca queda no valor da intensidade do índice; depois de alcançar o mínimo, o índice começa a se elevar, período esse denominado de fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999). Um exemplo da assinatura descrita é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Curva Dst entre os dias 5 e 8 de setembro de 1982 com uma intensa tempestade geomagnética.



Fonte: Yamashita (1999).

A classificação da tempestade geomagnética de acordo com o índice Dst é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação da tempestade geomagnética em função do índice Dst.

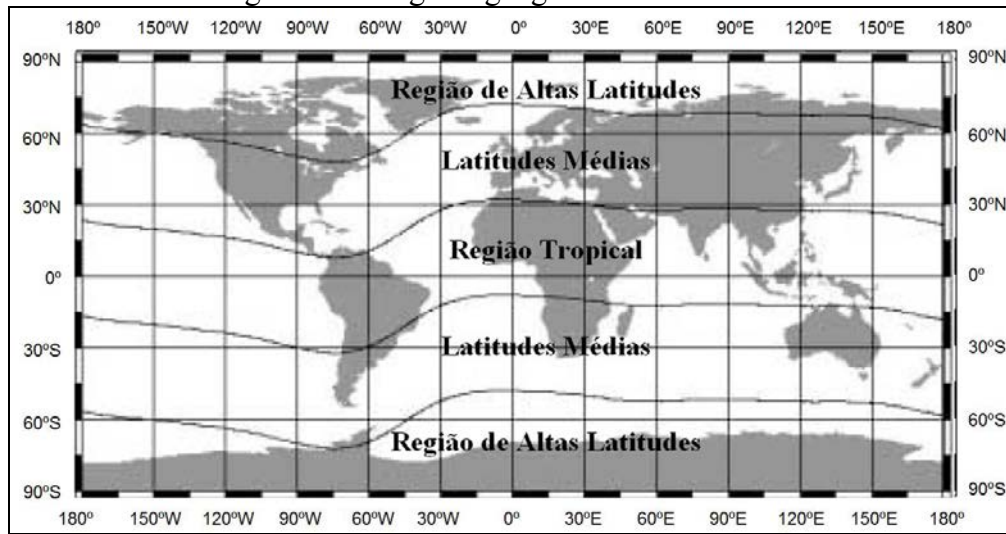
<b>Condição da Tempestade Geomagnética</b>	<b>Índice Dst [nT]</b>
Fraca	$Dst > -50$
Moderada	$-50 > Dst > -100$
Intensa	$-100 > Dst > -300$
Superintensa	$Dst < -300$

Fonte: Gonzalez, Tsurutani e Gonzalez (1999).

### 3.5.4 Regiões geográficas da ionosfera

Apesar da impossibilidade de definir, exatamente, as amplitudes das regiões geográficas da ionosfera em termos de latitude geomagnética, Fonseca Junior (2002) apresenta, aproximadamente, as regiões e suas respectivas amplitudes (Figura 19):

Figura 19 – Regiões geográficas da ionosfera.



Fonte: Adaptado de Fonseca Junior (2002).

A região de altas latitudes está limitada entre  $\pm 60^\circ$  a  $90^\circ$ , a região de latitudes médias entre  $\pm 20^\circ$  a  $60^\circ$  e a região tropical limita-se entre as latitudes  $\pm 20^\circ$ . Os limites destas regiões não são definidos arbitrariamente, mas selecionados em função da evidência de regiões com processos ionosféricos relativamente homogêneos (FONSECA JUNIOR, 2002).

A região de latitudes médias – zona transitória entre as regiões tropical e de altas latitudes – é caracterizada por apresentar um comportamento menos variável do que as outras regiões e a que mais se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003). Entretanto, na ocorrência de severas tempestades geomagnéticas, as irregularidades da densidade de elétrons que ocorrem na região tropical podem se estender para as regiões de latitudes mais afastadas, até as latitudes médias, impactando assim os sinais GNSS. Efeitos da cintilação ionosférica também podem, às vezes, serem detectados nessa região, embora sejam mais frequentes nas regiões tropical e de altas latitudes.

A região de altas latitudes, localizada próxima às regiões polares, é uma das piores regiões no que diz respeito às comunicações em alta frequência, mas uma das melhores para estudos dos efeitos ionosféricos nos sinais GNSS. A região, caracterizada por ser muito variável espacialmente e temporalmente (McNAMARA, 1991), engloba as zonas da capa polar, auroral e sub-região auroral (EL GIZAWY, 2003). Durante a precipitação de partículas, que aumenta a densidade de elétrons, mudanças da ordem de várias dezenas de TECU podem ocorrer na região de altas latitudes (SCHLEGEL, 2007 apud DAL POZ, 2010).

A zona da capa polar localiza-se acima da latitude geomagnética de  $75^\circ$ . Nesta área ocorrem irregularidades de pequena escala que causam cintilações ionosféricas,

com tamanhos de poucos metros até 1 km. O aumento na densidade de elétrons na zona está concentrado na região F da camada ionosférica, entre as alturas de 250 e 400 km (EL GIZAWY, 2003). Nessa zona latitudinal as linhas do campo geomagnético são abertas, permitindo que o plasma do vento solar penetre diretamente na região.

A zona auroral – localizada entre as latitudes geomagnéticas de  $60^\circ$  e  $75^\circ$ , abrangendo os territórios do Alaska, Canadá, Groelândia, Islândia, norte europeu e algumas áreas russas – é também conhecida como oval auroral (EL GIZAWY, 2003). Sua largura pode-se expandir no lado noturno durante períodos de tempestades geomagnéticas. Essa zona é caracterizada pela ocorrência de auroras boreais. A interação entre o vento solar e o campo geomagnético produz uma aceleração dos elétrons na região próxima à Terra. Os elétrons energizados se precipitam na direção de altas latitudes, ao longo das linhas de campo geomagnético, resultando assim em emissões óticas denominadas de auroras.

Cintilações ionosféricas também ocorrem nessa área durante eventos de tempestades geomagnéticas (EL GIZAWY, 2003), prejudicando assim a resolução da ambiguidade no posicionamento preciso e aplicações em redes. El Gizawy (2003) ressalta que a ocorrência de cintilação auroral está fortemente correlacionada com eventos de tempestades geomagnéticas, ao passo que a ocorrência de cintilação equatorial está vinculada com as variações diurna e sazonal do TEC e com as irregularidades ionosféricas.

A sub-região auroral está localizada alguns graus ao sul da zona auroral. A densidade de elétrons nessa região é bem inferior que a densidade na zona auroral, o que acarreta em altos gradientes do TEC na região limítrofe das duas áreas (EL GIZAWY, 2003).

Por fim a região tropical, que pode ser dividida em duas regiões: a região equatorial, limitada entre as latitudes geomagnéticas de  $\pm 5^\circ$ , e a região de baixas latitudes, que abrange uma área limitada pelas latitudes  $\pm 5^\circ$  a  $20^\circ$  (BATISTA, 2003).

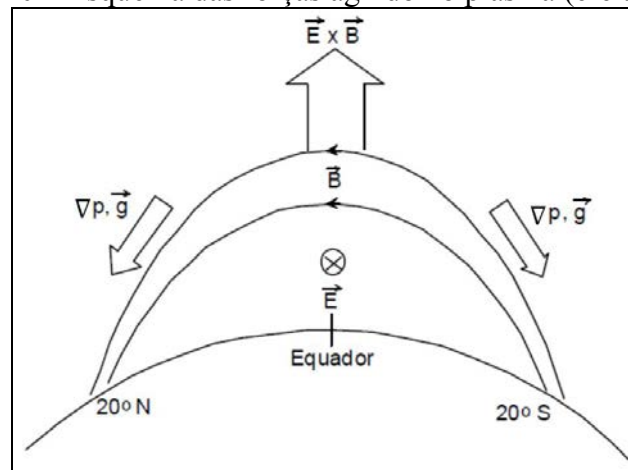
A atividade da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é altamente correlacionada com a hora local, geralmente iniciando seu desenvolvimento por volta das 6-7 horas e alcançando sua atividade máxima às 14-15 horas, apresentando os maiores valores de TEC do globo terrestre. Um segundo máximo na atividade pode ocorrer por volta das 21 horas local na região de baixas latitudes, com altos gradientes do TEC na direção norte-sul (WANNINGER, 1993). Os efeitos da cintilação ionosférica também estão presentes na região equatorial e de baixas latitudes, sendo os mesmos maiores do que na região de altas latitudes (EL GIZAWY, 2003).

O principal fenômeno da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é a AIE provinda do efeito fonte (APPLETON, 1946 apud MATSUOKA, 2007).

Devido à alta radiação solar na região equatorial e ao campo geomagnético, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre sensíveis consequências, sendo uma delas denominada de efeito fonte, cuja origem é motivada pela movimentação dos elétrons ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador.

Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela (BATISTA, 2003). Durante o dia o campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) é direcionado para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético ( $\mathbf{B}$ ) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por  $\mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$  (BATISTA, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o mesmo inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético. Este movimento ocorre devido à ação da gravidade ( $\vec{g}$ ) e gradientes de pressão ( $\nabla p$ ). Este mecanismo de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como efeito fonte (RODRIGUES, 2003). Um esquema das forças agindo no plasma é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema das forças agindo no plasma (efeito fonte).

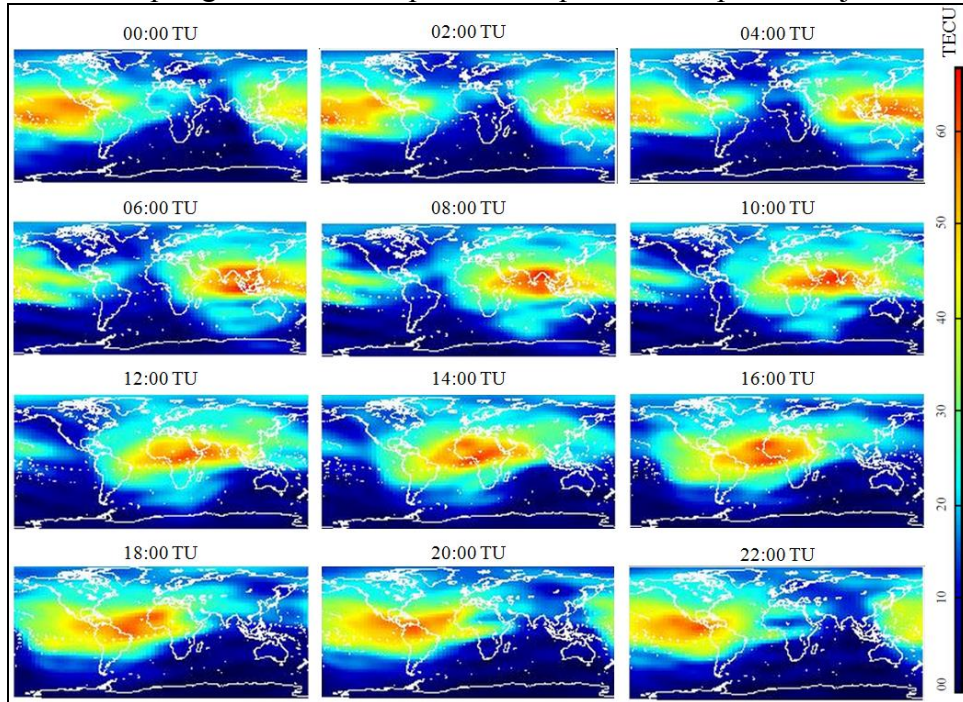


Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003).

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador magnético, entre 10° e 20° de latitude geomagnética. No equador magnético a ionização fica menos intensa, resultando em gradientes de TEC na direção norte-sul. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) ou Anomalia de Appleton

(APPLETON, 1946 apud MATSUOKA, 2007). Com objetivo de mostrar a anomalia, a Figura 21 apresenta uma sequência de mapas globais de TEC produzidos pelo CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*) para o dia 3 de julho de 2012, com resolução de 2 horas. A AIE é representada pelas áreas vermelhas e amarelas dos mapas, caracterizadas por uma maior concentração de elétrons.

Figura 21 – Mapas globais de TEC produzidos pelo CODE para 3 de julho de 2012.



Fonte: Adaptado de <<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim0.jpg>>. Acesso em: 27 jun. 2014.

A AIE varia ao longo do dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta das 14 horas local, e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia noite, normalmente próximo das 21 horas local. Este segundo máximo, em geral, não ocorre durante períodos de baixa atividade solar.

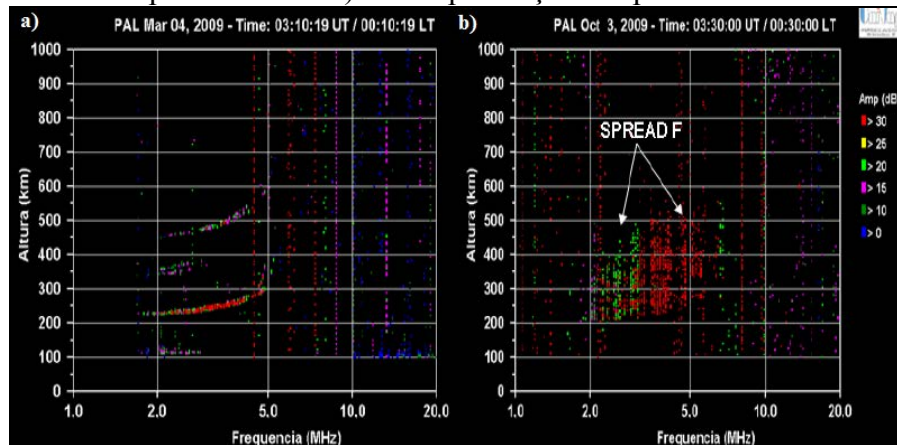
### 3.6 Irregularidades Ionosféricas

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico, que se originam por meio de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T) que ocorrem na ionosfera tropical. A instabilidade R-T dá origem às irregularidades na camada F ionosférica com um amplo espectro de escalas de tamanho, que vão desde alguns centímetros até centenas de quilômetros. Este fenômeno, de irregularidades



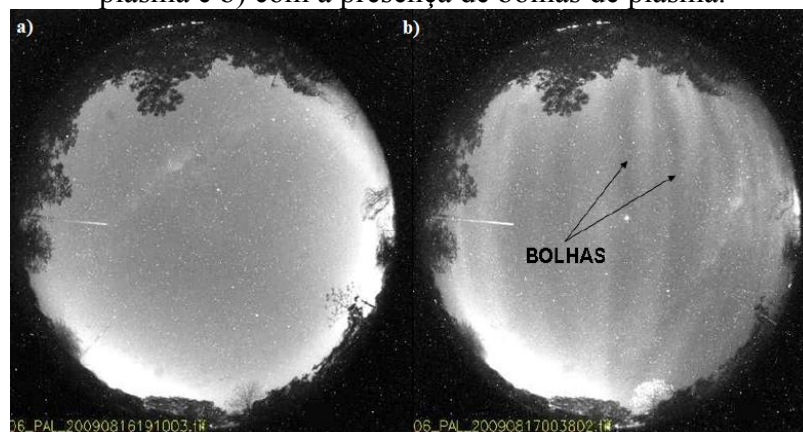
na ionosfera e respectiva manifestação nos dados coletados pelos mais diversos tipos de equipamentos, é conhecido normalmente como Camada F Espalhada (ESF – *Equatorial Spread F*), nome este dado devido ao espalhamento causado pelas irregularidades ionosféricas nos traços de ionogramas equatoriais e de baixas latitudes (RODRIGUES, 2003). Destaca-se que as irregularidades ionosféricas possuem outras nomenclaturas dependendo do tipo de equipamento utilizado, como por exemplo: *spread F* tipo *range* (variação em altura) e *spread F* tipo frequência (variação em frequência) quando o equipamento é uma ionossonda, flutuações de fase ou taxas de variações do TEC quando se utiliza dados GNSS, e depleções ou bolhas de plasma quando se emprega um imageador óptico (ABREU, 2012). As Figuras 22, 23 e 24 mostram, para fins de exemplificação, a presença e a não presença de irregularidades ionosféricas, obtidas com uso de ionossonda digital, imageador all-sky e dados GNSS, respectivamente.

Figura 22 – Ionogramas de ionossonda digital em Palmas/TO, a) sem a presença de espalhamento e b) com a presença de espalhamento.



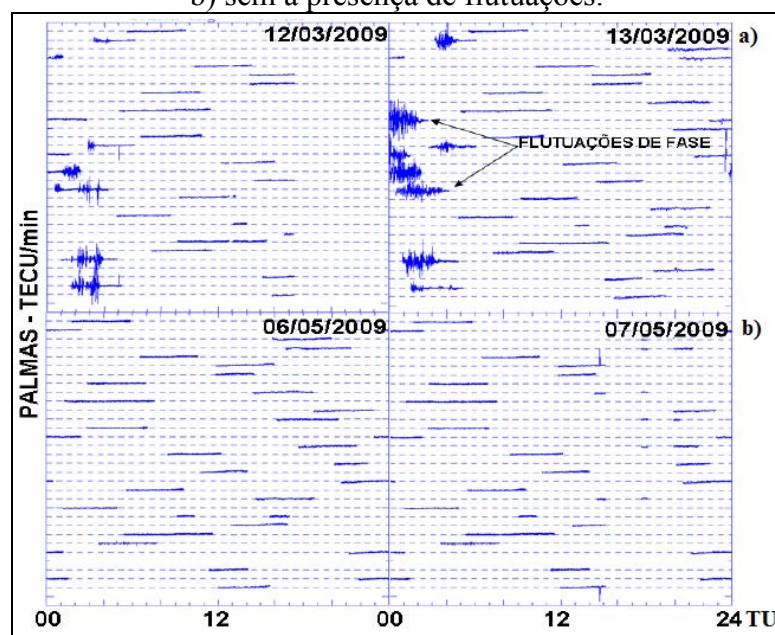
Fonte: Abreu (2012).

Figura 23 – Imagens do imageador all-sky em Palmas/TO, a) sem a presença de bolhas de plasma e b) com a presença de bolhas de plasma.



Fonte: Abreu (2012).

Figura 24 – Flutuações de fase observadas em Palmas/TO, a) com a presença de flutuações e b) sem a presença de flutuações.

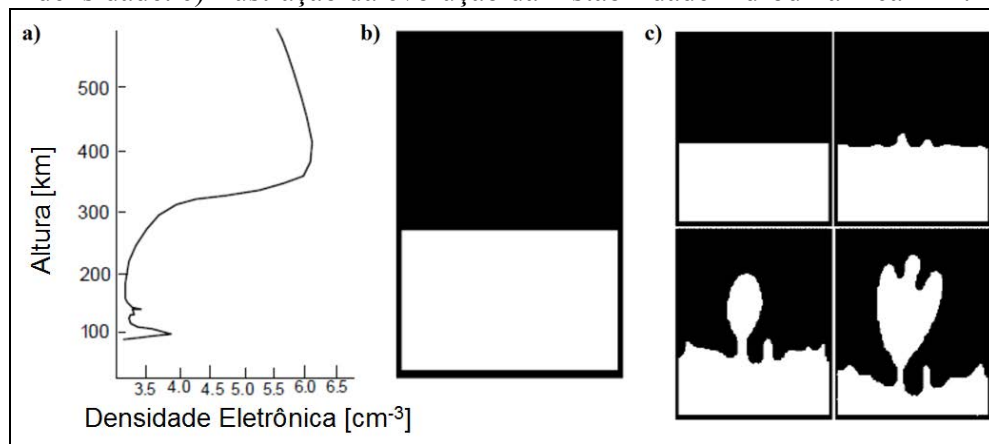


Fonte: Abreu (2012).

Dungey (1956) apud Rodrigues (2003) foi o primeiro a propor a instabilidade R-T como processo gerador da ESF. No entanto, essa teoria foi temporariamente rejeitada, pois explicava apenas a geração de estruturas na porção inferior do perfil de densidade de plasma da camada F. Com a realização de novos estudos, a teoria da instabilidade R-T foi aprimorada e generalizada, incluindo parâmetros do ambiente ionosférico, tais como o campo elétrico ambiente e a ação de ventos neutros, sendo denominada de teoria da instabilidade R-T generalizada, onde muitas das características da ESF podem ser explicadas (RODRIGUES, 2003).

A Figura 25a apresenta um perfil vertical típico da ionosfera tropical para o período do pôr do Sol. Observa-se uma acentuada variação da densidade de elétrons na porção inferior da camada F, dividindo-a em duas regiões distintas: uma de baixa densidade e outra de alta densidade, localizadas respectivamente abaixo e acima da altura de 300 km. Para fins didáticos faz-se uma analogia deste perfil com o caso da instabilidade hidrodinâmica R-T, onde um fluido mais denso é suportado por outro menos denso, como mostra a Figura 25b. Na instabilidade hidrodinâmica R-T, uma pequena perturbação surge na superfície de contato dos dois fluidos e, com a ação da gravidade, esta perturbação se desenvolve até que o fluido de menor densidade tende a se elevar enquanto que o fluido mais denso decai, como ilustra a Figura 25c.

Figura 25 – a) Perfil vertical ionosférico típico para a região equatorial. b) Analogia do perfil mostrado em a) com o caso de um fluido denso sendo suportado por um fluido de menor densidade. c) Ilustração da evolução da instabilidade hidrodinâmica R-T.

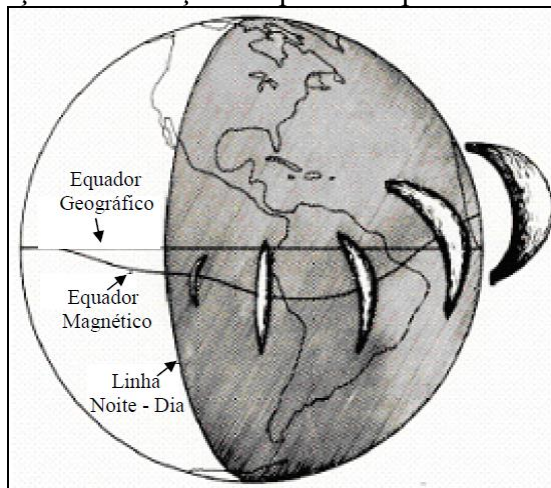


Fonte Kelley (1989) apud Rodrigues (2003).

Contudo, o processo de instabilidade R-T generalizada o qual se aplica à ionosfera não é tão simplório como apresenta a Figura 25. Vários processos e efeitos influenciam a geração e evolução das irregularidades ionosféricas, tais como processos eletrodinâmicos intrínsecos da ionosfera equatorial e de latitudes médias, bem como, efeitos de acoplamento ionosfera-magnetosfera em altas latitudes. Além disso, irregularidades de larga-escala, quando evoluem através da região F, podem gerar ainda irregularidades secundárias de vários tamanhos (RODRIGUES, 2003). A geração de irregularidades secundárias ocorre através de processos de natureza não linear nas bordas das irregularidades de maior escala (FEJER, 1996 apud RODRIGUES, 2003).

Dados de foguetes e satélites através de regiões de ESF mostram acentuadas depleções de plasma, denominadas de bolhas ionosféricas, com altos valores de campo elétrico zonal no seu interior. Radares de espalhamento coerente associam estas regiões de depleção do plasma com estruturas chamadas de plumas. Estas plumas apresentam uma rápida subida e a presença de fortes ecos oriundos de irregularidades com escala de alguns metros no seu interior. A ESF observada em ionogramas equatoriais representa irregularidades na porção inferior da camada F, que podem estar associadas ou não a bolhas ionosféricas que evoluem até a porção superior da ionosfera. Já a ESF observada em ionogramas de baixas latitudes é indicativo de irregularidades imersas em bolhas ionosféricas (RODRIGUES, 2003). As bolhas podem alcançar extensões de 10.000 km e cerca de 150 a 300 km na direção perpendicular (SANTOS, 2001). Acontecem sempre após o pôr do Sol e principalmente no período até meia-noite. A Figura 26 apresenta uma arte da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.

Figura 26 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.



Fonte: Soares (2001) apud Matsuoka (2007).

Para a ocorrência de irregularidades de larga escala são necessárias algumas condições (RODRIGUES, 2003):

- Presença de uma perturbação inicial de larga escala;
- Gradiente direcionado para cima do perfil de densidade de elétrons da ionosfera; e
- Aumento do campo elétrico para leste.

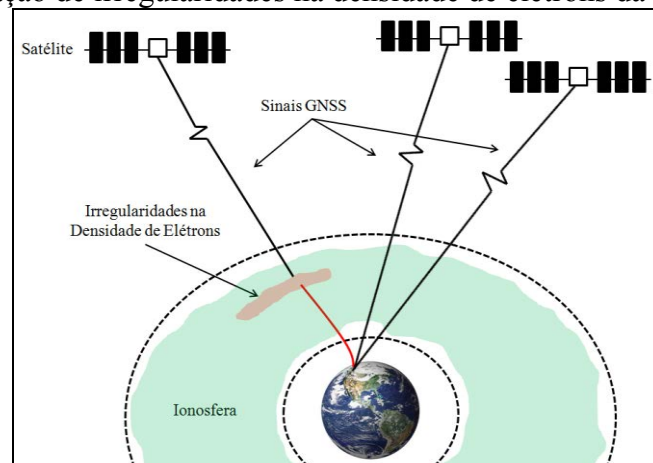
O início do ESF também pode ser afetado por perturbações do campo elétrico originadas em altas latitudes durante tempestades geomagnéticas.

### 3.7 Cintilação Ionosférica

Cintilações ionosféricas são flutuações da amplitude e/ou fase de uma onda eletromagnética, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons  $e$ , conseqüentemente, do índice de refração (RODRIGUES, 2003). A cintilação causa um enfraquecimento no sinal captado pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal (WEBSTER, 1993).

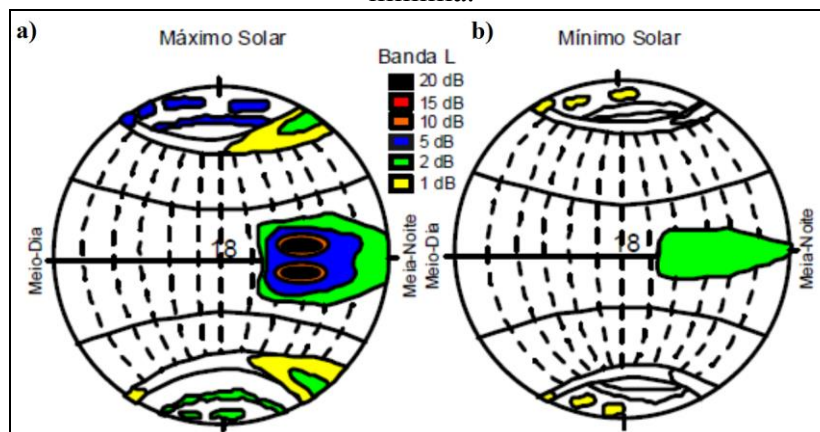
Períodos de cintilação estão associados com a existência de regiões de irregularidades de pequena escala na densidade de elétrons, como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Ilustração de irregularidades na densidade de elétrons da camada ionosférica.



De acordo com Aarons (1982) e Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003), existem três regiões principais de ocorrência das cintilações, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Morfologia global das cintilações durante anos de atividade solar a) máxima e b) mínima.



Fonte: Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003).

A primeira região é a região tropical no período após o pôr do Sol. A segunda região compreende o lado noturno da região da oval auroral e o lado diurno do vértice polar. Por fim, a terceira região corresponde à região mais interna da calota polar, sendo possível observar cintilações a qualquer momento (RODRIGUES, 2003). Nas regiões de latitudes médias os efeitos da cintilação são normalmente negligenciáveis.

As regiões de maior intensidade das cintilações correspondem às regiões de pico (norte e sul) da AIE, localizadas aproximadamente entre as latitudes geomagnéticas 15°N e 15°S. A geração das irregularidades equatoriais e a ocorrência de um máximo secundário de ionização durante o período após o ocaso solar se combinam de forma a resultar o máximo na atividade de cintilação nesta região (RODRIGUES, 2003).

As cintilações em altas latitudes são mais fracas que as cintilações observadas na AIE. Na região tropical, as cintilações são causadas por irregularidades do plasma ionosférico, e nas regiões de altas latitudes a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas (SKONE, 1998).

### **3.8 Ionossonda**

A ionossonda consiste em um equipamento que determina o perfil da densidade de elétrons da ionosfera por meio da emissão de pulsos de energia eletromagnética verticais em relação ao solo, com varredura em frequência tipicamente entre 1 e 25 MHz, que refletem na camada ionosférica e são recebidos pelo equipamento, sendo denominados de ecos (PIMENTA, 2002). A ionossonda digital é dotada de mais capacitação diagnóstica da ionosfera devido à tecnologia utilizada. O modo digital determina, além do perfil da densidade eletrônica, as velocidades de deriva do plasma ionosférico (YAMASHITA, 1999).

Os registros produzidos pelas ionossondas são denominados de ionogramas, que mostram a variação da altura virtual de reflexão dos pulsos eletromagnéticos em função da frequência dos pulsos, e são fornecidas diariamente em intervalos regulares de tempo de 10 em 10 minutos (YAMASHITA, 1999). Exemplo de ionograma pode ser visto na Figura 22.

A altura medida é dita virtual devido ao fato do equipamento medir o tempo decorrido entre a transmissão e recepção de um pulso considerando que o mesmo se propagou à velocidade da luz no vácuo, sendo que na realidade a velocidade de grupo é menor que a velocidade da luz, devido à presença de elétrons livres. Desta forma, as alturas obtidas nos ionogramas são um pouco maiores do que as alturas reais de reflexão (LIU, 2004).

Quando a frequência do pulso aumenta, a altura virtual de um ionograma também aumenta, sendo que quando a reflexão alcança a altura onde o TEC é máximo o pulso incidente ultrapassa a camada, não havendo assim o retorno do pulso e conseqüentemente a ionossonda mede a altura virtual como infinita. A frequência relacionada a essa altura é denominada de frequência crítica (YAMASHITA, 1999).

O fenômeno ESF se manifesta em um ionograma por meio do alargamento do pulso refletido, fazendo com que os traços do ionograma não sejam bem definidos (YAMASHITA, 1999).

Um grande número de informações pode ser extraído a partir da análise de um ionograma, informações essas conhecidas como parâmetros ionosféricos, os quais são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros ionosféricos extraídos do ionograma e suas respectivas nomenclaturas.

fmin	Menor frequência na qual o traço do eco foi observado
fbEs	Menor frequência da onda ordinária, na qual o traço contínuo da camada esporádica foi observado
fxEs	Máxima frequência da onda ordinária, na qual o traço contínuo da camada esporádica foi observado
h'Es	Altura virtual mínima da camada esporádica observada
TIPO	Corresponde ao(s) tipo(s) de esporádica observado
foE	Frequência crítica da onda ordinária correspondente a camada densa mais baixa da região E que causa descontinuidade na altura do traço E
h'E	Altura virtual mínima da camada E
foE2	Frequência crítica da onda ordinária da camada E2, que alguma vezes aparece entre a camada E normal e a camada F1
h'E2	Altura virtual mínima da camada E2
foF1	Frequência crítica da onda ordinária da camada F1
foF2	Frequência crítica da onda ordinária da camada F2
h'F	Altura virtual mínima do traço ordinário em toda região F
h'F2	Altura virtual mínima do traço ordinário da camada F2
hmF2	Altura do pico de densidade eletrônica da camada F2

Fonte: Yamashita (1999).

No Brasil o INPE é responsável pela operação de cinco ionossondas digitais localizadas em Boa Vista/RR, São Luís/MA, Fortaleza/CE, Cachoeira Paulista/SP e Campo Grande/MS, e a UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba) responsável por outras três, em Manaus/AM, Palmas/TO e São José dos Campos/SP.

## 4 ÍNDICES DE IRREGULARIDADES E DE CINTILAÇÃO DA IONOSFERA

Os índices de irregularidades da ionosfera possuem a função principal de classificar o comportamento da mesma de acordo com um padrão estabelecido, enquanto que os índices de cintilação dos sinais GNSS têm como objetivo quantificar a intensidade da cintilação ionosférica.

Nas seções 4.1 e 4.2 são apresentados os principais índices de irregularidades da ionosfera e índices de cintilação dos sinais GNSS encontrados na literatura, respectivamente.

### 4.1 Índices de Irregularidades da Ionosfera

As estimativas dos índices de irregularidades ( $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ ) se baseiam na taxa de variação do TEC (ROT). O ROT é calculado por meio da razão da diferença entre os TEC's obtidos consecutivamente entre duas épocas ( $\Delta\text{TEC}$ ), pelo intervalo de tempo decorrido entre as respectivas determinações ( $\Delta t$ ):

$$\text{ROT} = \frac{\text{TEC}_{t_2} - \text{TEC}_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\text{TEC}}{\Delta t}. \quad (16)$$

Conforme apresentado na seção 3.5, o TEC pode ser obtido tanto utilizando as pseudodistâncias advindas dos códigos nas portadoras L1 e L2 (equação (14)), quanto a partir da combinação linear entre as medidas de fase das portadoras L1 e L2 (equação (15)). Como a magnitude da precisão da fase é da ordem centimétrica a milimétrica, ao contrário da pseudodistância que é da ordem métrica (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008), utilizam-se as medidas da fase para o cálculo do ROT.

Substituindo a equação (15) na equação (16) e realizando as devidas simplificações e adaptações, pode-se obter uma estimativa do ROT tendo como parâmetro apenas as medidas de fase das portadoras L1 e L2, não sendo necessário calcular o TEC propriamente dito. A seguir são apresentados os passos para a determinação dessa estimativa.

Considerando as épocas  $t_1$  e  $t_2$  nos parâmetros variáveis no tempo da equação (15), –  $\Phi_{1r}^s$ ,  $\Phi_{2r}^s$ ,  $N_{1r}^s$  e  $N_{2r}^s$  – tem-se:



$$\text{TEC}_{r_{t_1}}^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\lambda_2 \Phi_{2r_{t_1}}^s - \lambda_1 \Phi_{1r_{t_1}}^s) - (\lambda_1 N_{1r_{t_1}}^s - \lambda_2 N_{2r_{t_1}}^s) - e_{\Phi_{12}} \right], \quad (17)$$

$$\text{TEC}_{r_{t_2}}^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\lambda_2 \Phi_{2r_{t_2}}^s - \lambda_1 \Phi_{1r_{t_2}}^s) - (\lambda_1 N_{1r_{t_2}}^s - \lambda_2 N_{2r_{t_2}}^s) - e_{\Phi_{12}} \right]. \quad (18)$$

Substituindo as equações (17) e (18) em (16), colocando em evidência a parte em comum das duas equações, obtém:

$$\text{ROT} = \frac{\frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ \lambda_2 \Phi_{2r_{t_2}}^s - \lambda_1 \Phi_{1r_{t_2}}^s - \lambda_1 N_{1r_{t_2}}^s + \lambda_2 N_{2r_{t_2}}^s - e_{\Phi_{12}} - \lambda_2 \Phi_{2r_{t_1}}^s + \lambda_1 \Phi_{1r_{t_1}}^s + \lambda_1 N_{1r_{t_1}}^s - \lambda_2 N_{2r_{t_1}}^s + e_{\Phi_{12}} \right]}{t_2 - t_1} \quad (19)$$

Observa-se que ao realizar a diferença entre os TEC's os erros sistemáticos ( $e_{\Phi_{12}}$ ) são minimizados, podendo os mesmos serem excluídos da equação. O mesmo ocorre com as ambiguidades ( $N_{1r}^s$  e  $N_{2r}^s$ ) da fase das portadoras, pois caso não haja perdas de ciclos entre as épocas  $t_1$  e  $t_2$  pode-se subtraí-las. A equação (20) apresenta o resultado dessas simplificações e o agrupamento dos termos em função dos comprimentos de onda:

$$\text{ROT} = \frac{\frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ \lambda_2 (\Phi_{2r_{t_2}}^s - \Phi_{2r_{t_1}}^s) - \lambda_1 (\Phi_{1r_{t_2}}^s - \Phi_{1r_{t_1}}^s) \right]}{t_2 - t_1}. \quad (20)$$

Para o caso do GPS que se baseia no CDMA para diferenciar cada satélite, há um único valor de frequência para L1 e um único valor para L2 para todos os satélites dessa constelação, podendo assim substituir, a priori, os valores na equação (20), obtendo a estimativa do ROT baseado somente na fase:

$$\text{ROT} = \frac{9,52 \cdot 10^{16} \left[ (\Phi_{2r_{t_2}}^s - \Phi_{2r_{t_1}}^s) - (\Phi_{1r_{t_2}}^s - \Phi_{1r_{t_1}}^s) \right]}{t_2 - t_1}, \quad (21)$$

sendo as medidas de fase dadas em metros, e não em ciclos.

O cálculo do ROT para o Galileo é similar ao do GPS, salvo a utilização das frequências das portadoras do sistema europeu na equação (20).

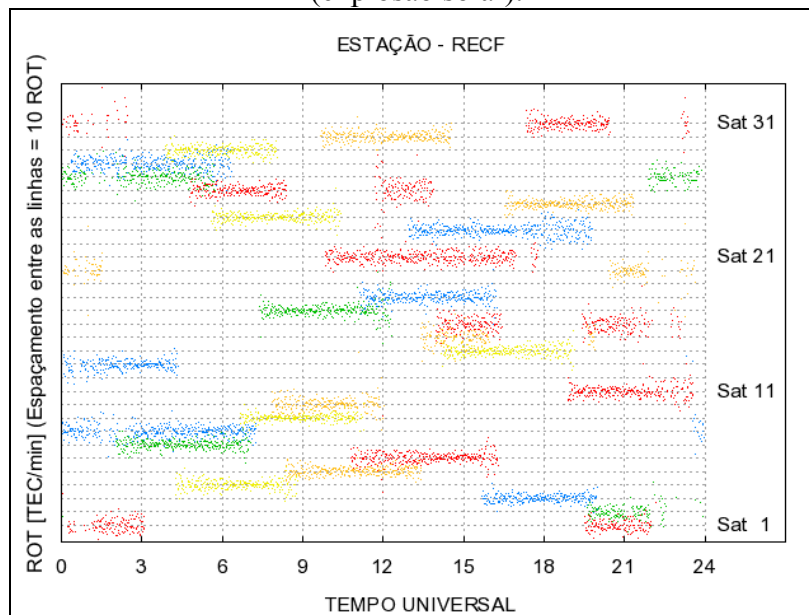
Já para o GLONASS, que utiliza divisões múltiplas de frequências para diferenciar cada satélite, deve-se utilizar a equação (20), onde os valores das frequências das portadoras L1 e L2 de cada satélite são determinados a partir das equações (1) e (2), respectivamente, e os comprimentos de onda utilizando a equação (22), onde  $c$  é velocidade da luz no vácuo ( $2,99792458 \cdot 10^8$  m/s):

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (22)$$

Wanninger (1995) destaca que após a determinação do ROT, utilizando a fase da onda portadora, alguns erros podem não ter sido minimizados ou eliminados totalmente, como o caso do multicaminho e erros aleatórios. No entanto, ainda de acordo com Wanninger (1995), a magnitude desses erros não ultrapassam  $0,3 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , para o multicaminho, e  $0,07 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  para os erros aleatórios.

A Figura 29 apresenta um exemplo de gráfico diário do ROT para a estação RECF (Recife/PE) da RBMC, para o dia 28 de outubro de 2003, utilizando apenas a constelação GPS (PEREIRA; CAMARGO, 2013). Nota-se que durante todo o dia houve uma variabilidade acentuada do TEC devido a uma forte explosão solar.

Figura 29 – Gráfico do ROT da estação RECF da RBMC para 28 de outubro de 2003 (explosão solar).



Fonte: Pereira e Camargo (2013).

O estudo e monitoramento das irregularidades ionosféricas por meio de índices têm sido realizados por vários pesquisadores em diversos centros de estudos, como pode ser verificado em Oladipo e Schüler (2013), Pereira e Camargo (2013), Matsuoka et al. (2013), Chu et al. (2008), Li, Ning e Yuan (2007), Shan et al. (2002), Mendillo, Lin e Aarons (2000), Pi et al. (1997), Wanninger (1995) e Wanninger (1993).

#### 4.1.1 Índice $f_p$

O índice  $f_p$  (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROT's para um período de 15 minutos, sendo os ROT's estimados a cada minuto. O índice é calculado para cada satélite de uma determinada estação/receptor e é sempre maior ou igual a zero (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000):

$$f_p(n, hr, i) = \text{Mediana}|\text{ROT}|, \quad (23)$$

onde:

n – número do satélite;

hr – hora cheia, de 0 a 24 horas TU; e

i – número da seção, com duração de 15 minutos, contida em uma hora cheia, ou seja,  $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ .

O uso do valor da mediana tem o intuito de eliminar os picos de ruídos. Assim, para diversas combinações de satélites e estações, o índice representa a resolução espacial das irregularidades ionosféricas (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000).

#### 4.1.2 Índice $F_p$

O índice  $F_p$  é estimado para cada estação, a cada hora cheia. Representa o valor médio dos índices  $f_p$  obtidos para todos os satélites observados em uma estação no período de uma hora, que por sua vez é obtido por meio da equação (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000):

$$F_p(\text{hr}) = \frac{\sum_n^{\text{nsat}} \left[ \sum_i^k f_p(n, \text{hr}, i) / k \right]}{\text{nsat}(\text{hr})} \cdot 1000, \quad (24)$$

onde:

nsat – número total de satélites observados durante o período de uma hora;

k – número de valores de  $f_p$  disponíveis em cada hora ( $k = 0, 1, 2, 3$  ou  $4$ ).

A utilização do índice destina-se a retratar o nível geral de irregularidades ionosféricas presentes na vizinhança de uma determinada estação.

Um valor  $F_p \leq 50$  representa baixos níveis de irregularidades;  $50 < F_p \leq 200$  significa a presença de irregularidades moderadas, e quando  $F_p > 200$  representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000).

#### 4.1.3 Índice $I_{\text{ROT}}$

Wanninger (1993) apresenta um índice para caracterizar flutuações da fase como diagnóstico de irregularidades ionosféricas, denominado  $I_{\text{ROT}}$ . O índice, calculado para um período de 15 minutos, é baseado no RMS (*Root Mean Square*) dos ROT's:

$$I_{\text{ROT}} = 10 \cdot \text{RMS}(\text{ROT}). \quad (25)$$

Diferentemente de Mendillo, Lin e Aarons (2000), Wanninger (1993) não apresenta um padrão classificatório do índice  $I_{\text{ROT}}$ ; ele apenas conclui que valores próximos ou superiores a 3 caracterizam forte irregularidades ionosféricas. Assim, Pereira e Camargo (2014) realizaram um experimento visando determinar um padrão classificatório para o  $I_{\text{ROT}}$ , obtendo os seguintes limiares:  $I_{\text{ROT}} \leq 0,5$  – baixos níveis de irregularidades;  $0,5 < I_{\text{ROT}} \leq 2,0$  – irregularidades moderadas; e  $I_{\text{ROT}} > 2,0$  – níveis de irregularidades ionosféricas muito fortes.

#### 4.1.4 Índice ROTI

Devido ao fato de que as flutuações da fase em pequena escala não estavam sendo identificadas nos índices existentes, Pi et al. (1997) sugerem que um índice para a taxa de variação do TEC poderia ser determinado com base no desvio-padrão do ROT em um intervalo de cinco minutos. Denominado de ROTI, o índice é obtido a partir da equação:

$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2} . \quad (26)$$

onde  $\langle \rangle$  representa a média.

Análoga à situação do índice  $I_{\text{ROT}}$ , um padrão classificatório para o índice ROTI teve que ser determinado:  $\text{ROTI} \leq 0,05$  representa baixos níveis de irregularidades;  $0,05 < \text{ROTI} \leq 0,2$  significa a presença de irregularidades moderadas, e quando  $\text{ROTI} > 0,2$  representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (PEREIRA; CAMARGO, 2014).

## 4.2 Índices de Cintilação Ionosférica

As observáveis GNSS podem ser utilizadas para, além do estudo das irregularidades ionosféricas, o estudo quantitativo da cintilação ionosférica, por meio da estimativa de indicadores do nível de intensidade de um evento de cintilação. Os dois indicadores mais comumente conhecidos e utilizados são os índices S4 e  $\sigma_{\phi}$ .

Em linhas gerais, o índice S4 é o desvio-padrão normalizado da intensidade do sinal, consistindo assim em um indicador da magnitude de cintilações de amplitude. Para as cintilações de fase, o monitoramento é realizado por meio da estimativa do desvio-padrão de medidas da fase da onda portadora livres de tendência (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993).

Forte (2007) e Mushini et al. (2012) apresentam outros dois índices para a estimativa das cintilações de fase, denominados  $S_{\phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  respectivamente, sendo considerados alternativas para o uso do  $\sigma_{\phi}$ .

Análises de cintilações ionosféricas por meio de índices podem ser encontradas em vários artigos, como por exemplo: Chatterjee e Chakraborty (2013), Béniguel et al. (2009), Kintner, Ledvina e De Paula (2007), Li, Ning e Yuan (2007) e Skone et al. (2005).

### 4.2.1 Índice S4

A propagação dos sinais GNSS através de regiões de irregularidades ionosféricas podem ocasionar reflexões nos mesmos, acarretando em rápidas flutuações na intensidade dos sinais, denominadas cintilações de amplitude (CONKER et al., 2003). Em

algumas situações, severas cintilações podem fazer com que o receptor tente readquirir o sinal de um determinado satélite, devido a intensidade do sinal recebido ser inferior a um dado limiar de rastreamento do receptor.

Durante as cintilações de amplitude o índice de refração ionosférico varia constantemente, fazendo com que o sinal seja disperso em várias direções diferentes além da direção principal de propagação. Conforme o sinal se propaga até a superfície terrestre, pequenas variações na distância de propagação ao longo destas diferentes direções podem fazer com que haja uma interferência do sinal com ele próprio. Essa autointerferência pode atenuar ou amplificar o sinal medido pelo receptor (VANI, 2014; WALTER et al., 2010).

As cintilações de amplitude são quantificadas pelo índice S4, que consiste no desvio-padrão normalizado das observações da intensidade do sinal livres de tendências, as quais são amostradas em altas taxas em um intervalo de 60 segundos (CONKER et al., 2003; VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993). As tendências referem-se aos efeitos que o sinal sofre durante o percurso do satélite ao receptor que não são classificados como cintilação, como por exemplo, os efeitos dinâmicos receptor-satélite, erros do relógio do receptor e do satélite, efeito de multicaminho, ruídos do receptor, vibrações de plataforma, dentre outros (NIU, 2012).

S4 é um índice adimensional, estimado tanto para o sinal proveniente da portadora L1 quanto para o sinal da L2. Vários padrões classificatórios do nível de cintilação de amplitude são encontrados na literatura; Conker et al. (2003), por exemplo, definem para a portadora L1:

- Ausência de cintilação:  $S4 \approx 0,0$ ; e
- Cintilação forte:  $S4 \approx 1,0$ .

Muella et al. (2009), no entanto, classificam os níveis de cintilação ionosférica, também para a portadora L1, em :

- Cintilação fraca:  $0,2 < S4 \leq 0,4$ ;
- Cintilação moderada:  $0,4 < S4 \leq 0,6$ ;
- Cintilação forte:  $0,6 < S4 \leq 1,0$ ; e
- Cintilação saturada:  $1,0 < S4 \leq 1,4$ .

Já a *International Telecommunication Union* adota outros limiares para a classificação:

- Cintilação fraca:  $S4 \leq 0,3$ ;
- Cintilação moderada:  $0,3 < S4 \leq 0,6$ ; e
- Cintilação forte:  $S4 > 0,6$ .

Receptores GNSS apropriados ao monitoramento da ionosfera (por exemplo, NovAtel GPStation-6, Septentrio PolaRxS e GSV 4004B) podem fornecer valores de S4 superiores aos limites teóricos. O efeito do multicaminho, por exemplo, pode elevar o índice S4, proporcionando uma falsa ocorrência de cintilação ionosférica. Isso ocorre principalmente no início e/ou término do rastreamento de um satélite, quando o ângulo de elevação do mesmo é da ordem de poucos graus. Portanto, em estações monitoras de cintilação é necessário que o nível de multicaminho seja conhecido e controlado.

Os passos para a determinação do índice S4 podem ser encontrados em Niu (2012). Primeiramente, a variância da intensidade do sinal é normalizada pelo quadrado da média da intensidade do sinal em um minuto, obtendo-se assim o índice S4T:

$$S4T = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}, \quad (27)$$

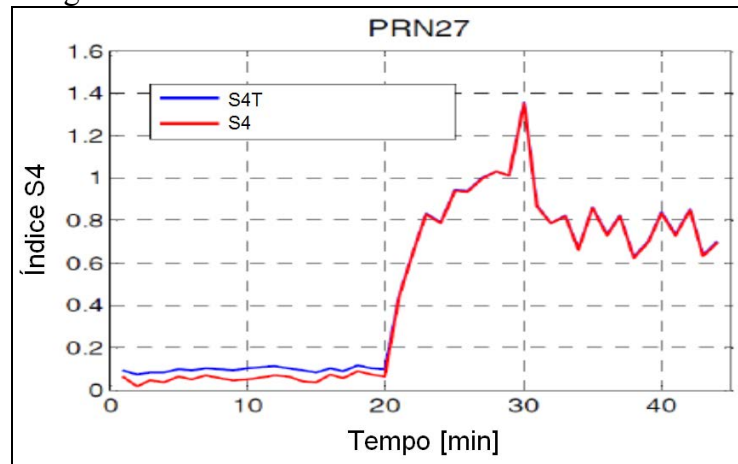
onde:

S4T – índice “S4 total”, o qual contém as flutuações de amplitude de qualquer causa, isto é, abrange os ruídos do ambiente; e

SI – intensidade do sinal amostrada, geralmente, a uma taxa de 50 Hz.

Caso não sejam removidos os ruídos do ambiente, o S4T apresenta um acréscimo nos valores se comparado com o índice após a remoção, acarretando assim numa estimativa errônea. A Figura 30 ilustra a influência da remoção dos ruídos do ambiente no índice S4 para um específico satélite GPS.

Figura 30 – Índice S4 com e sem ruídos do ambiente.



Fonte: Adaptado de Niu (2012).

A quantidade S4 proveniente de ruídos, representada por  $S4N_0$ , é dada pela equação (28) (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993):

$$S4N_0 = \sqrt{\frac{100}{S/N_0} \cdot \left[ 1 + \frac{500}{19 \cdot S/N_0} \right]}, \quad (28)$$

onde  $S/N_0$  consiste na densidade média da razão sinal-ruído do intervalo de 1 minuto.

Por fim o índice S4, com valor teórico não superior a 1, é obtido a partir da raiz quadrada da diferença dos índices S4T e  $S4N_0$  (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993):

$$S4 = \sqrt{S4T^2 - S4N_0^2} = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2} - \frac{100}{S/N_0} \cdot \left[ 1 + \frac{500}{19 \cdot S/N_0} \right]}. \quad (29)$$

Uma vez obtido o índice S4 na frequência da portadora L1, para o caso do GPS, o mesmo pode ser mapeado nas frequências L2 e L5 por meio das seguintes relações (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993):

$$S4(L2) = S4(L1) \cdot \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^{1,5} = 1,454 \cdot S4(L1), \quad (30)$$

$$S4(L5) = S4(L1) \cdot \left( \frac{f_1}{f_5} \right)^{1,5} = 1,550 \cdot S4(L1). \quad (31)$$



#### 4.2.2 Índice $\sigma_\Phi$

As cintilações de fase acontecem a partir de rápidas variações na fase do sinal, quando o mesmo percorre as irregularidades na densidade de plasma da ionosfera. Fortes cintilações de fase podem provocar perdas de ciclos, bem como, a perda de sintonia entre o receptor e satélite (WALTER et al., 2010).

As cintilações de fase são quantificadas pelo índice  $\sigma_\Phi$  (Sigma-Phi), que consiste no desvio-padrão das observações da fase do sinal livres de tendências ( $\Phi_e$ ), as quais são coletadas a altas frequências (geralmente 50 Hz) em um intervalo de 60 segundos, sendo comumente conhecido como  $\Phi_{60}$ . O  $\sigma_\Phi$  também pode ser calculado ao longo de 1, 3, 10 e 30 segundos de intervalo, nestes casos, uma normalização deve ser realizada sobre a média em 60 segundos (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993). A equação (32) apresenta o cálculo do índice  $\sigma_\Phi$ :

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\langle \Phi_e^2 \rangle - \langle \Phi_e \rangle^2} . \quad (32)$$

Diferentemente do índice S4 (adimensional), o índice  $\sigma_\Phi$  é dado em radianos, podendo ser expresso também em graus e metros.

De acordo com Skone et al. (2005), para a portadora L1, as cintilações de fase são classificadas em:

- Cintilação fraca:  $\sigma_\Phi \approx 0,05$  rad; e
- Cintilação forte:  $\sigma_\Phi \approx 1,0$  rad.

Hegarty et al. (2001), por sua vez, apresentam o seguinte padrão classificatório:

- Cintilação muito fraca:  $0,05 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,2 \text{ rad}$ ;
- Cintilação fraca:  $0,2 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,3 \text{ rad}$ ;
- Cintilação moderada:  $0,3 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,6 \text{ rad}$ ; e
- Cintilação forte:  $\sigma_\Phi > 0,6 \text{ rad}$ .

Obtido o índice  $\sigma_\Phi$  na frequência da portadora L1, do sistema GPS, o mesmo pode ser mapeado nas frequências L2 e L5 por meio das seguintes relações (VAN DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993):

$$\sigma_{\Phi}(L2) = \sigma_{\Phi}(L1) \cdot \left( \frac{f_1}{f_2} \right) = 1,283 \cdot \sigma_{\Phi}(L1), \quad (33)$$

$$\sigma_{\Phi}(L5) = \sigma_{\Phi}(L1) \cdot \left( \frac{f_1}{f_5} \right) = 1,339 \cdot \sigma_{\Phi}(L1). \quad (34)$$

### 4.2.3 Índice $S_{\Phi}$

O índice de cintilação de fase  $S_{\Phi}$  (S-Phi) foi proposto por Forte (2007) como uma alternativa para o índice  $\sigma_{\Phi}$ , devido a incertezas que existem sob o tradicional índice de cintilação de fase, conforme apresentado por Beach (2006) apud Niu (2012).

O índice  $S_{\Phi}$ , dado em rad/s, é calculado pela expressão:

$$S_{\Phi} = \sqrt{\left\langle \left( \frac{\partial \Phi_e}{\partial t} \right)^2 \right\rangle}. \quad (35)$$

Ao contrário do índice  $\sigma_{\Phi}$ , o  $S_{\Phi}$  leva em consideração a taxa de variação das flutuações de fase da onda portadora, mostrando, de acordo com Forte (2007), mais consistência quando se utiliza diferentes métodos de destendencionamento das observações, e sendo considerado um dos indicadores mais robustos para o monitoramento das cintilações de fase.

### 4.2.4 Índice $\sigma_{\text{CHAIN}}$

O índice de cintilação de fase CHAIN, introduzido por Mushini et al. (2012) e representado por  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  (Sigma-CHAIN), é resultado de uma modificação no índice  $S_{\Phi}$ . A equação (36) apresenta a estimativa do índice:

$$\sigma_{\text{CHAIN}} = \sqrt{\left\langle \left( \frac{\partial \Phi_e}{\partial t} \right)^2 |\Phi_e| \right\rangle}. \quad (36)$$

O índice  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  utiliza, além da taxa de variação das flutuações da fase, também a amplitude das flutuações. É considerado um dos melhores índices de cintilação de fase para medidas realizadas em regiões de altas latitudes, se comparado com o  $\sigma_{\Phi}$ , uma vez que gera grande correlação com o índice de cintilação de amplitude S4 (MUSHINI et al., 2012; NIU, 2012).

## 5 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO *Ion\_Index*

O Brasil, localizado na região tropical, é um dos países que mais sofrem os efeitos provocados pela camada ionosférica no posicionamento pelo GNSS, principalmente os oriundos da AIE e cintilação ionosférica, sendo as técnicas mais afetadas o posicionamento por ponto e o relativo, seja pós-processado ou em tempo real.

Várias estratégias podem ser utilizadas com o intuito de minimizar os efeitos ionosféricos, seja por meio de modelos ionosféricos, tais como o de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1975), o LPIM (*La Plata Ionospheric Model*) (BRUNINI, 1998; AZPILICUETA; BRUNINI; RADICELLA, 2006) e o Mod\_Ion (Modelo Regional da Ionosfera) (CAMARGO, 1999), ou a partir de arquivos IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*) gerados por vários centros, como o CODE, GSA e JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), bem como, a utilização da combinação linear *ion-free*, salvo cada uma dessas estratégias com os respectivos níveis de atenuação.

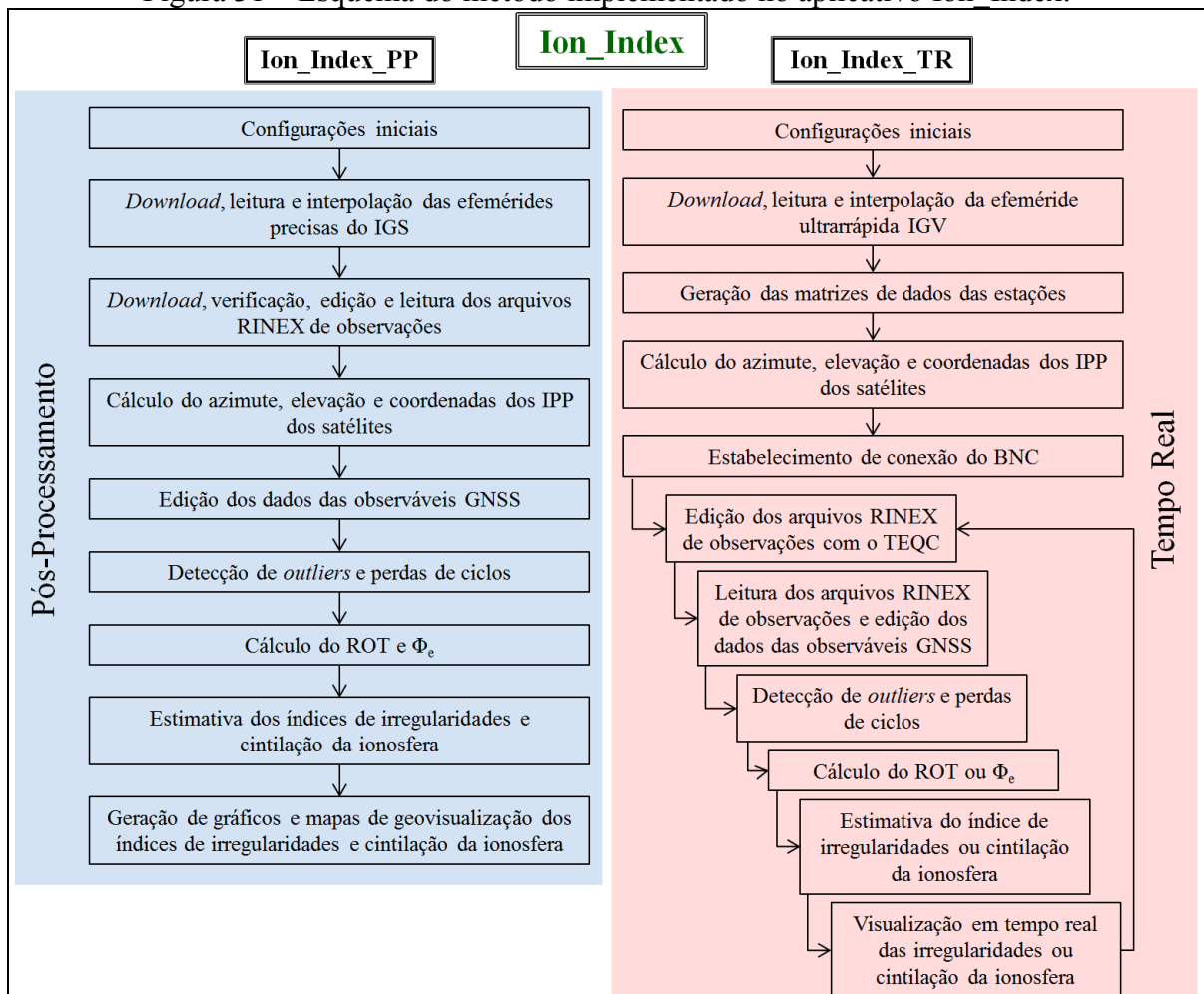
Em se tratando do monitoramento da ionosfera, principalmente quanto às irregularidades e cintilações, a situação é diferente. A quantidade de instrumentos dedicados ao estudo da camada ionosférica é reduzida no âmbito brasileiro. As poucas ionossondas e receptores geodésicos apropriados no fornecimento de parâmetros relacionados à ionosfera espalhados pelo território são insuficientes para o monitoramento e análises detalhadas das irregularidades e cintilações ionosféricas.

Neste contexto teve início, durante a iniciação científica (FAPESP, nº processo: 2011/00986-8), o desenvolvimento do *Ion\_Index*: aplicativo científico com objetivo de estimar indicadores dos níveis de irregularidades da ionosfera e de cintilação dos sinais GNSS para o território brasileiro em tempo real e pós-processado, utilizando a infraestrutura já existente de dados de receptores geodésicos de dupla frequência de redes ativas públicas, como a RBMC, rede GNSS-SP e a rede CALIBRA. Dessa forma é proporcionado um aumento na resolução espacial das informações sobre o comportamento da ionosfera na região brasileira, permitindo um melhor entendimento e contribuindo para o desenvolvimento e alimentação de modelos de mitigação.

O método aplicado para o desenvolvimento do aplicativo é esquematizado na Figura 31, sendo dividido em duas modalidades: pós-processamento (*Ion\_Index\_PP*) e tempo real (*Ion\_Index\_TR*), ambos implementados em linguagem C. O modo pós-processado, que teve o seu início durante o projeto de Iniciação Científica da FAPESP (PEREIRA; CAMARGO, 2013), por sua vez, é dividido em nove etapas: configurações

iniciais; *download*, leitura e interpolação das efemérides precisas do IGS; *download*, verificação, edição e leitura dos arquivos RINEX de observações; cálculo do azimute, elevação e coordenadas dos IPP (*Ionospheric Pierce Point*) dos satélites; edição dos dados das observáveis GNSS; detecção de *outliers* e perdas de ciclos; cálculo do ROT e  $\Phi_e$ ; estimativa dos índices de irregularidades e cintilação da ionosfera; e geração de gráficos e mapas de geovisualização dos índices de irregularidades e cintilação da ionosfera. Já o modo tempo real, em relação ao pós-processado, tem a mais as seguintes etapas: geração das matrizes de dados das estações; estabelecimento de conexão do BNC (*BKG Ntrip Client*); e visualização em tempo real das irregularidades ou cintilação da ionosfera; sendo que nessa modalidade é utilizada apenas a efeméride ultrarrápida IGV (Órbitas IGS GLONASS Ultrarrápidas) para obtenção das coordenadas previstas dos satélites GPS e GLONASS.

Figura 31 – Esquema do método implementado no aplicativo Ion\_Index.



Para mais informações a respeito do aplicativo consultar o tutorial disponível para *download* no *website* do GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial) ([gege.fct.unesp.br](http://gege.fct.unesp.br)), aba “Softwares – Download”.

### 5.1 Modalidade – Pós-Processamento

A primeira etapa consiste na informação, por parte do usuário pela interface do aplicativo, das seguintes configurações iniciais:

- Ano de processamento;
- Dia ou intervalo de processamento;
- Rede(s) ativa(s) de interesse;
- Estação(s) de interesse;
- Índice(s) de irregularidades e/ou de cintilação da ionosfera desejado(s);
- Opção de gerar ou não mapas de geovisualização do(s) índice(s) selecionado(s); e
- Máscara de elevação dos satélites.

Sete opções de combinações de redes ativas podem ser escolhidas: RBMC (Figura 5); GNSS-SP (Figura 4); CALIBRA (Figura 3); RBMC e GNSS-SP; RBMC e CALIBRA; GNSS-SP e CALIBRA; ou todas as redes.

Em relação aos índices, pode-se escolher em estimar todos os índices de irregularidades e cintilação da ionosfera, ou somente os índices de irregularidades, ou apenas os de cintilação, ou ainda informa o(s) índice(s) de interesse.

Caso o número de estações selecionadas seja maior ou igual a dois, é requisitado ao usuário se deseja gerar mapas de geovisualização para o(s) índice(s) escolhido(s).

Para a determinação do azimute e elevação dos satélites GPS e GLONASS é necessário que se conheçam as coordenadas cartesianas (X, Y e Z) dos mesmos vinculados a um dado sistema de referência, as quais são obtidas dos arquivos de efemérides precisas do IGS, que estão associadas ao ITRF2008.

O *download* das efemérides é realizado de forma hierárquica: para o sistema GPS, primeiro é dada prevalência às efemérides precisas do tipo IGS; caso não estejam disponíveis os arquivos para o dia do processamento, para o dia anterior e para o dia posterior,

é verificado se há os arquivos IGR para o período; em última instância utilizam-se as efemérides ultrarrápidas IGU; já para o GLONASS, inicialmente são checados se as efemérides precisas IGL estão disponíveis, caso contrário utiliza-se as efemérides ultrarrápidas IGV, pois o IGS não gera as órbitas rápidas do GLONASS.

Devido às coordenadas disponibilizadas pelas efemérides precisas possuírem uma resolução temporal de 15 minutos e como, na maioria das vezes, as observáveis GNSS dos arquivos RINEX têm resolução de 15 segundos, é realizada uma interpolação dos produtos IGS com a função de interpolação baseada no polinômio de Lagrange, cuja formulação matemática pode ser encontrada em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008). Optou-se pela implementação do Lagrange de 16° ordem, pois, de acordo com Remondi (1991) apud Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), proporciona valores interpolados com precisão da ordem do milímetro. O *download* das efemérides do dia anterior e posterior justifica-se pela natureza no interpolador, pois para interpolar os valores contidos no primeiro arco de 15 minutos é necessário utilizar as últimas oito épocas da efeméride do dia anterior, o mesmo acontece na interpolação do último arco do dia de interesse, onde se devem utilizar as primeiras oito épocas da efeméride do dia seguinte.

Para cada uma das estações das redes ativas selecionadas são realizados os *downloads* dos arquivos de observações por meio dos FTP's dos servidores das redes. A rede CALIBRA disponibiliza os arquivos RINEX de observações por meio do FTP (<ftp://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>), a rede GNSS-SP em (<ftp://200.145.185.225/>) e a RBMC pelo (<ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/dados/>).

Em dadas situações algumas estações de interesse informadas pelo usuário não estão disponíveis para o dia de processamento, assim uma verificação se o *download* do arquivo foi realizado é executado. Caso nenhuma das estações desejadas esteja disponível o aplicativo encerra o ciclo de atividades e verifica se há outro dia de processamento para ser executado.

Com o intuito de otimizar a leitura dos arquivos RINEX de observações é realizado uma edição dos arquivos utilizando o TEQC. As funções aplicadas foram:

- Exclusão dos sinais provenientes dos sistemas GNSS que não sejam GPS e GLONASS;
- Exclusão das observáveis GNSS que não sejam a fase da onda portadora e a pseudodistância nas portadoras L1 e L2;
- Exclusão de comentários internos que podem haver entre as épocas de observações; e

- Ordenação crescente dos satélites e, conseqüentemente, das observáveis GNSS, para cada época.

O cálculo do ângulo de elevação e azimute dos satélites para uma determinada estação requer, além do conhecimento das coordenadas cartesianas dos satélites, as coordenadas geodésicas e cartesianas da estação, todas associadas a um mesmo referencial geodésico e época de referência.

Para compatibilizar as coordenadas, isto é, todas em um mesmo sistema e época de referência, o Ion\_Index atualiza e transforma as coordenadas das estações (que estão em SIRGAS2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000, época 2000,4) para a época do dia da efeméride e para o ITRF2008. A atualização é realizada utilizando a seguinte equação (MONICO, 2008):

$$\begin{bmatrix} X_{Est} \\ Y_{Est} \\ Z_{Est} \end{bmatrix}_{t_{Efe.}} = \begin{bmatrix} X_{Est} \\ Y_{Est} \\ Z_{Est} \end{bmatrix}_{t_{2000,4}} + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \cdot (t_{Efe.} - 2000,4), \quad (37)$$

onde:

$(X_{Est}, Y_{Est}, Z_{Est})_{t_{Efe.}}$  – coordenadas cartesianas das estações na época do dia da efeméride, ou seja, do dia de processamento;

$(X_{Est}, Y_{Est}, Z_{Est})_{t_{2000,4}}$  – coordenadas cartesianas das estações na época de referência 2000,4; e

$(V_X, V_Y, V_Z)$  – velocidades das estações obtidas com o aplicativo Vemos.

Ressalta-se que as velocidades de todas as estações das redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC foram determinadas com o Vemos e armazenadas no aplicativo.

Os parâmetros e a equação de transformação entre os referenciais SIRGAS2000 e ITRF2008 adotados pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) estão disponíveis em IERS (2014), onde se considera o SIRGAS2000 compatível com o ITRF2000 (*International Terrestrial Reference Frame 2000*).

Assim, determinada as coordenadas, obtêm-se o azimute e a elevação dos satélites utilizando as equações apresentadas em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008).

Para a geração de mapas de geovisualização de alguns índices de irregularidades e de cintilação da ionosfera é necessário que o valor do índice seja mapeado no IPP (*Ionospheric Pierce Point*), que consiste no ponto onde o sinal transmitido pelo satélite intercepta a camada ionosférica em uma dada altura média.

As equações para o cálculo das coordenadas geodésicas do IPP, utilizadas no aplicativo, podem ser consultadas em El Gizawy (2003), onde se adota 6.371 km para o raio médio da Terra e 350 km para a altura média da camada ionosférica.

Uma vez realizada a leitura da fase da onda portadora e da pseudodistância e calculado o ângulo de elevação dos satélites, é efetuada uma edição preliminar nos dados antes da aplicação do algoritmo para detecção de *outliers* e perdas de ciclos.

Aplica-se a máscara de elevação e verifica-se para cada satélite GPS e GLONASS de cada época se as observáveis GNSS estão disponíveis, isto é, se há as medidas de fase e pseudodistância para as portadoras L1 e L2. Caso não haja as quatro medidas concomitantemente o aplicativo as excluem do conjunto de observações, pois para a detecção de *outliers* e perdas de ciclos é necessário que todas elas estejam disponíveis. No caso de perda de ciclo a fase da onda portadora apresenta um salto por um número inteiro de ciclos, afetando assim o cálculo do ROT e  $\Phi_e$ . Logo, na ocorrência de perdas de ciclos, esses devem ser detectados para que o cálculo do ROT e  $\Phi_e$  não seja efetuado nos instantes em que ocorrem as perdas.

Para o caso de posicionamento relativo, a detecção de perdas de ciclos pode ser realizada com base nas combinações de dupla e tripla diferença. Porém, para as situações em que se têm observações referentes a uma única estação, outras estratégias devem ser adotadas. Blewitt (1990) apresenta uma estratégia baseada na combinação *wide-lane* envolvendo código e fase, onde é analisada, para cada época, se houve a ocorrência ou não de perdas de ciclos. A formulação matemática do algoritmo de Blewitt para detecção de perdas de ciclos, implementada no *Ion\_Index*, é apresentada em Blewitt (1990) e Sharma et al. (2011). Além da detecção das perdas, o algoritmo permite também identificar *outliers*.

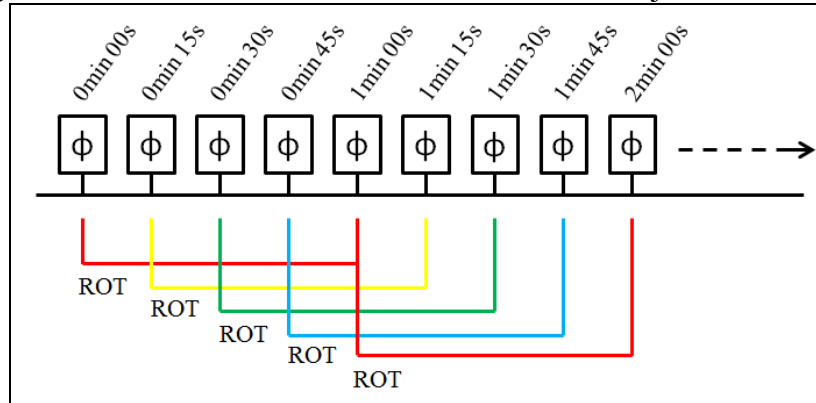
O cálculo do ROT para os satélites GPS é realizado utilizando a equação (21), considerando as medidas de fase da onda portadora em metros e o intervalo de tempo de um minuto. Já para os satélites GLONASS aplica-se a equação (20), também com  $\Delta t = 1$  min, sendo a fase dada em ciclos e a frequência e o comprimento de onda calculados para cada satélite.

Como as medidas de fase possuem uma resolução temporal de 15 segundos, a cada minuto há cinco valores observados. Aplicando a equação do ROT seria utilizado



apenas o primeiro e o último valor, tendo um descarte de três medidas. Visando aumentar o conjunto de valores de ROT, realiza-se uma janela deslizante durante o processo de cálculo da taxa de variação do TEC. O conceito da janela aplicada é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Cálculo do ROT utilizando o conceito de janela deslizante.



Na Figura 32 observa-se que as medidas de fase contidas entre os minutos inteiros também são utilizadas no cálculo do ROT, provendo três valores a mais (linhas amarela, verde e azul) do que se fossem utilizados apenas as medidas dos minutos inteiros (linhas vermelhas). O uso de janela deslizante é válido, uma vez que todos os valores de ROT são calculados com um intervalo de tempo de um minuto. Durante o processo de cálculo é verificado para cada época se há perdas de ciclos, sendo que, na ocorrência de perda durante o minuto em que se estima o ROT, o cálculo não é realizado.

Com exceção do índice S4, os demais índices de cintilação da ionosfera são obtidos a partir do uso das observações da fase do sinal livres de tendências ( $\Phi_e$ ). As tendências referem-se aos efeitos que o sinal sofre durante o percurso do satélite ao receptor que não são classificados como cintilação, como por exemplo os efeitos dinâmicos receptor-satélite, erros do relógio do receptor e do satélite, efeito de multicaminho, ruídos do receptor, vibrações de plataforma, dentre outros (NIU, 2012). O processo de remoção das tendências é denominado de *detrending*.

Vários métodos de *detrending* podem ser encontrados na literatura: filtragem Butterworth, ajuste polinomial, filtragem pela Transformada Contínua de Wavelet, filtragem pela Transformada Discreta de Wavelet, etc. Entretanto, a maioria desses métodos foram desenvolvidos para serem executados considerando medidas de fase amostradas em altas frequências, da ordem de 50 Hz, os quais aplicam uma frequência de corte de 0,1 Hz para separar os componentes de cintilação dos não-cintilação. Em se tratando das medidas de fase provenientes dos arquivos RINEX das estações das redes GNSS-SP, CALIBRA e

RBMC, a frequência de amostragem é de apenas 0,067 Hz (uma observação a cada 15 segundos), o que inviabiliza a aplicação de qualquer um dos métodos de *detrending*. Sendo assim, a obtenção dos valores de  $\Phi_e$  se restringiu em apenas remover os efeitos de multicaminho nas medidas de fase a partir da aplicação de uma máscara de elevação, bem como, detectar e não considerar as observações em que ocorrem perdas de ciclos.

Com base nos valores de ROT são estimados os índices de irregularidades da ionosfera  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e ROTI, por meio das equações (23), (24), (25) e (26), respectivamente. À exceção do índice  $f_p$ , na qual se estima os valores a cada 15 minutos para cada IPP dos satélites de uma estação, os demais são representativos da localização da estação, não havendo distinção por satélite. Destacam-se as resoluções temporais dos índices: horário para o  $F_p$ , 15 minutos para o  $I_{ROT}$  e cinco minutos para o ROTI.

Em relação aos índices de cintilação, o aplicativo estima somente os indicadores das cintilações de fase  $\sigma_\phi$  (equação (32)),  $S_\phi$  (equação (35)) e  $\sigma_{CHAIN}$  (equação (36)), haja vista que os receptores das estações das redes não fornecem a intensidade do sinal em seus arquivos RINEX de observações, impossibilitando a estimativa do índice S4. No entanto, análises de cintilações de amplitude podem ser realizadas utilizando a ferramenta *web ISMR Query Tool* (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/index.php>) (VANI, 2014), que permite a visualização dos índices S4 e  $\sigma_\phi$  a partir da leitura dos dados brutos dos receptores PolRxS da Septentrio instalados nas estações da rede CALIBRA. Em contrapartida, a proposta de um índice de cintilação baseado nas medidas de SNR, as quais são fornecidas pelos arquivos de observações, é apresentada na seção 6.5, devido à compatibilidade dos valores do índice proposto com os resultados dos índices S4 provenientes dos receptores da rede CALIBRA.

Os índices de cintilação implementados são estimados a cada minuto, para as portadoras L1 e L2 e para cada satélite rastreado pela estação, no respectivo IPP. Tanto para os índices de irregularidades quanto para os de cintilação são gerados arquivos contendo os valores estimados.

Para a geração de gráficos e mapas de geovisualização dos índices de irregularidades e cintilação da ionosfera é utilizado os recursos do programa livre GNUPLOT. Os gráficos dos índices são gerados automaticamente para cada estação fornecida pelo usuário. Já os mapas de geovisualização são gerados em detrimento da opção escolhida pelo usuário durante o fornecimento das configurações iniciais. Para os índices de irregularidades são gerados mapas de acordo com as resoluções temporais dos mesmos. Já para os índices de cintilação, que são estimados a cada minuto, são produzidos mapas com intervalos de cinco

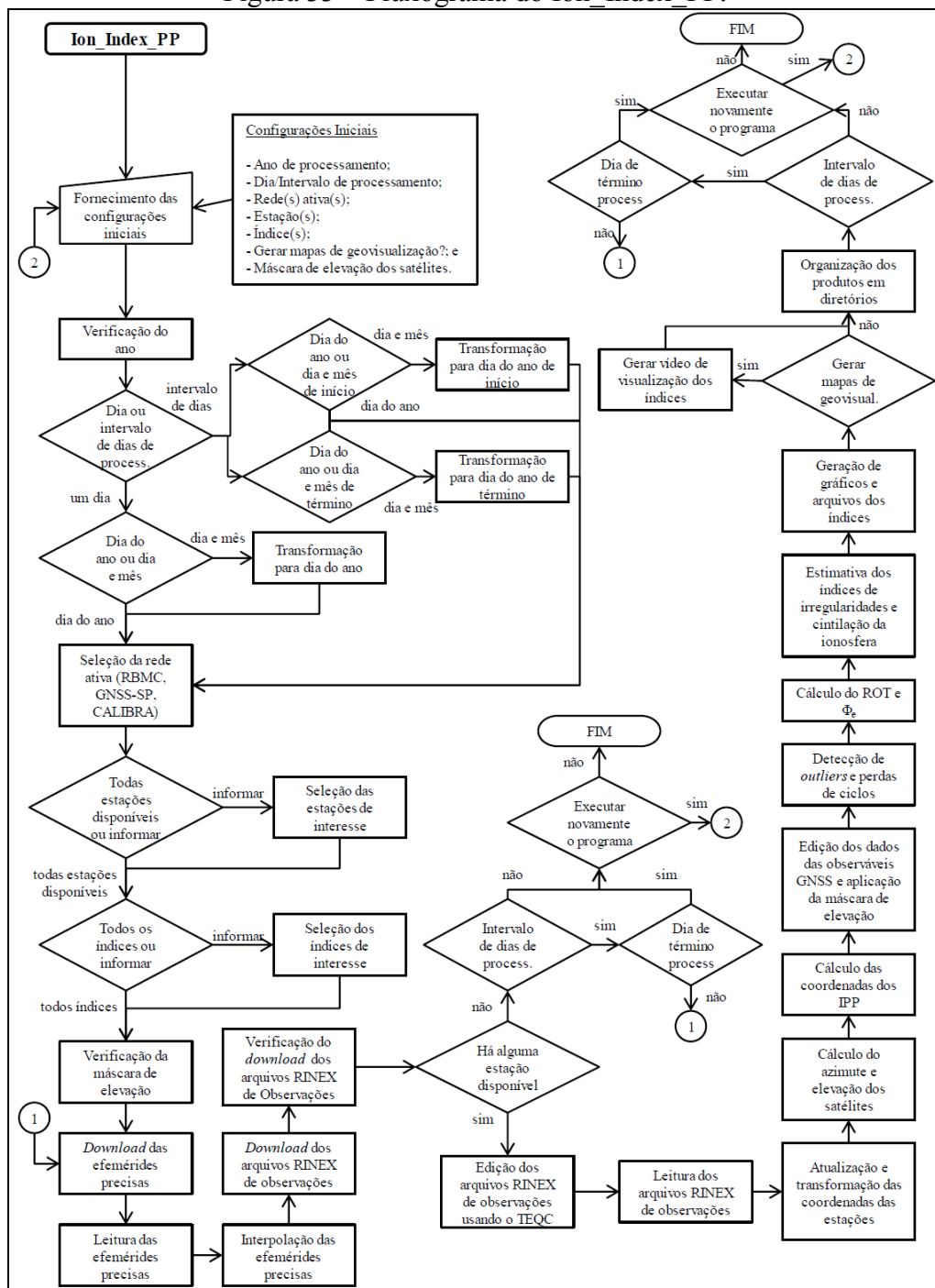
minutos. Isso se deve ao elevado número de imagens que seriam geradas caso fosse respeitado o intervalo de um minuto.

Em relação ao método de interpolação aplicado aos valores para a produção dos mapas, o GNUPLOT utiliza o inverso do quadrado da distância.

Por fim, os arquivos contendo os valores dos índices, os gráficos e os mapas são organizados em diretórios, de modo a facilitar a consulta por parte do usuário.

O fluxograma de execução do Ion\_Index\_PP é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Fluxograma do Ion\_Index\_PP.



## 5.2 Modalidade – Tempo Real

Algumas etapas da modalidade tempo real são congêneres da pós-processada: cálculo do azimute, elevação e coordenadas dos IPP dos satélites; edição dos arquivos RINEX de observações com o TEQC; leitura dos arquivos RINEX de observações e edição dos dados das observáveis GNSS; detecção de *outliers* e perdas de ciclos; cálculo do ROT ou  $\Phi_e$ ; e estimativa do índice de irregularidades ou cintilação da ionosfera.

Primeiramente, na interface do aplicativo, o usuário deve informar as seguintes configurações iniciais:

- Rede(s) ativa(s) de interesse;
- Estações de interesse;
- Índice de irregularidades ou de cintilação da ionosfera desejado;
- Máscara de elevação dos satélites;
- Período do processamento;
- Fuso horário da localidade; e
- Nome da pasta pessoal do computador.

Diferentemente do modo pós-processado, onde todas as estações das três redes ativas podem ser selecionadas para o processamento, contabilizando um total aproximado de 130 estações, no modo tempo real há disponíveis as 88 estações da RBMC-IP (Figura 6) e as 21 estações da GNSS-SP (Figura 4); a rede CALIBRA não disponibiliza os dados via Ntrip. Assim, três opções de combinações de redes ativas podem ser escolhidas: RBMC-IP; GNSS-SP-IP; ou as duas redes.

Em relação a qual índice de irregularidades ou de cintilação da ionosfera deseja-se estimar, o aplicativo *Ion\_Index\_TR* realiza o processamento de apenas um índice por vez. Ressalta-se que o índice  $S_{SNR}$  não está disponível para estimativa, devido as observáveis SNR não serem transmitidas pelas estações por meio do protocolo Ntrip.

Em se tratando de processos em tempo real é necessário o conhecimento do período de processamento, haja vista que alguns aplicativos e programas além do *Ion\_Index\_TR* são executados em concomitância e que, para finalizá-los corretamente, são necessários alguns comandos específicos, sendo esses executados ao término do tempo de processamento informado pelo usuário. Dessa forma é fornecido o período do processamento em minutos, sendo o mesmo limitado em no máximo duas horas.

A penúltima configuração inicial informada é o fuso horário da localidade do usuário. Essa informação é necessária devido as observáveis GNSS transmitidas em tempo real estarem referenciadas ao UTC. Assim, a hora local obtida do computador/notebook do usuário é convertida para UTC subtraindo o fuso horário.

Por fim, é informado o nome da pasta pessoal do computador/notebook. É dentro dessa pasta que um arquivo contendo os comandos do BNC (*BKG Ntrip Client*) – aplicativo responsável pela comunicação do computador/notebook com o Caster dos servidores das redes ativas e transmissão dos dados GNSS – é criado e executado.

Antes de iniciar o processamento em tempo real propriamente dito, o aplicativo realiza algumas etapas a priori, como gerar as matrizes de dados das estações de interesse e determinar o azimute, elevação e coordenadas dos IPP dos satélites para o período de processamento informado.

Sendo assim, para obter o azimute e elevação dos satélites GPS e GLONASS para um tempo futuro, isto é, para o período de processamento informado, faz-se uso das coordenadas cartesianas preditas dos satélites contidas na efeméride ultrarrápida IGV. Esse tipo de efeméride contém as coordenadas preditas dos satélites GPS e GLONASS para um arco de 24 horas, referenciadas ao ITRF2008. Já as coordenadas das estações são transformadas para o ITRF2008 da mesma forma que se realiza no modo pós-processado, entretanto, a atualização das mesmas é referenciada para a época do período do processamento.

Análoga ao modo pós-processado, a interpolação pelo polinômio de Lagrange de 16º ordem nas coordenadas preditas é efetuada, obtendo uma resolução temporal de 1 segundo nas posições dos satélites.

Para armazenar todos os dados recebidos e os valores calculados pelo aplicativo são geradas matrizes indexadoras, cujas linhas referem-se às épocas e as colunas os números dos satélites. Para cada estação são geradas matrizes para armazenar os seguintes dados (Tabela 8):

Tabela 8 – Matrizes de dados das estações.

Elevação dos satélites	Observável pseudodistância L1	Índice $F_p$
Azimute dos satélites	Observável pseudodistância L2	Índice $I_{ROT}$
Latitude dos IPP dos satélites	Instantes de perda de ciclos	Índice ROTI
Longitude dos IPP dos Satélites	Valores de ROT	Índice $\sigma_\Phi$
Observável fase da onda portadora L1	Valores de $\Phi_e$ para a L1	Índice $S_\Phi$
Observável fase da onda portadora L2	Índice $f_p$	Índice $\sigma_{CHAIN}$

Ressalta-se que para os índices  $F_P$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  são gerados vetores, uma vez que os índices não são distinguíveis para cada satélite. Destaca-se também que é gerada apenas a matriz referente ao índice de interesse informado pelo usuário.

O processamento em tempo real se inicia com a conexão do BNC, que consiste em um aplicativo Client do Ntrip. Nessa etapa é gerado um *script* “BNC.bnc” contendo todos os parâmetros de conexão com o Caster da(s) rede(s) ativa(s) selecionada(s), como por exemplo os *mountpoints* das estações de interesse, *login* e senha de acesso ao Caster, o diretório onde será salvo os arquivos RINEX de observações, etc.

Originalmente o *Ion\_Index\_TR* foi idealizado para que o usuário informasse o próprio *login* e senha de acesso ao Caster da RBMC-IP, mediante cadastramento prévio no *website* do IBGE (<http://www.ibge.com.br/home/geociencias/cadastro/>). Entretanto o IBGE permite que o usuário tenha acesso simultâneo a apenas cinco estações, o que, dependendo do tamanho da área que se pretendem realizar o monitoramento das irregularidades ou cintilação da ionosfera, torna o uso do aplicativo inviável devido à baixa resolução espacial. Assim, uma requisição a Gerência de Redes de Referência Planialtimétricas (GRRP) para a criação de um *login* com acesso a todas as estações foi realizada, sendo prontamente atendida, desde que para fins metodológico-científicos. Em relação à rede GNSS-SP a FCT/UNESP, via Laboratório de Geodésia Espacial (LGE), é responsável pelo seu controle e gerenciamento, assim o *login* para acesso ao Caster foi obtido de antemão.

Estabelecida a conexão, arquivos RINEX de observações de cada estação são criados, sendo os mesmos atualizados a cada segundo com a introdução das observáveis GNSS da época corrente (atual).

Uma vez que os arquivos RINEX de observações são criados e atualizados pelo BNC, optou-se por editá-los utilizando o TEQC, onde arquivos temporários contendo apenas as observáveis da época corrente são gerados. Esse método visa eliminar problemas de leitura que possam vir a surgir, problemas quanto à correspondência temporal entre todos os arquivos de observações das estações, e a corriqueira falha na transmissão das observáveis GNSS de alguma estação para um determinado período de tempo. Em relação a esse último tipo de problema, caso para um determinado instante o arquivo temporário de uma dada estação não tenha sido criado, significa que a mesma não transmitiu as observáveis GNSS, mas o aplicativo continua o processamento com as estações operantes e, caso a estação volte a ficar ativa novamente, a mesma reingressa no processamento sem causar dispêndio computacional.

A leitura dos arquivos RINEX e a edição dos dados são realizadas concomitantemente, ou seja, antes de armazenar nas matrizes de dados os valores de fase e pseudodistância das portadoras L1 e L2, verifica-se se as quatro medidas estão disponíveis e, no cenário de disponibilidade, aplica-se a máscara de elevação dos satélites. Somente após a edição é que os valores de fase e pseudodistância são armazenados. Após a leitura dos arquivos temporários, os mesmos são excluídos para não sobrecarregar a memória do computador.

A etapa de detecção de *outliers* e perdas de ciclos é igual a do modo pós-processado, salvo algumas adaptações no algoritmo de Blewitt para o funcionamento em tempo real.

Os métodos para o cálculo do ROT ou  $\Phi_e$  (dependendo da escolha do usuário em estimar índice de irregularidades ou de cintilação) são os mesmos apresentados na seção 5.1, onde o conceito de janela deslizante é aplicado, considerando nesse caso uma janela de 1 minuto e um deslize de 1 segundo. Dessa forma, a cada segundo há um valor de ROT ou um valor de  $\Phi_e$  para cada satélite rastreado.

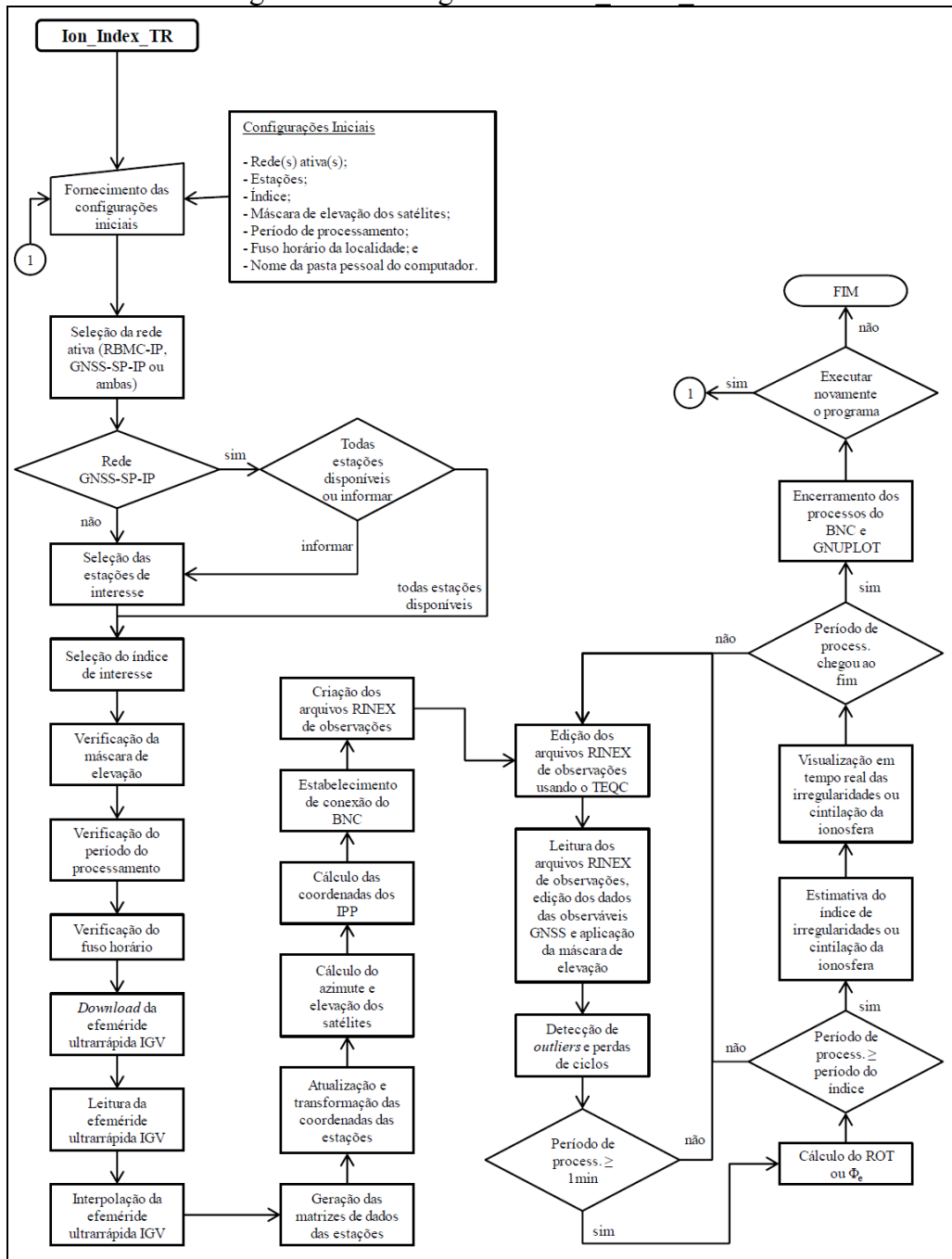
Com base nos valores de ROT é estimado o índice de irregularidades da ionosfera de interesse:  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  ou  $ROTI$ , ou, caso tenha sido selecionado algum dos índices de cintilação –  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  ou  $\sigma_{CHAIN}$  – utiliza-se das medidas da fase do sinal livres de tendências. No entanto, para que os índices sejam estimados a cada segundo aplica-se novamente o conceito de janela deslizante, sendo a janela de acordo com o período de dados específicos de cada índice e o deslize de 1 segundo. Desse modo, dependendo do índice escolhido, o aplicativo permanece em espera até que o primeiro valor seja obtido, por exemplo: para o índice  $F_p$  o `Ion_Index_TR` permanece 1 hora calculando e armazenando os valores de ROT até que o primeiro valor  $F_p$  seja estimado, ao contrário do índice  $\sigma_\phi$ , cujo tempo de espera é de apenas 1 minuto.

Em relação aos índices de cintilação ionosférica, são estimados os valores apenas para a portadora L1 e, diferentemente do modo pós-processado, não são gerados arquivos texto contendo os valores estimados.

Após o período de espera o GNUPLOT é aberto automaticamente e a visualização em tempo real do mapa dos valores do índice de irregularidades ou de cintilação é gerada.

O fluxograma de execução do `Ion_Index_TR` é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Fluxograma do Ion\_Index\_TR.





## 6 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Para a avaliação da estimativa dos índices de irregularidades da ionosfera  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  foram comparados os índices de algumas estações da RBMC com os parâmetros ionosféricos de ionossondas digitais do INPE localizadas próximas as estações.

A avaliação da estimativa dos índices de cintilações de fase  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$  foi realizada a partir do cálculo dos índices utilizando os arquivos RINEX de observações de algumas estações da rede CALIBRA, e comparando-os com os índices que a ferramenta *web* ISMR Query Tool fornece, a qual utiliza os dados brutos das estações da rede.

Na sequência foram estimados índices de irregularidades e de cintilação da ionosfera, bem como, gerados mapas de geovisualização, para dois períodos, 28 de fevereiro a 1 março de 2014 (próximo ao equinócio de outono) e 7 de junho de 2014 (próximo ao solstício de inverno), onde a variação sazonal da densidade de elétrons da ionosfera pôde ser verificada. Foram processados também índices de irregularidades para os dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2010, com a intenção de analisar o comportamento das irregularidades durante a ascensão (ano de 2010) e ápice (ano de 2014) do ciclo solar 24.

Estimativas, análises e geovisualização dos índices de irregularidades e de cintilação em tempo real foram realizadas para o período de 20 a 26 de dezembro de 2014 (solstício de verão).

Por fim, o último experimento consistiu em analisar a correspondência do índice de cintilação de amplitude  $S_4$ , obtido com o ISMR Query Tool, com o índice proposto  $S_{SNR}$ , o qual se baseia nas medidas de SNR contidas nos arquivos RINEX de observações das estações.

### 6.1 Avaliação da Estimativa dos Índices de Irregularidades da Ionosfera

Índices de irregularidades da ionosfera ( $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ ) foram estimados para as estações BOAV (Boa Vista/RR) e CEFT (Fortaleza/CE) da RBMC (Figura 5) para os dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2014, dias esses caracterizados por fortes níveis de irregularidades da ionosfera, devido ao aumento da variação da densidade de elétrons próximo ao equinócio de outono, e uma incursão negativa do índice Dst, que oscilou entre 0 e -100 nT (tempestade geomagnética moderada). Para essas mesmas localidades e dias foram extraídos os parâmetros ionosféricos  $h'F$  (altura virtual mínima do traço F) e  $hmF_2$  (altura do pico de densidade eletrônica da camada F2) das ionossondas digitais de Fortaleza e

Boa Vista do INPE, além de ser calculada a densidade máxima de elétrons da camada F2, representada por NmF2, a partir dos valores de foF2 (frequência crítica da onda ordinária da camada F2). Os resultados foram comparados com o intuito de avaliar a estimativa dos índices de irregularidades da ionosfera a partir do aplicativo desenvolvido.

As Figuras 35 e 37 apresentam os índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e ROTI da estação BOAV para os dias 28 de fevereiro (dia do ano 59) e 1 de março (dia do ano 60) de 2014, respectivamente. Nas Figuras 39 e 41 são apresentados os índices de irregularidades da estação CEFT para o período em questão. Em ambos os dias foi considerado uma máscara de elevação de  $35^\circ$ , visando minimizar ao máximo os efeitos de multicaminho nos sinais GNSS. A adoção do valor da máscara de elevação depende muito da região de estudo, assim um estudo preliminar acerca da redondeza das estações é recomendado; pesquisadores têm adotado valores iguais ou superiores a  $20^\circ$ , como por exemplo: Mushini et al. (2012), Oladipo e Schüler (2013) e Meggs et al. (2006) apud Oladipo e Schüler (2013), utilizaram  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  e  $35^\circ$  de elevação, respectivamente. Nos gráficos a linha verde indica o limite entre baixos e moderados níveis de irregularidades da ionosfera, ao passo que a linha vermelha indica o limite entre os níveis moderados e fortes. Ressalta-se que para a estimativa dos índices de irregularidades da ionosfera são utilizados apenas as medidas de fase da onda portadora provenientes dos satélites GPS e GLONASS. Já os parâmetros  $h'F$ ,  $hmF2$  e  $NmF2$  obtidos das ionossondas de Boa Vista e Fortaleza são apresentados nas Figuras 36, 38, 40 e 42.

Figura 35 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$  e d)  $ROTI$ , estação BOAV/RBMC, 28/02/2014.

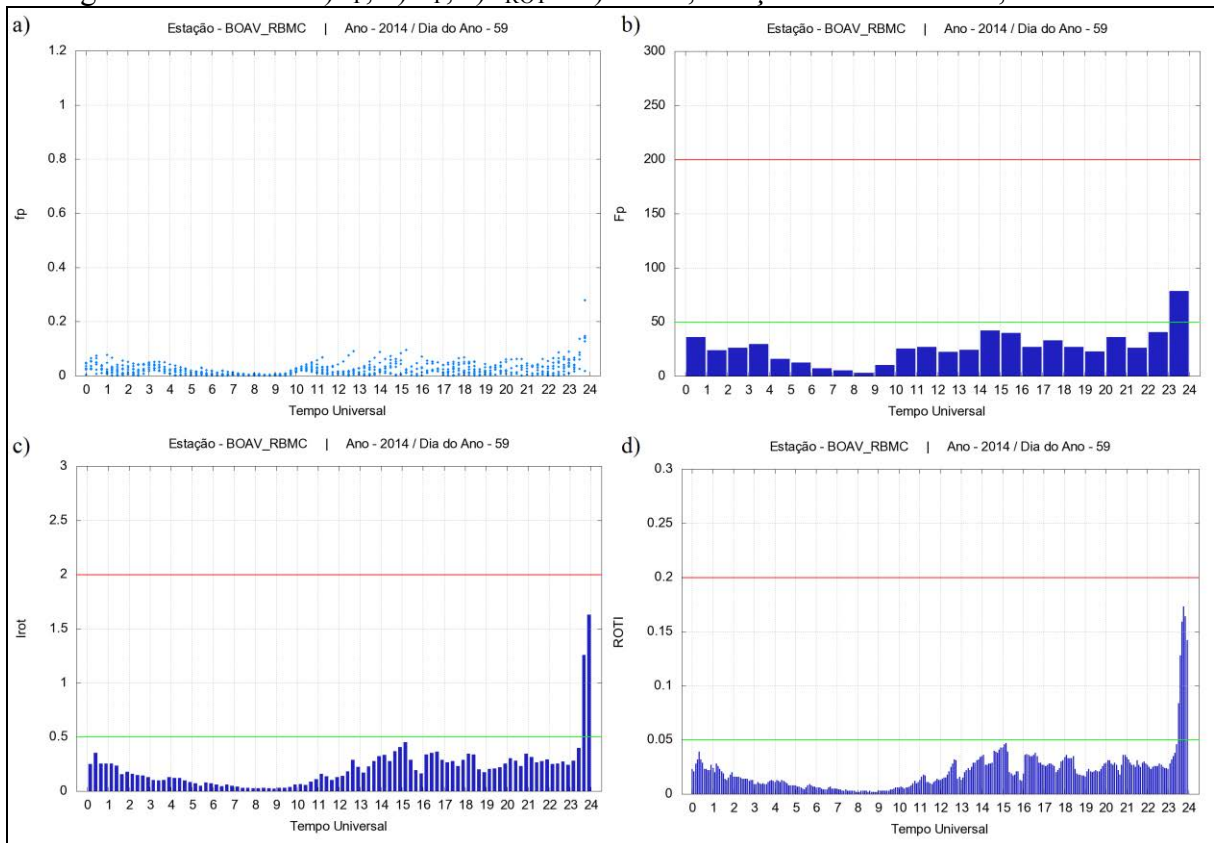
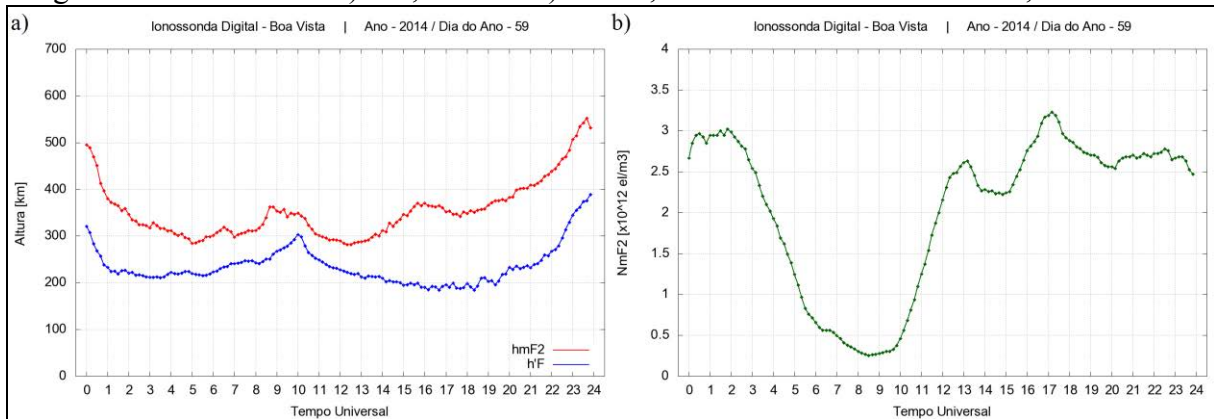


Figura 36 – Parâmetros a)  $h'F$ ,  $hmF2$  e b)  $NmF2$ , ionossonda Boa Vista/INPE, 28/02/2014.



Fonte: Adaptado de <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Figura 37 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$  e d)  $ROTI$ , estação BOAV/RBMC, 01/03/2014.

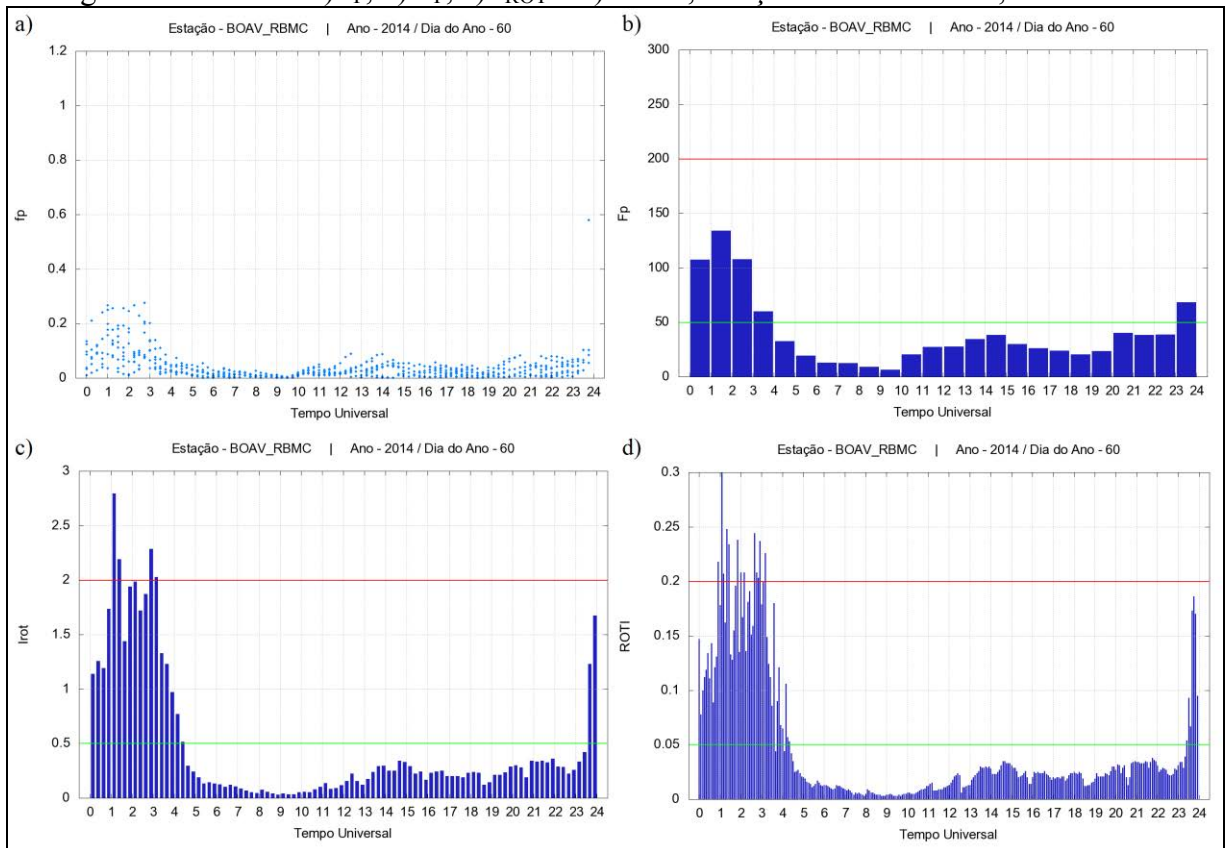
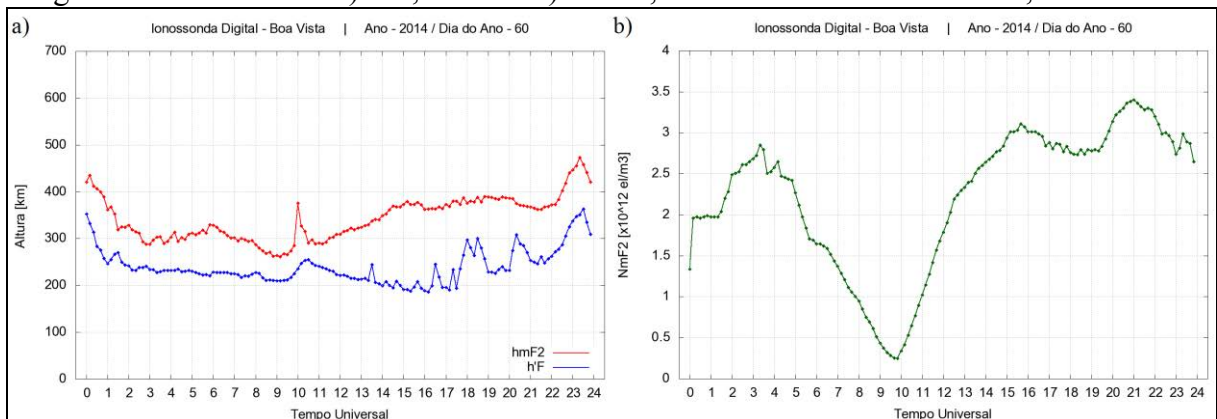


Figura 38 – Parâmetros a)  $h'F$ ,  $hmF2$  e b)  $NmF2$ , ionossonda Boa Vista/INPE, 01/03/2014.



Fonte: Adaptado de <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Figura 39 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$  e d)  $ROTI$ , estação CEFT/RBMC, 28/02/2014.

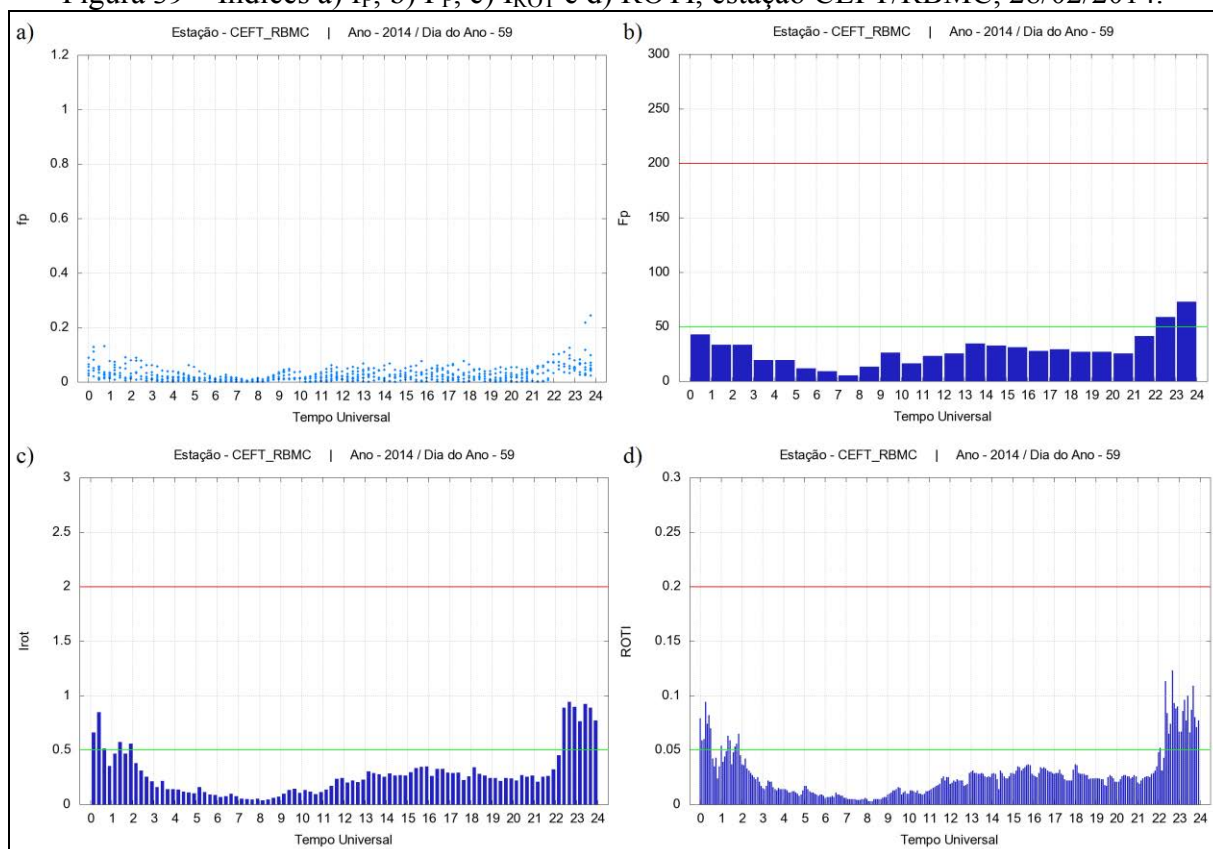
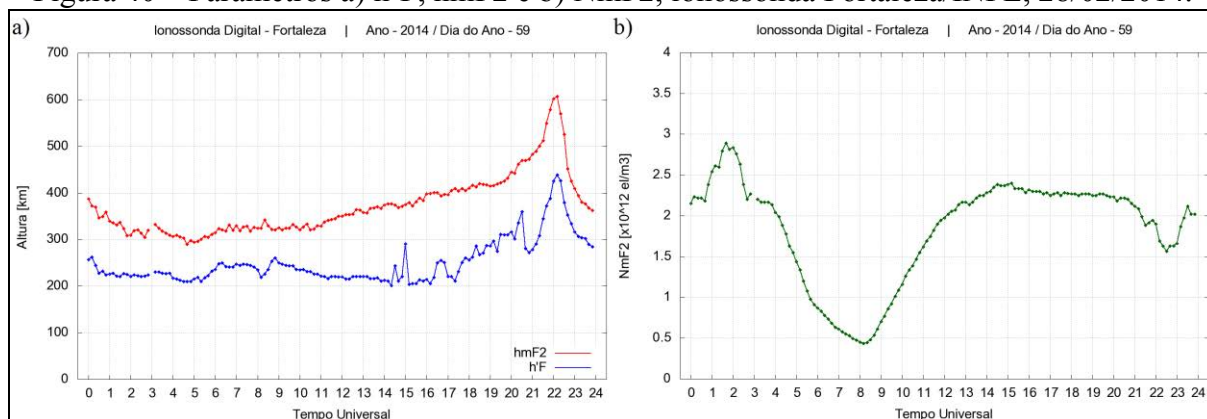


Figura 40 – Parâmetros a)  $h'F$ ,  $hmF2$  e b)  $NmF2$ , ionossonda Fortaleza/INPE, 28/02/2014.



Fonte: Adaptado de <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Figura 41 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$  e d)  $ROTI$ , estação CEFT/RBMC, 01/03/2014.

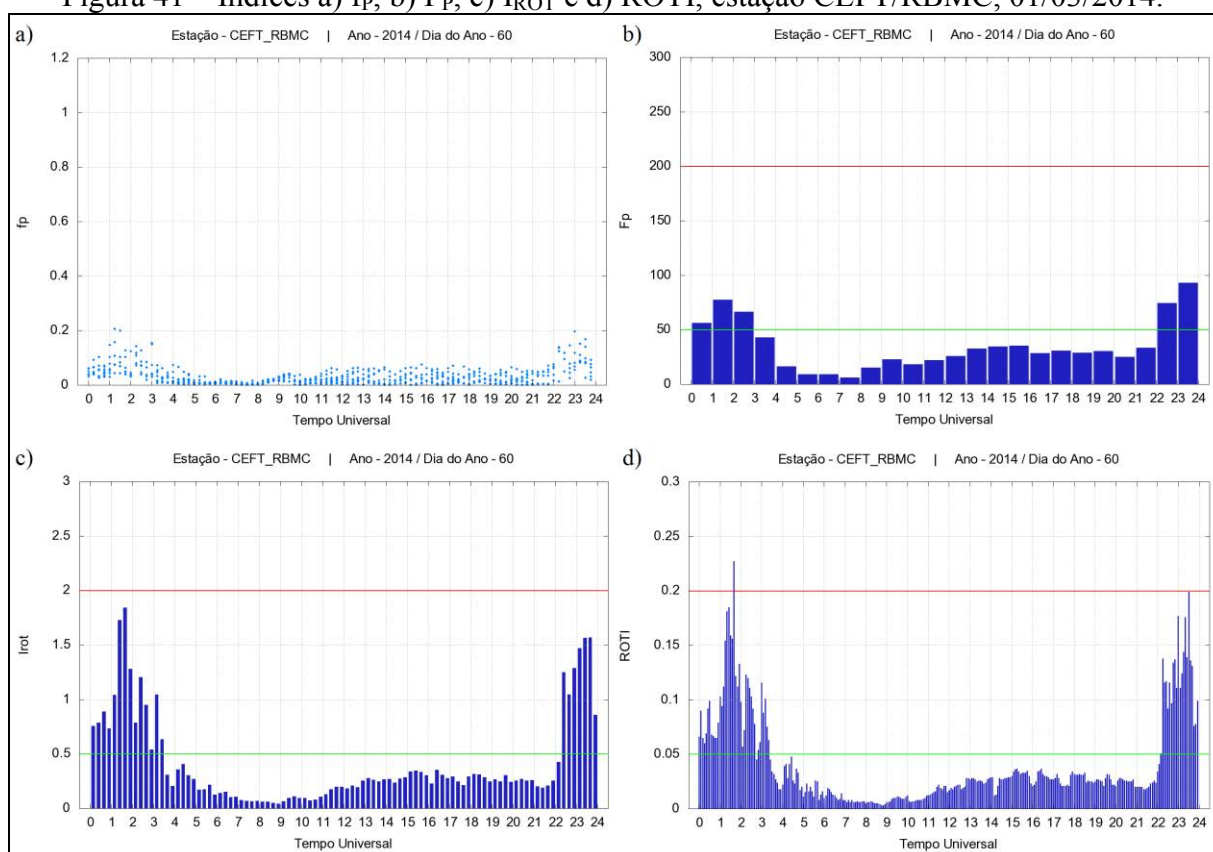
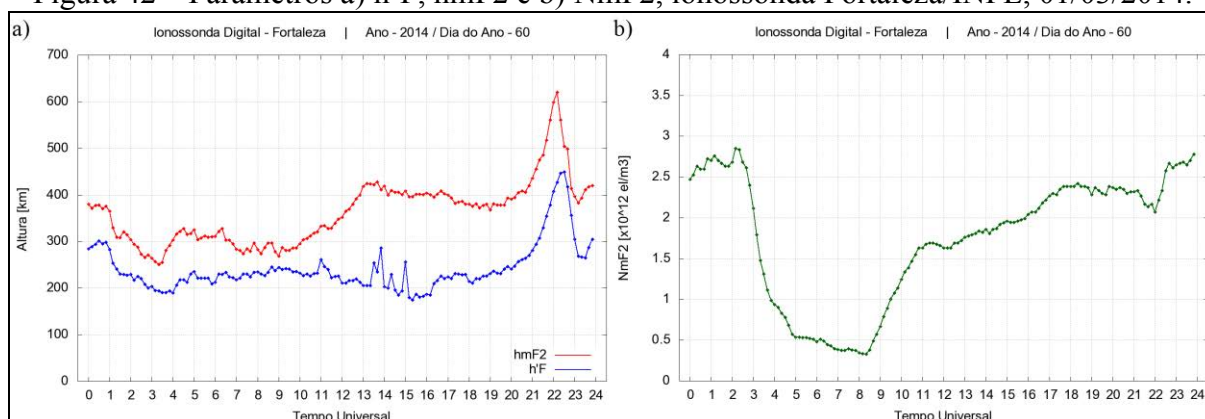


Figura 42 – Parâmetros a)  $h'F$ ,  $hmF2$  e b)  $NmF2$ , ionossonda Fortaleza/INPE, 01/03/2014.



Fonte: Adaptado de <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Analisando os índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  da estação BOAV para o dia 28 de fevereiro de 2014 (Figura 35b, c e d), nota-se que os valores permaneceram inferiores aos limiares classificatórios de baixos níveis de irregularidades da ionosfera (linha verde) durante grande parte do dia, com exceção para o período 23-24h TU, onde o valor de  $F_p$  foi superior a 50 e os valores de  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  maiores que 0,5 e 0,05, respectivamente, caracterizando moderadas irregularidades. Verifica-se que os índices  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  representam/detalham

mais as irregularidades da ionosfera do que o índice  $F_p$ , devido ao fato de ambos serem obtidos a partir de períodos de dados menores do que o índice  $F_p$  (para o índice  $I_{ROT}$  o período é de 15 minutos, para o ROTI é de 5 minutos e para o  $F_p$  é de 1 hora). Dessa forma os índices  $I_{ROT}$  e ROTI identificam as flutuações no sinal em pequena escala, ao passo que o índice  $F_p$  retrata o nível geral de irregularidades.

Comparando os instantes em que os valores dos índices de irregularidades se elevaram na Figura 35 com os respectivos momentos dos parâmetros ionosféricos  $h'F$  e  $hmF2$  da Figura 36a, observa-se uma concordância temporal. Nas horas 00-01h e 23-24h TU a base da camada F ionosférica teve elevações acentuadas ( $h'F = 321$  km e  $h'F = 390$  km, respectivamente), suficiente para iniciar os processos de geração de irregularidades ionosféricas com escalas de tamanho capazes de gerar flutuações na fase dos sinais GNSS, corroborado pelo aumento das alturas do pico de ionização ( $hmF2 = 495$  km e  $hmF2 = 542$  km). Para as demais horas do dia os valores da altura do pico de ionização ( $hmF2$ ) juntamente com a base da camada F ( $h'F$ ) permaneceram relativamente baixos, em torno de  $hmF2 = 285$  km e  $h'F = 210$  km, respectivamente. Estas irregularidades não tinham amplitudes capazes de causar flutuações nos sinais GNSS, o que pode ser verificado nos valores dos índices de irregularidades.

Para o dia 1 de março de 2014 (Figura 37), os índices de irregularidades da estação BOAV apresentaram um comportamento análogo ao dia 28 de fevereiro de 2014, sendo que a duração das irregularidades ionosféricas nas primeiras horas do dia foi maior (00-04h TU) e o nível das mesmas também, atingindo um  $F_p$  em torno de 140,  $I_{ROT}$  acima de 2 e ROTI superior a 0,2. Observa-se que, considerando o índice  $F_p$ , as irregularidades são classificadas como moderadas, já os valores de  $I_{ROT}$  e ROTI indicam fortes irregularidades; isso se justifica pela forma que os índices são calculados e os períodos de dados: o  $F_p$  se baseia no índice  $f_p$ , que por sua vez é obtido pela mediana dos ROT's, o que elimina possíveis altos valores; já a natureza do  $I_{ROT}$  e o ROTI é o RMS e desvio-padrão, respectivamente, os quais consideram todos os valores de ROT obtidos, proporcionando assim valores mais altos que o  $F_p$ .

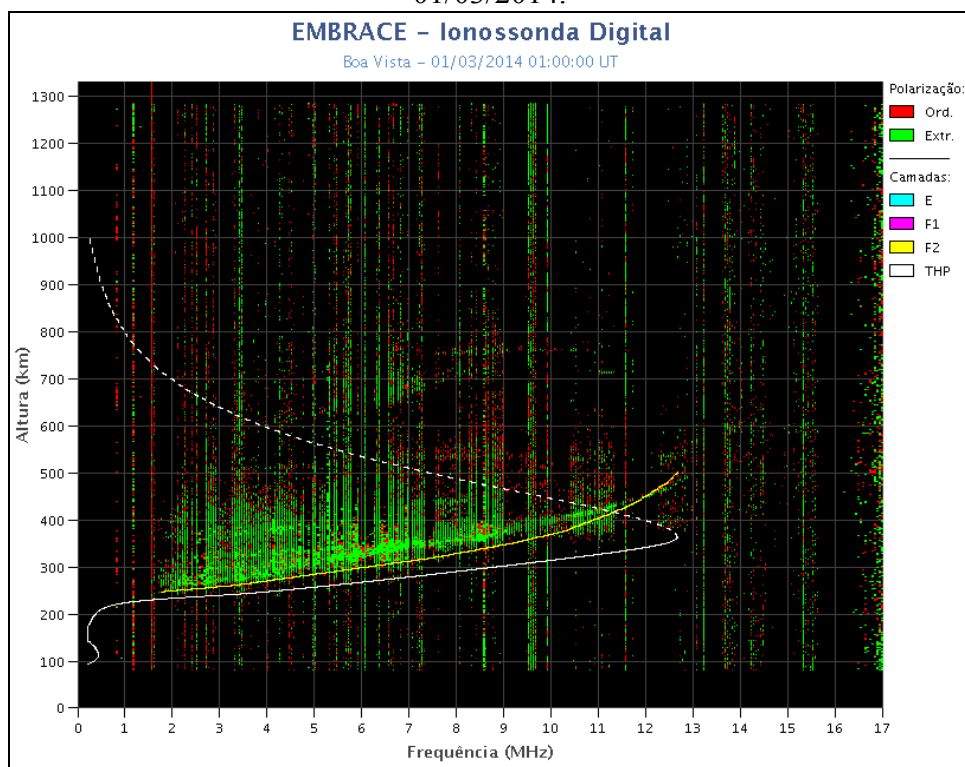
Em relação aos parâmetros da ionossonda de Boa Vista para o dia 1 de março de 2014 (Figura 38), durante o período 00-04h TU os valores de  $h'F$  e  $hmF2$  foram maiores se comparado com o mesmo período do dia 28 de fevereiro de 2014, comprovando assim a duração e o nível das irregularidades apresentados pelos índices. O parâmetro  $h'F$  apresentou um valor médio de 250 km, com um máximo de 352 km, e a altura do pico de ionização uma média de 320 km, com um máximo de 435 km (valor esse inferior ao máximo

do dia 28 de fevereiro de 2014). A densidade máxima de elétrons da camada F2 (NmF2) (Figura 38b) corrobora com o comportamento dos índices de irregularidades da ionosfera, pois durante 00-04h TU houve uma ascensão na densidade eletrônica, obtendo um máximo de  $2,8 \times 10^{12}$  el/m<sup>3</sup>, bem como na 23-24h TU, onde a densidade chegou a  $3 \times 10^{12}$  el/m<sup>3</sup>, após um comportamento de descendência que iniciara desde as 21h TU.

Coefficientes de correlação de Pearson foram calculados entre os índices de irregularidades e os parâmetros ionosféricos para o período de alta variabilidade da densidade de elétrons, sendo que entre os índices de irregularidades e o parâmetro h'F a correlação foi em torno de 0,42, com o parâmetro hmF2 aproximadamente 0,62, e com a densidade eletrônica máxima da camada F2 próximo de 0,71, o que transmite uma correlação moderada entre os valores.

Considerando o instante 01h00min TU do dia 1 de março de 2014, cujos índices de irregularidades estimados apresentaram os maiores valores, foi obtido o respectivo ionograma (Figura 43), onde pode-se verificar a manifestação das irregularidades por meio do espalhamento do pulso refletido, fazendo com que os traços do ionograma não sejam bem definidos.

Figura 43 – Ionograma da ionossonda de Boa Vista/INPE para o instante 01h00min TU, 01/03/2014.



Fonte: <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/index\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/index_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.



As mesmas análises podem ser aplicadas a respeito dos índices de irregularidades estimados para a estação CEFT e dos parâmetros ionosféricos da ionossonda de Fortaleza, para os dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2014, salvo que no último dia as irregularidades foram classificadas como moderadas. Em relação às correlações entre  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  com  $h'F$ , os valores foram em torno de 0,49, ao passo que com a altura do pico de ionização a correlação foi 0,51 e com  $NmF2$  foi 0,74. Tanto para a estação BOAV e ionossonda Boa Vista quanto para CEFT e ionossonda Fortaleza as correlações obtidas foram moderadas, com exceção das correlações com o parâmetro  $NmF2$ , classificadas de moderada a forte. Um motivo para as correlações moderadas se deve a diferença entre os intervalos de amostragem dos índices de irregularidades da ionosfera (1 hora, 15 minutos e 5 minutos) e dos parâmetros  $h'F$ ,  $hmF2$  e  $NmF2$  (de 10 em 10 minutos).

Visando comprovar a estimativa dos índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  para um período de baixa irregularidades ionosféricas foram obtidos índices para CEFT, com máscara de elevação de  $35^\circ$ , para o dia 11 de junho de 2014 (dia do ano 162), próximo ao solstício de inverno (menor variabilidade da densidade de elétrons), cujo valor de  $Dst$  oscilou próximo de 0 nT. A Figura 44 apresenta os índices de irregularidades e a Figura 45 os valores de  $h'F$ ,  $hmF2$  e  $NmF2$  da ionossonda de Fortaleza.

Figura 44 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$  e d)  $ROTI$ , estação CEFT/RBMC, 11/06/2014.

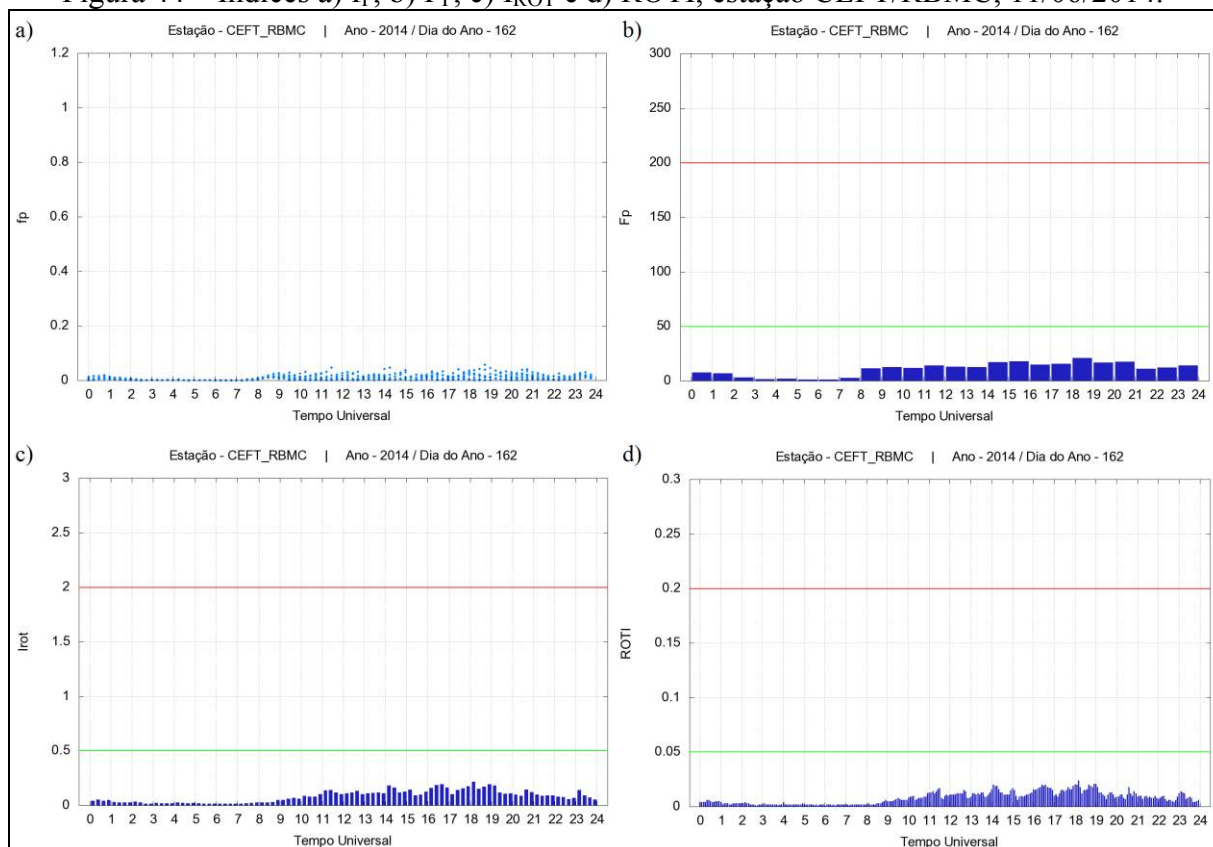
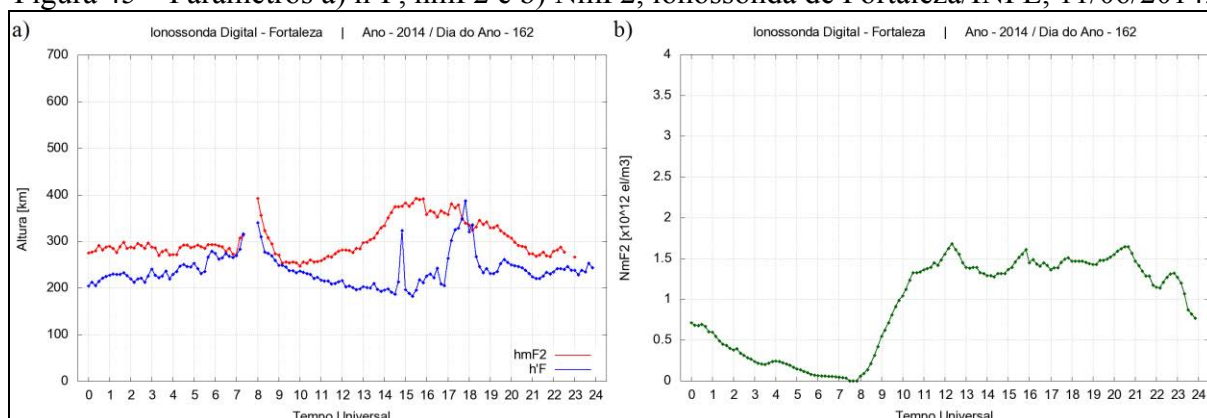


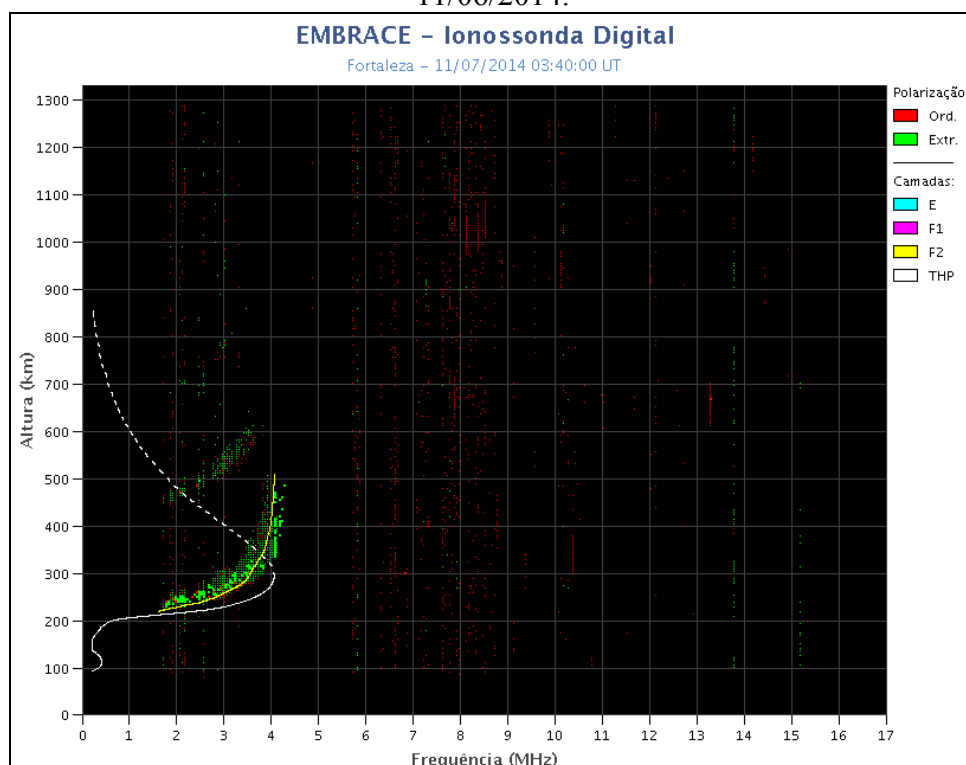
Figura 45 – Parâmetros a) h'F, hmF2 e b) NmF2, ionossonda de Fortaleza/INPE, 11/06/2014.



Fonte: Adaptado de <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/charts_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Neste caso todos os valores dos indicadores foram inferiores aos limiares de baixos níveis de irregularidades da ionosfera (linha verde da Figura 44), corroborado pelos baixos valores de h'F (em torno de 210 km), hmF2 (270 km) e NmF2 ( $1,4 \times 10^{12}$  el/m<sup>3</sup>), o que indica a correspondência entre a classificação das irregularidades por meio dos índices e por meio dos parâmetros ionosféricos. A ausência de dados entre 7h e 8h TU dos parâmetros h'F e hmF2 se devem à algum problema inerente a ionossonda no período. Os coeficientes de correlação obtidos oscilaram em torno de 0,54 para h'F e hmF2 e próximo de 0,91 para NmF2. Para exemplificação a Figura 46 mostra o ionograma da ionossonda de Fortaleza para o instante 03h40min TU, onde se comprova que não houve irregularidades na ionosfera, pois não ocorreu o alargamento do pulso refletido e os traços são bem definidos.

Figura 46 – Ionograma da ionossonda de Fortaleza/INPE para o instante 03h40min TU, 11/06/2014.



Fonte: <[http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/index\\_ion.xhtml](http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/index_ion.xhtml)>. Acesso em: 10 jul. 2014.

Assim avalia-se que a estimativa dos índices de irregularidades da ionosfera pelo aplicativo é coerente e fidedigna com a realidade, uma vez que os valores dos índices foram comparados com dados de fonte externa. No entanto, ressalta-se que foram utilizados os valores de apenas duas ionossondas digitais (Boa Vista e Fortaleza) do INPE, haja vista que apenas ambas encontravam-se disponíveis para os períodos em análise e o acesso aos dados é livre.

## 6.2 Avaliação da Estimativa dos Índices de Cintilações de Fase

Para a avaliação dos índices de cintilações de fase estimados pelo Ion\_Index ( $\sigma_{\Phi}$ ,  $S_{\Phi}$  e  $\sigma_{CHAIN}$ ) foi considerado o mesmo período de alta variação da densidade de elétrons da ionosfera utilizado para a avaliação das irregularidades (28 de fevereiro e 1 de março de 2014) e o dia 7 de junho de 2014, onde há uma diminuição da variabilidade da densidade eletrônica devido a variação sazonal do ângulo zenital do Sol.

Índices de cintilações de fase foram estimados para seis estações da rede CALIBRA: INCO, PALM, POAL, PRU1, SJCE e UFBA (Figura 3). Para a estimativa o aplicativo utiliza as medidas de fase da onda portadora contidas nos arquivos RINEX de

observações das estações (amostragem de 0,067 Hz). Para essas mesmas estações e período de dias foram obtidos os gráficos do índice  $\sigma_\phi$  por meio da ferramenta *web* ISMR Query Tool. O ISMR Query Tool permite a consulta aos valores dos índices S4 e  $\sigma_\phi$  das estações da rede CALIBRA, sendo que esses valores são disponibilizados pelos receptores PolARxS da Septentrio por meio de cálculos e aplicação de método de *detrending* apropriado aos dados brutos, os quais estão amostrados em 50 Hz. Em ambos os aplicativos foi considerado uma máscara de elevação de 35°, análoga ao experimento da seção 6.1.

Assim, para cada estação selecionada, têm-se o índice  $\sigma_\phi$  proveniente do ISMR Query Tool, o qual na pesquisa é considerado o “valor verdadeiro/conhecido”, e o índice  $\sigma_\phi$  do Ion\_Index, considerado o “valor estimado”, bem como, os outros dois índices de cintilações de fase  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ . Dessa forma, os resultados foram comparados com o intuito de avaliar a estimativa dos índices de cintilações de fase.

As Figuras 47 a 52 apresentam os índices  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$  estimados pelo aplicativo, bem como, o índice  $\sigma_\phi$  pelo ISMR Query Tool, das estações selecionadas para o dia 28 de fevereiro de 2014 (dia do ano 59). Já as Figuras 53 a 58 apresentam os índices para o dia 1 de março de 2014 (dia do ano 60) e as Figuras 59 a 64 os índices referentes ao dia 7 de junho de 2014 (dia do ano 158). Destaca-se que nos gráficos o índice  $\sigma_\phi$  é representado pela expressão “Sigma-Phi”, o índice  $S_\phi$  por “S-Phi” e  $\sigma_{CHAIN}$  por “Sigma-CHAIN”; a linha verde indica o limite entre fraca e moderada cintilação ionosférica, ao passo que a linha vermelha indica o limite entre os níveis moderado e forte. São apresentados somente os valores para a portadora L1.

Figura 47 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 28/02/2014.

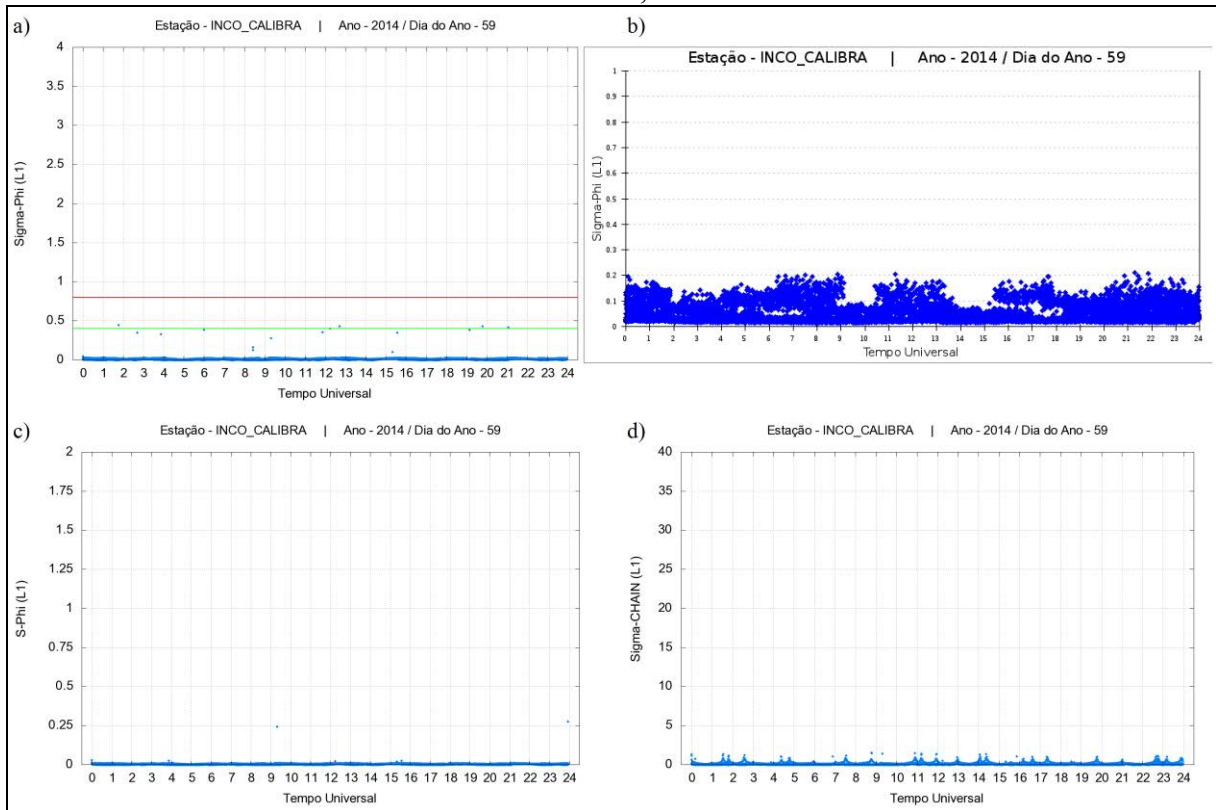


Figura 48 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 28/02/2014.

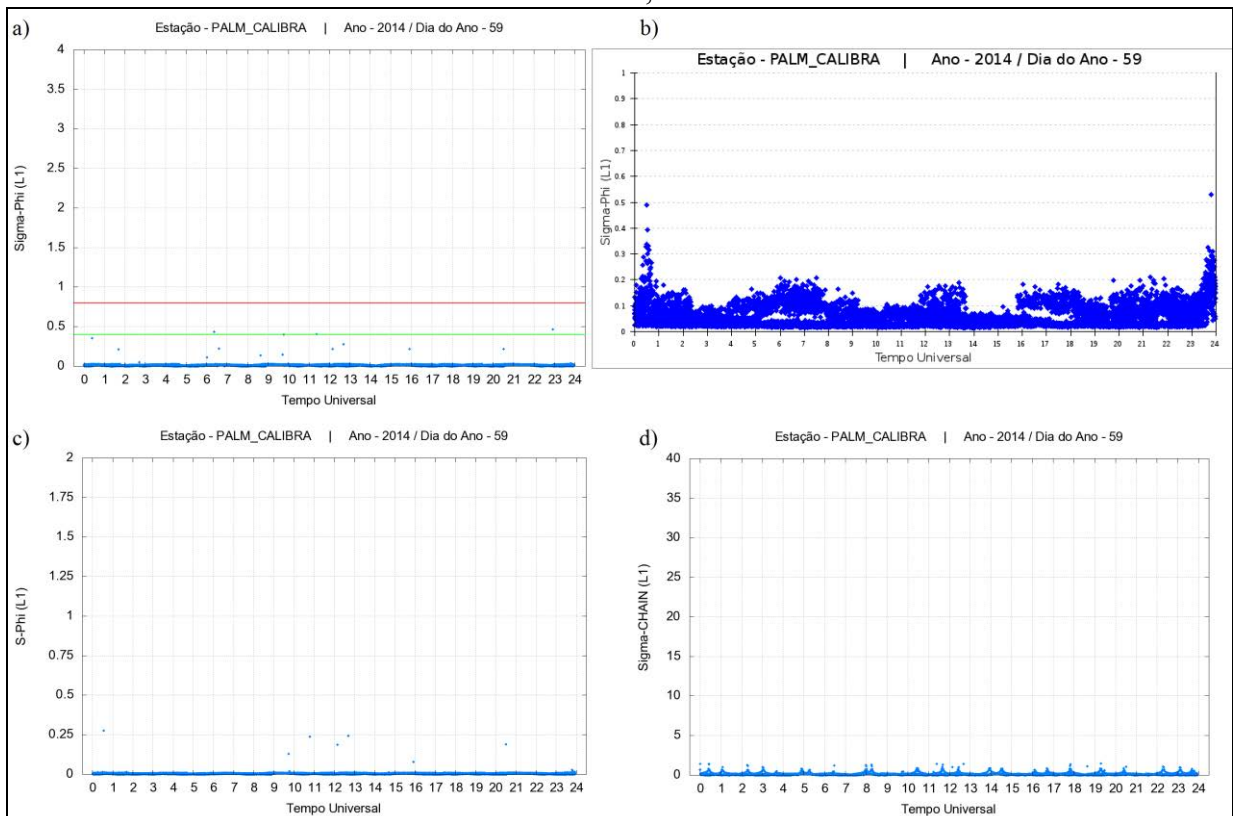


Figura 49 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 28/02/2014.

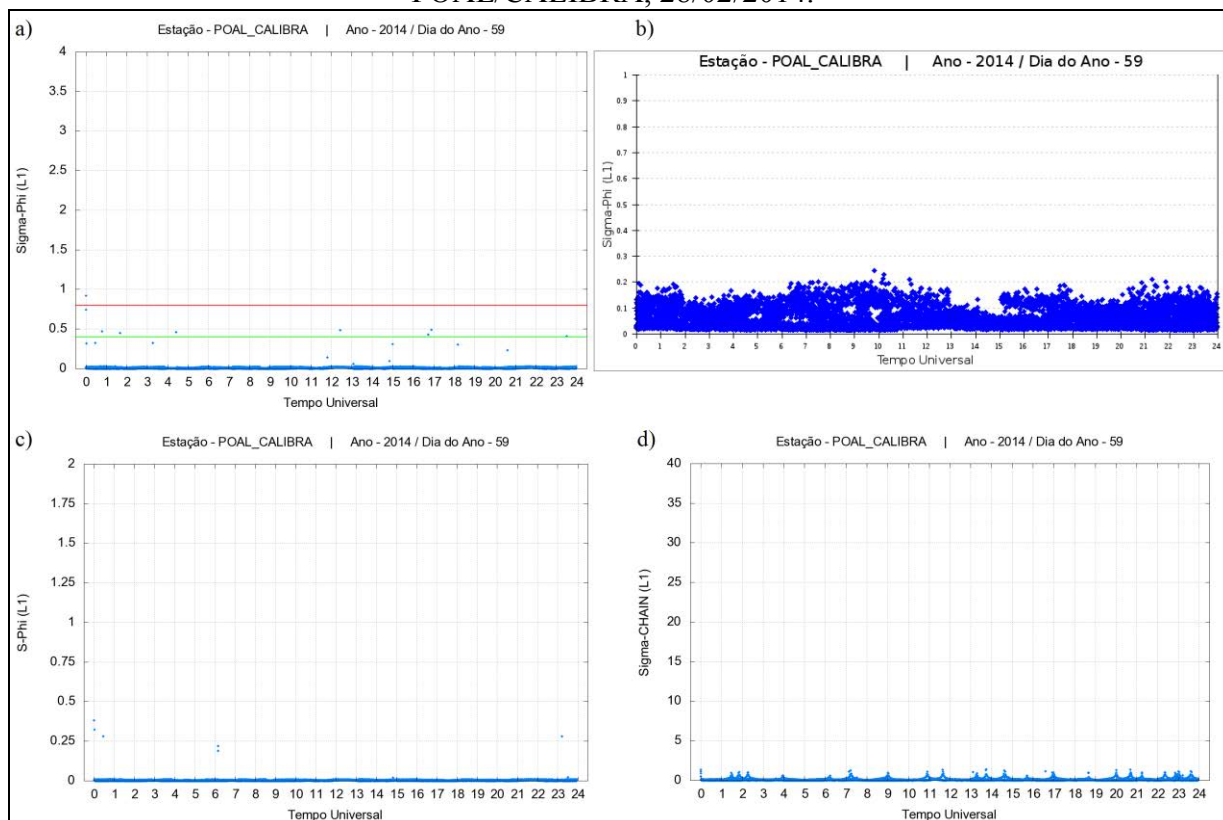


Figura 50 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 28/02/2014.

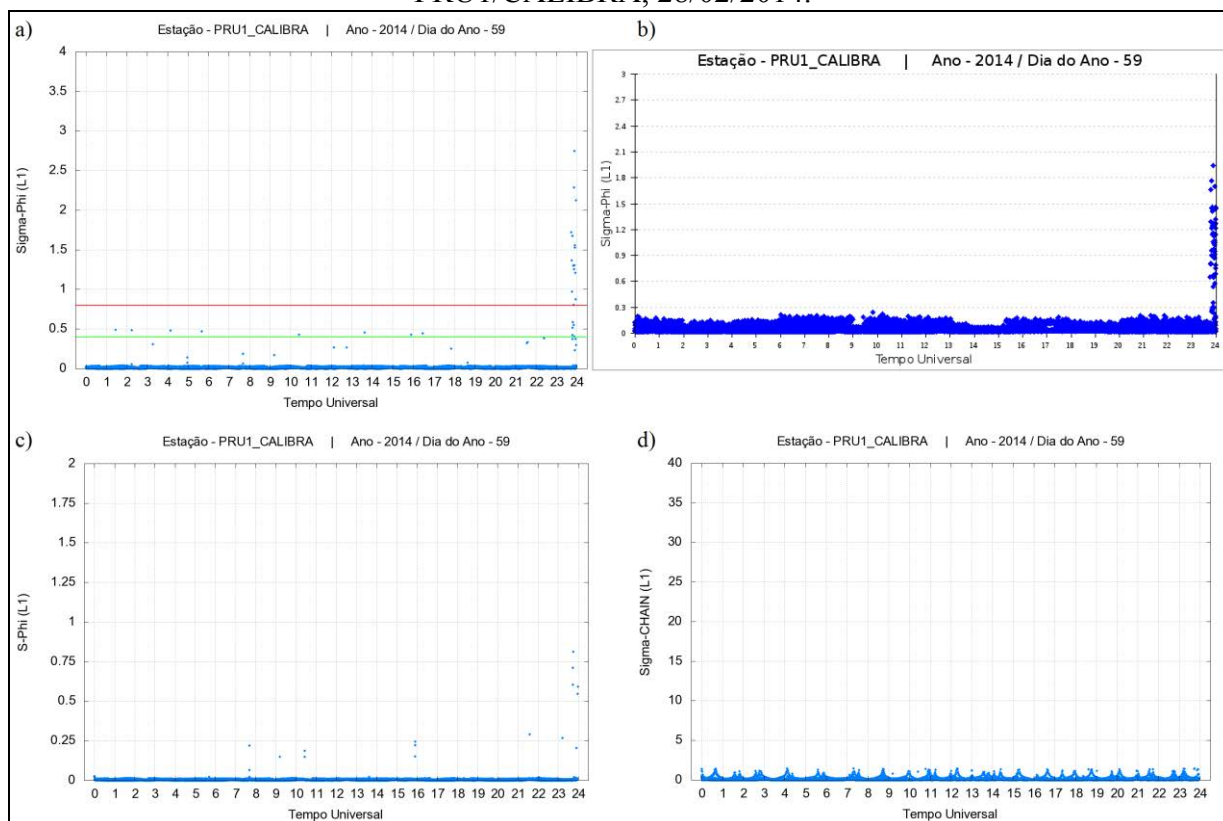


Figura 51 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 28/02/2014.

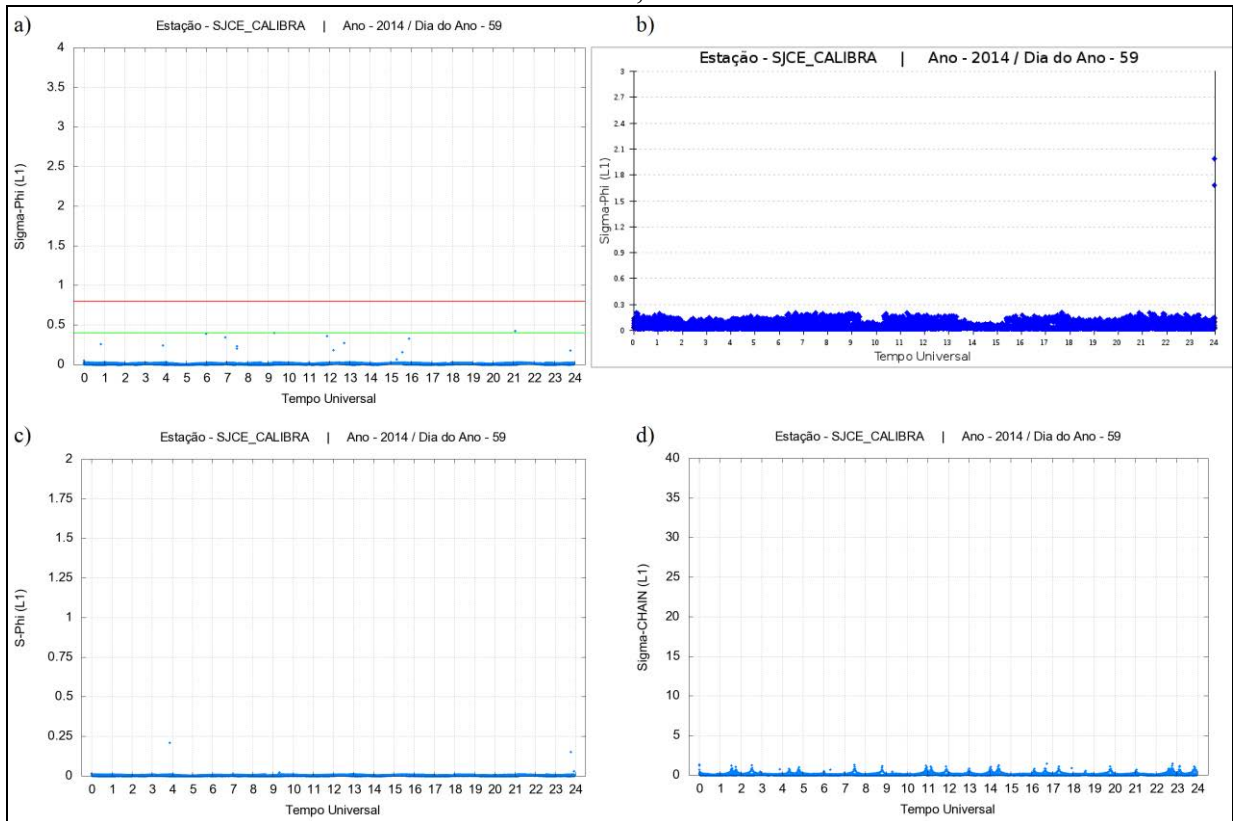


Figura 52 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 28/02/2014.

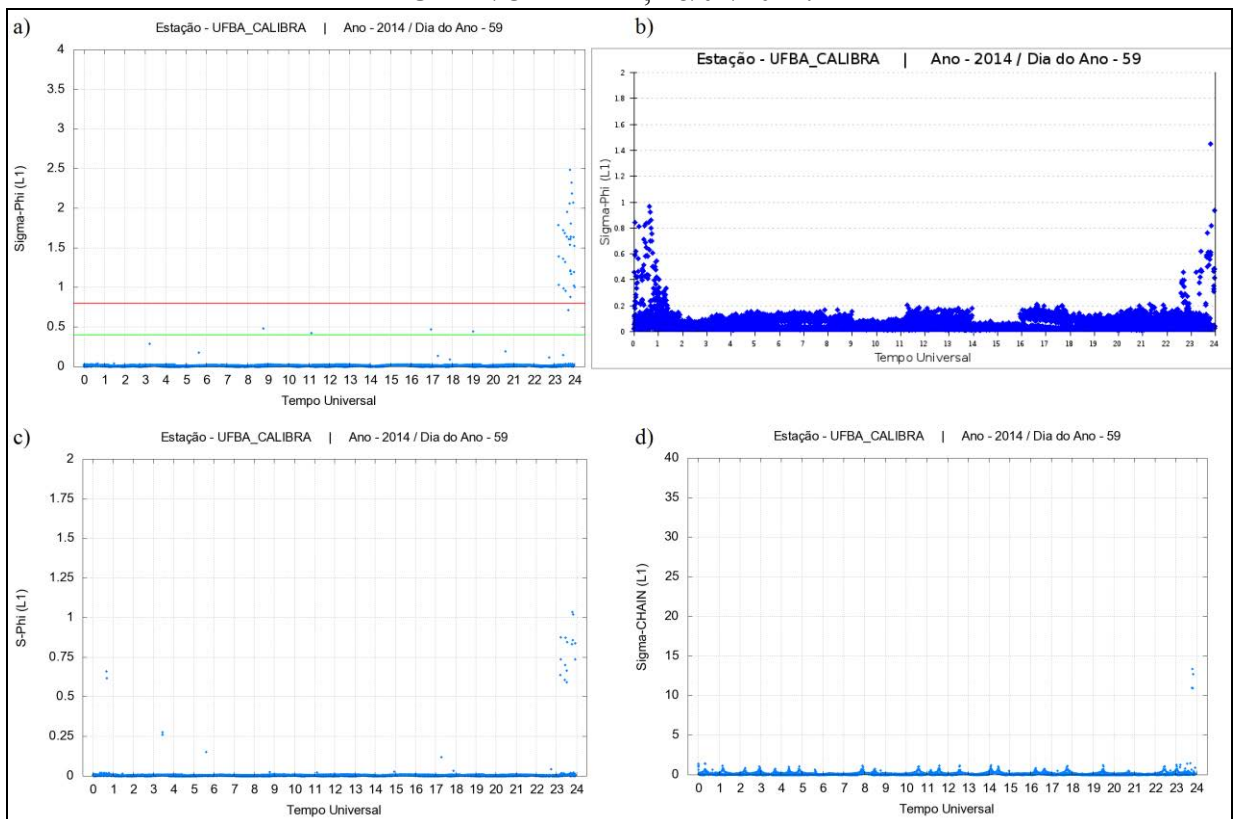


Figura 53 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 01/03/2014.

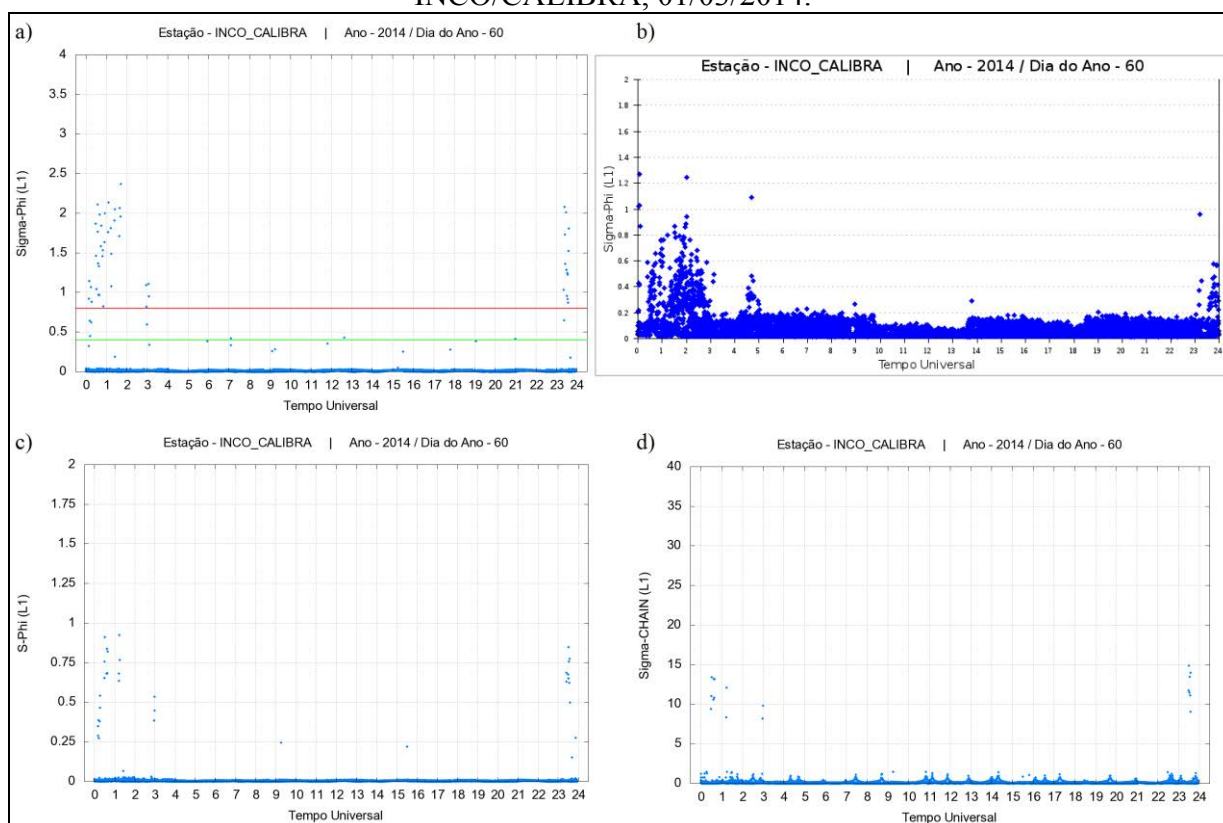


Figura 54 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 01/03/2014.

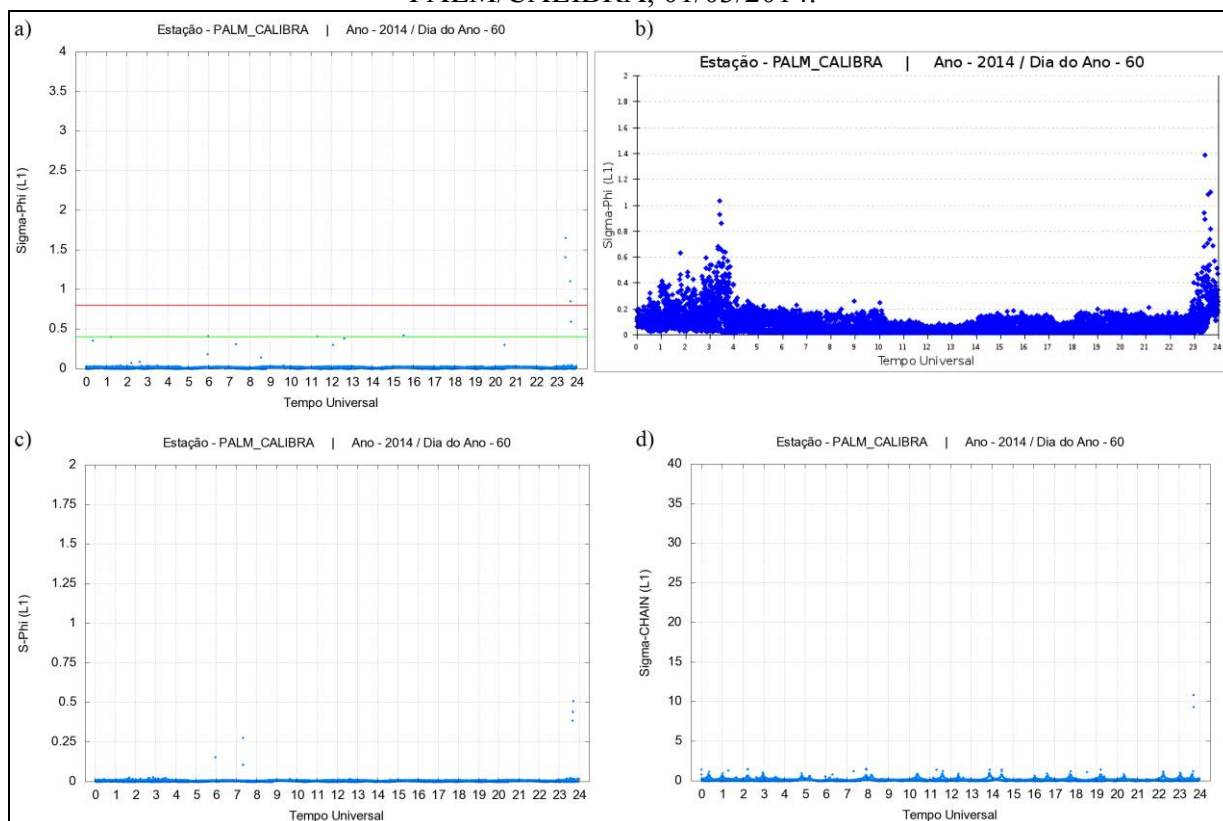




Figura 55 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 01/03/2014.

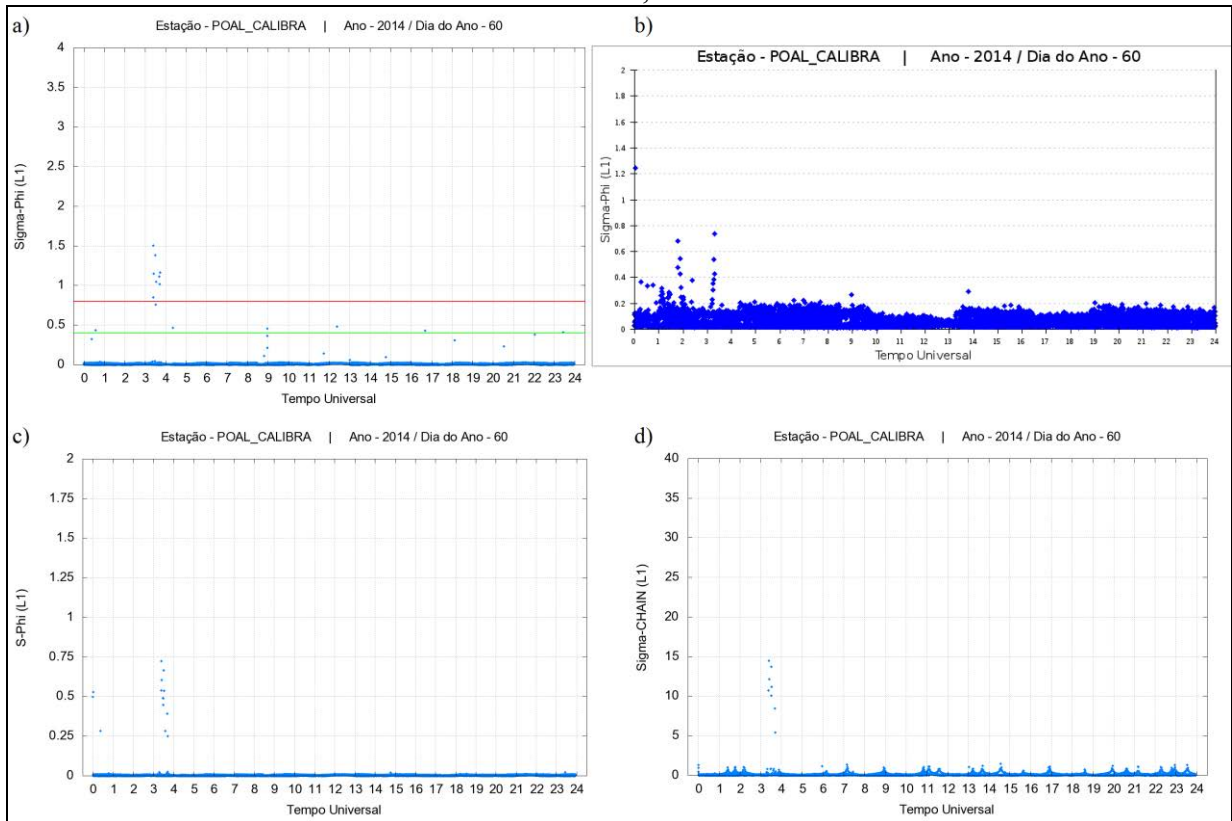


Figura 56 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 01/03/2014.

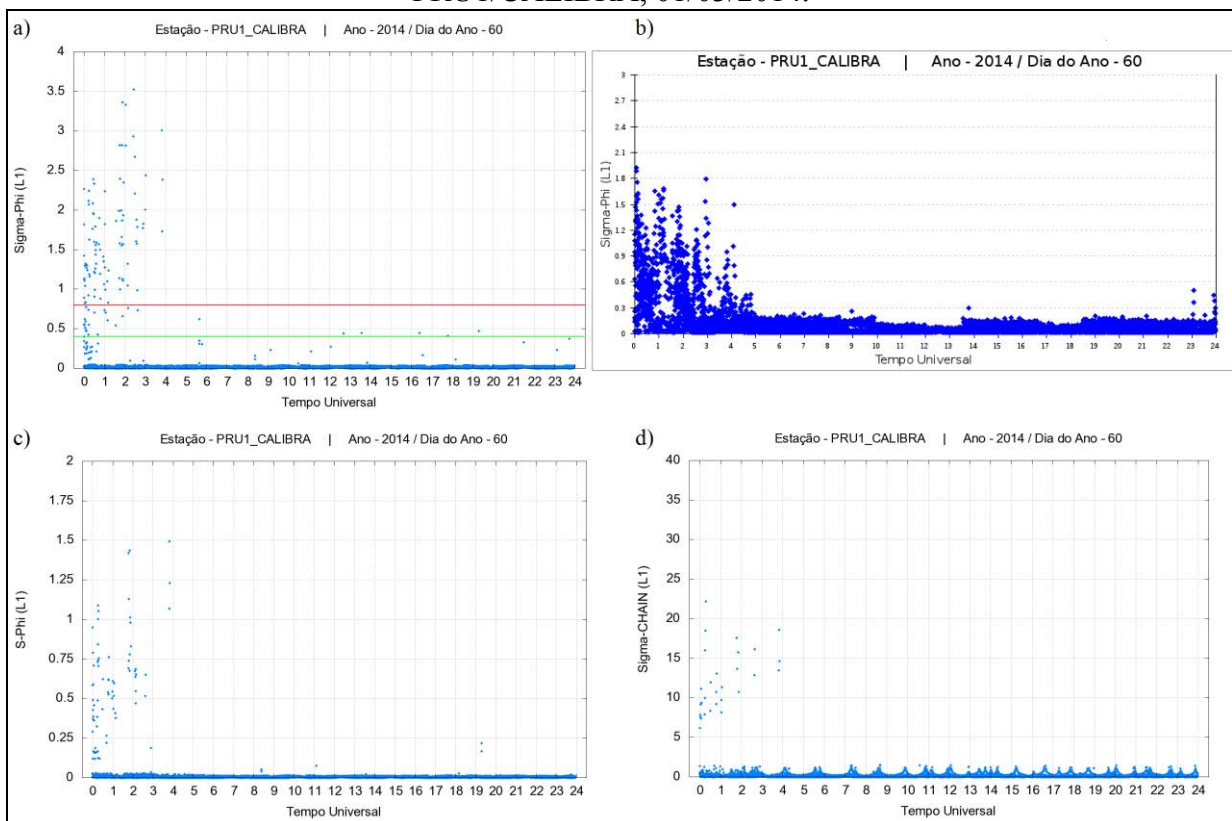


Figura 57 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 01/03/2014.

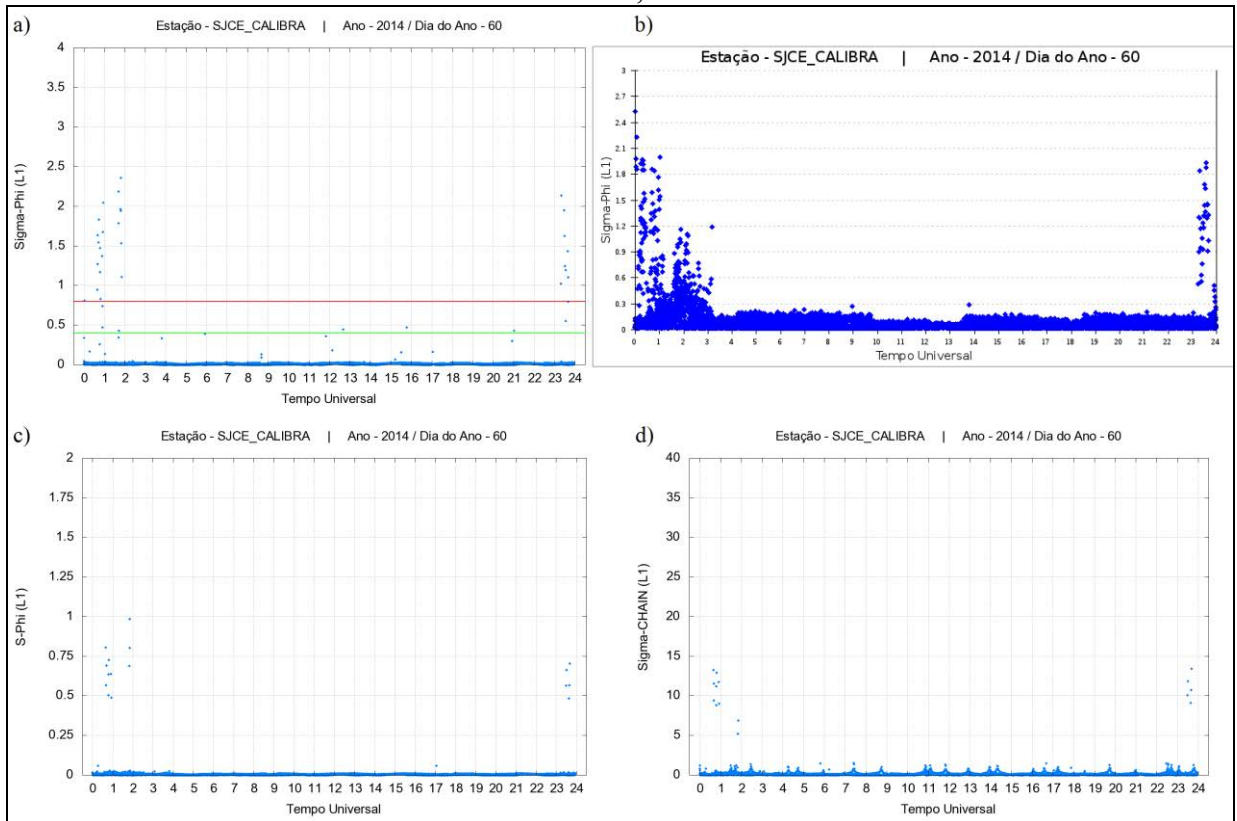


Figura 58 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 01/03/2014.

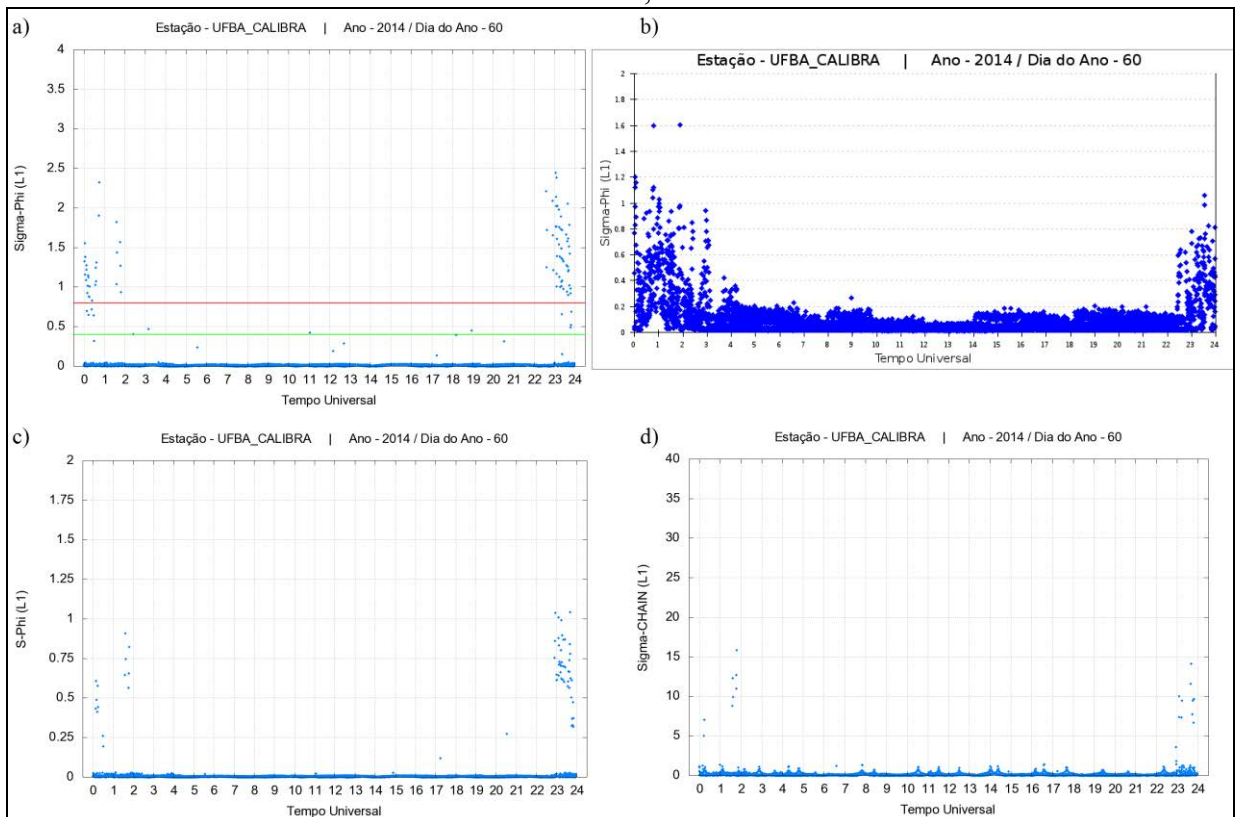


Figura 59 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 07/06/2014.

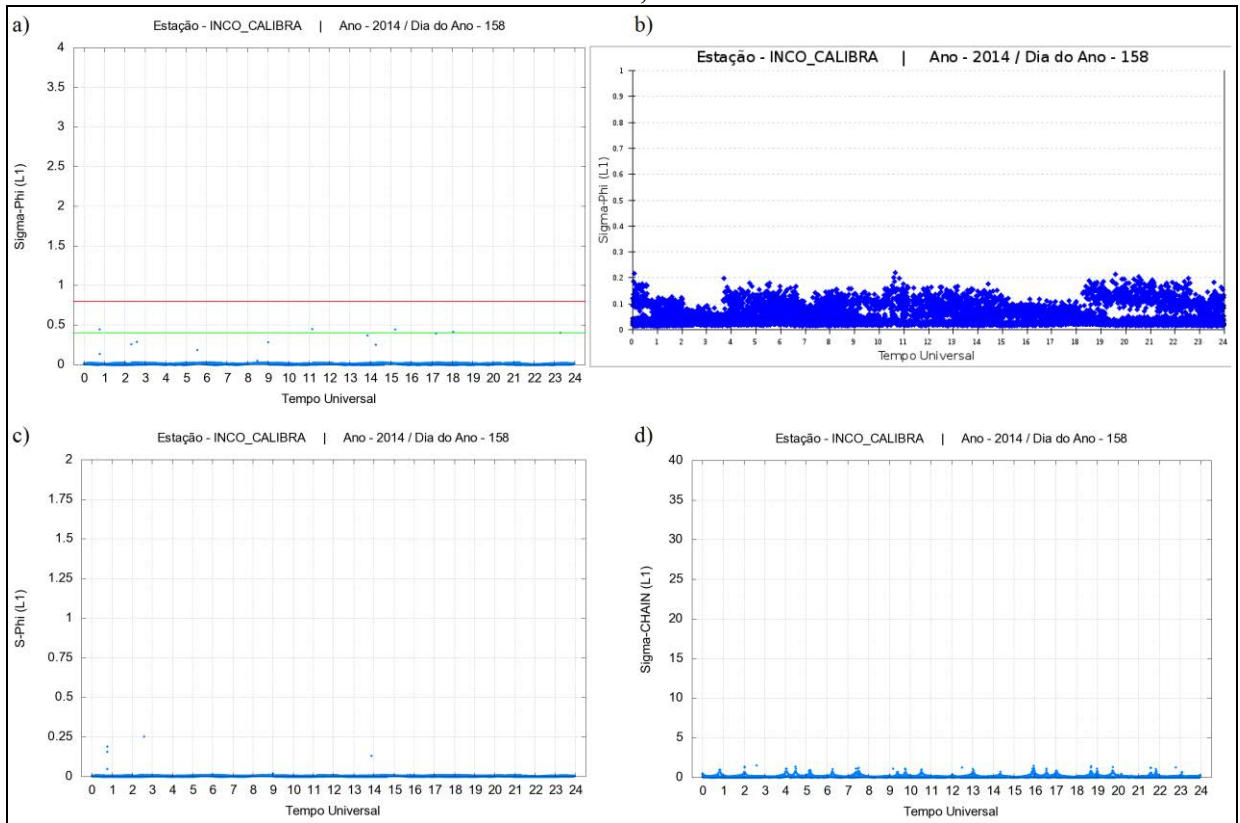


Figura 60 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 07/06/2014.

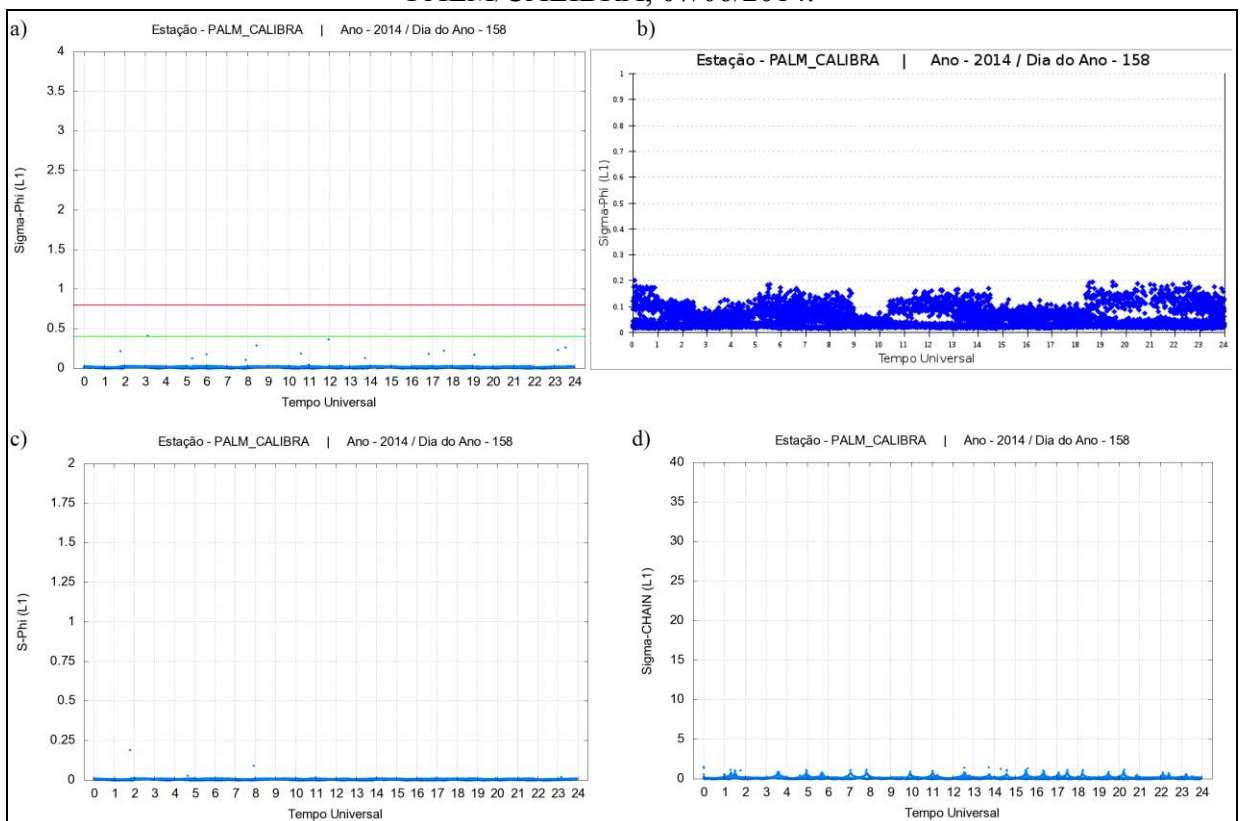


Figura 61 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 07/06/2014.

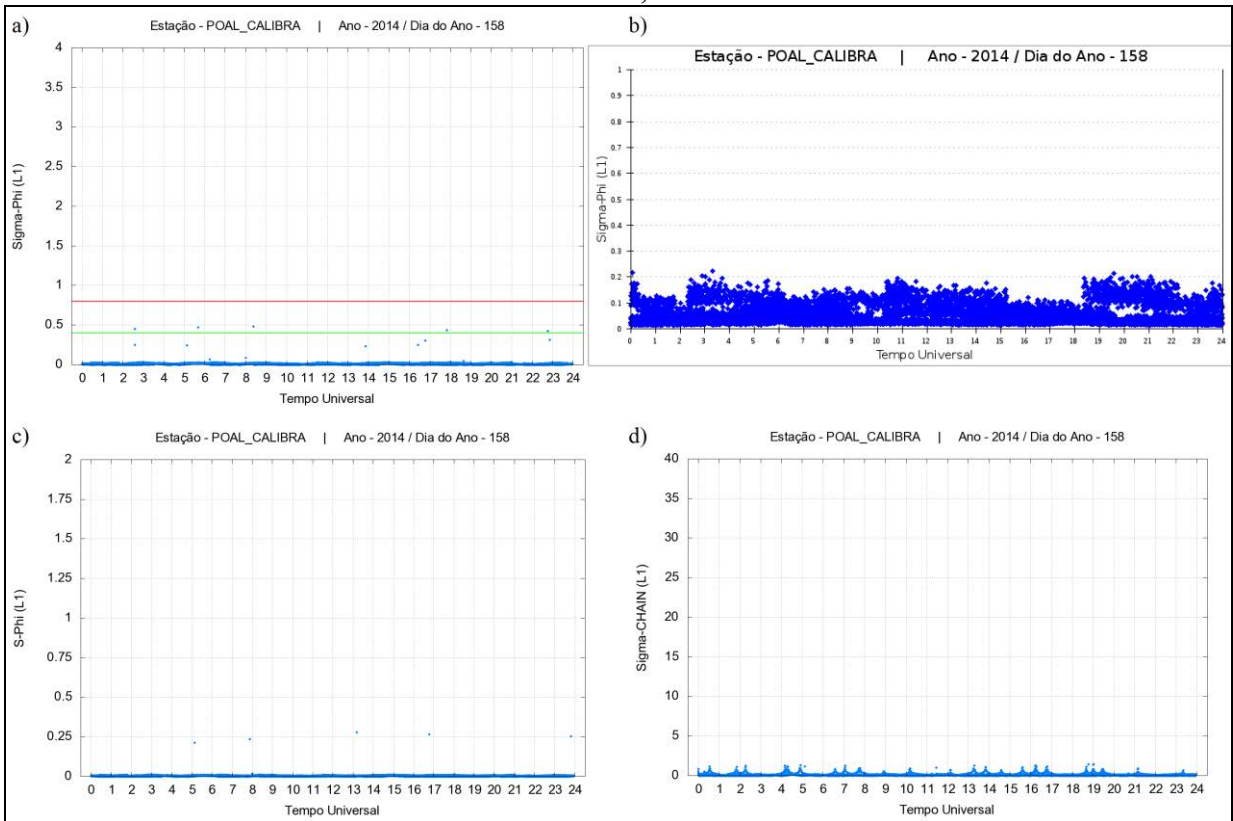


Figura 62 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 07/06/2014.

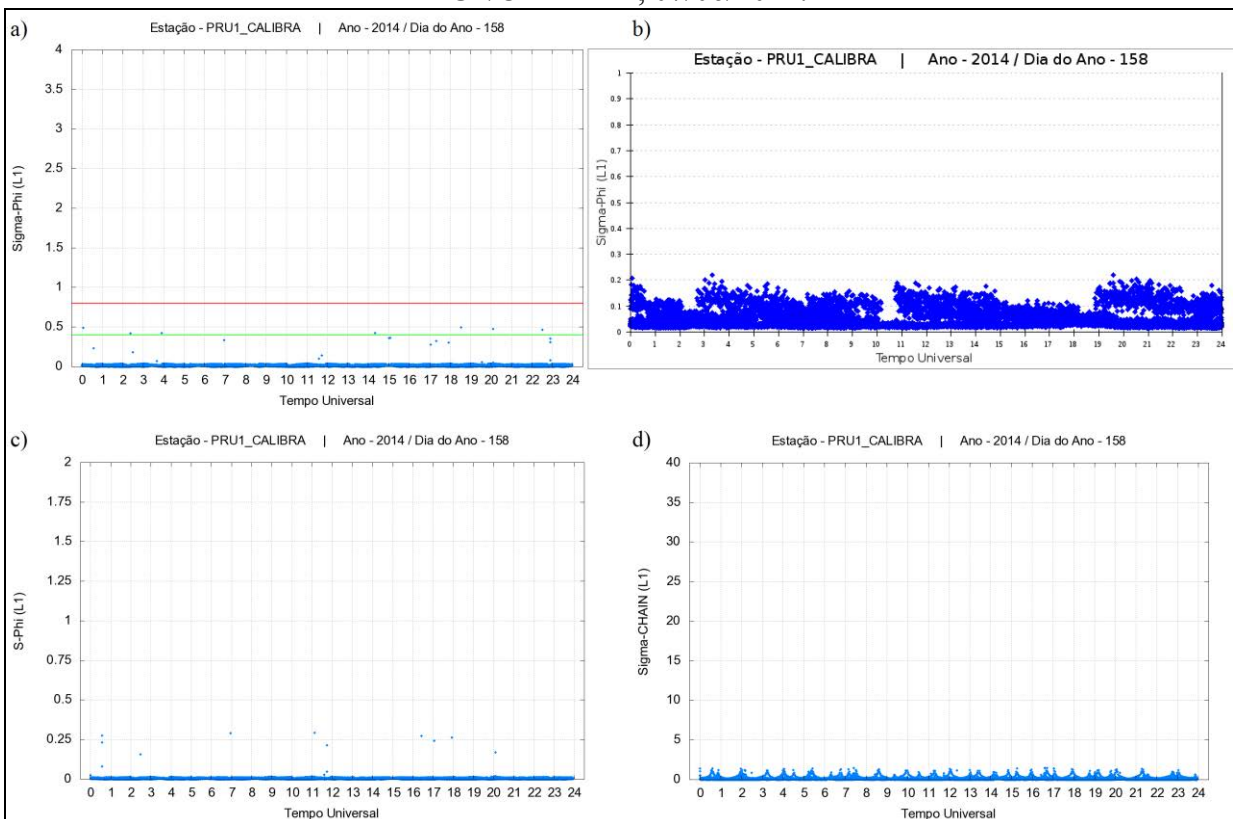


Figura 63 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 07/06/2014.

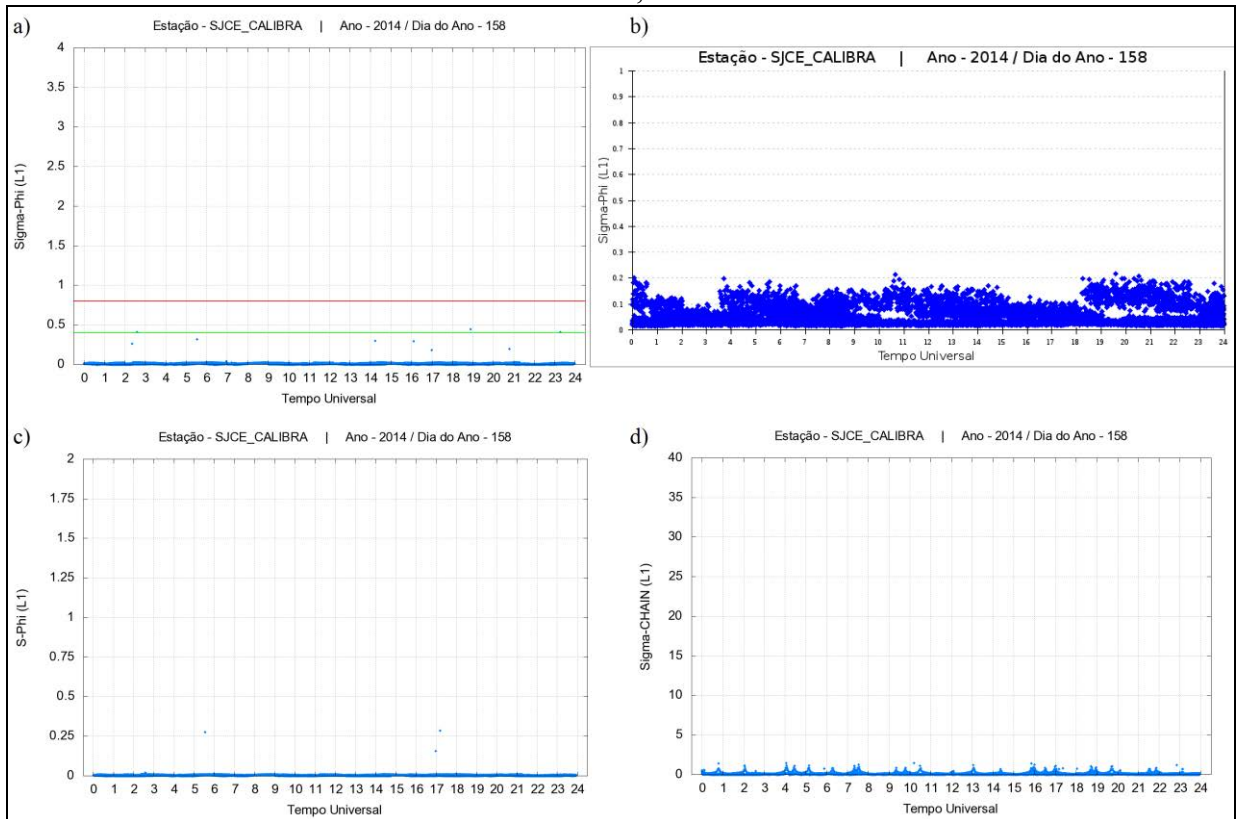
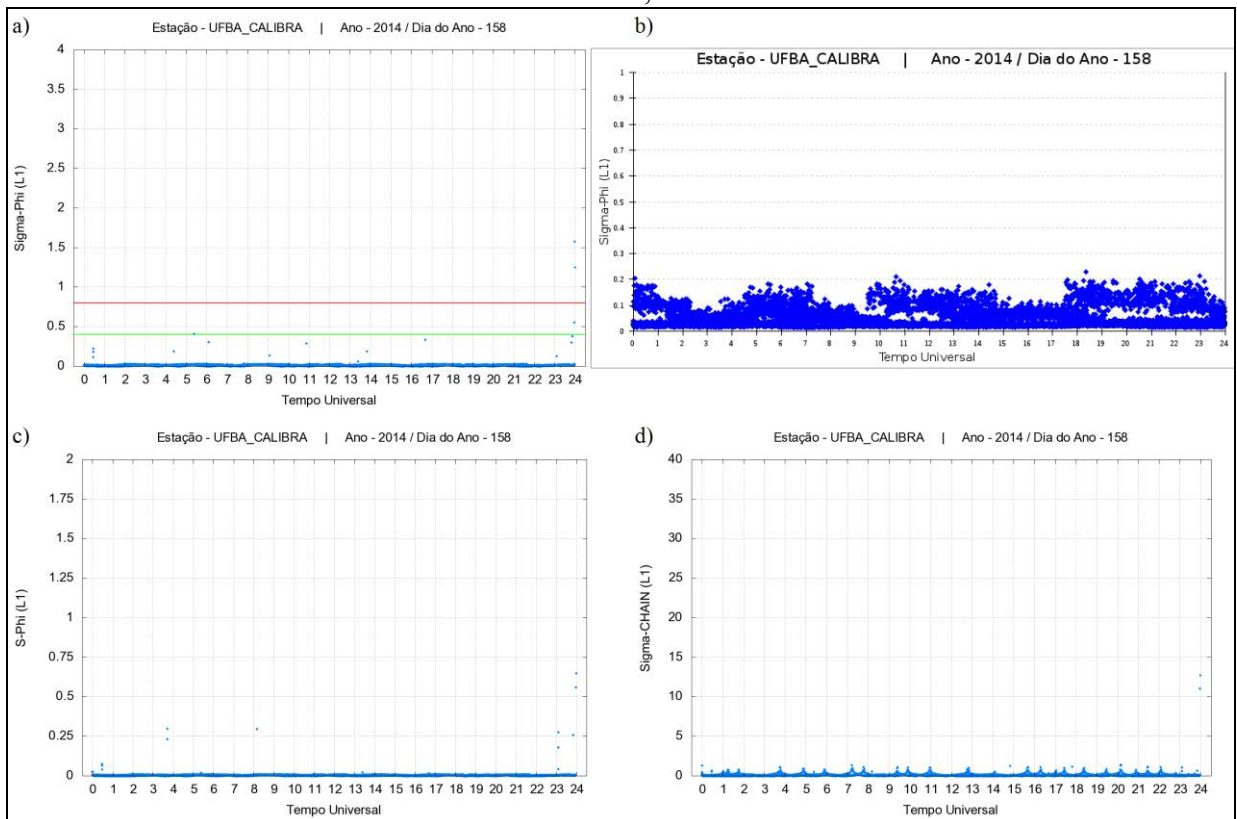


Figura 64 – Índices a)  $\sigma_{\Phi}$ , c)  $S_{\Phi}$ , d)  $\sigma_{CHAIN}$  (Ion\_Index) e b)  $\sigma_{\Phi}$  (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 07/06/2014.



Primeiramente, considerando apenas os valores do índice  $\sigma_{\phi}$  proveniente dos receptores adequados no monitoramento da ionosfera (gráfico b das Figuras 47 a 64) e os valores estimados pelo aplicativo (gráfico a das Figuras 47 a 64) verifica-se que, para ambos os períodos em questão, o comportamento dos valores foram semelhantes, isto é, na ocorrência de cintilação ionosférica os valores estimados identificaram o evento no mesmo instante e com a mesma duração que os valores conhecidos, bem como, na não ocorrência de cintilação, onde os valores estimados e conhecidos permaneceram abaixo do limiar de classificação de baixa cintilação.

As Figuras 47, 48 e 49 mostram que para as estações INCO, PALM e POAL, para o dia 28 de fevereiro de 2014, não houve cintilação dos sinais GNSS, conforme se comprova pelos gráficos de  $\sigma_{\phi}$ . Já para a região de Presidente Prudente (estação PRU1) e Salvador (estação UFBA), houve cintilação durante os últimos minutos do dia 28 de fevereiro, como se observa os picos do índice nas Figuras 50 e 52, tanto proveniente do ISMR Query Tool quanto do Ion\_Index. Essa correspondência temporal e comportamental dos valores de  $\sigma_{\phi}$  estimados e conhecidos é mais evidente se analisado gráficos das estações para o dia 1 de março de 2014 (Figuras 53 a 58). Para o período de baixa variabilidade da densidade de elétrons (7 de junho de 2014), o comportamento dos valores estimados e conhecidos também foram semelhantes (Figura 59 a 64).

Entretanto, ressalta-se para os valores de  $\sigma_{\phi}$  estimados, que foram ligeiramente diferentes daqueles fornecidos pelos receptores. Observa-se que durante a não ocorrência de cintilação ionosférica, os valores do índice  $\sigma_{\phi}$  estimados são inferiores àqueles fornecidos pela ferramenta *web*, ao contrário da situação em que ocorre cintilação, cujos valores são superiores aos considerados verdadeiros. A estação PRU1 (Figura 56), para o dia 1 de março de 2014, ilustra bem o ocorrido: os instantes e a duração do evento de cintilação são identificados, no entanto durante o período 00-04h TU os valores estimados oscilaram em torno de 3, ao passo que os valores conhecidos ficaram próximos de 1,7. Esse comportamento dos valores estimados se justifica pela metodologia aplicada para realizar o *detrending* das medidas da fase da onda portadora, bem como, devido à taxa de amostragem dos dados. No caso dos valores de  $\sigma_{\phi}$  proveniente do ISMR Query Tool, a amostragem das medidas de fase é 50 Hz, ou seja, há 50 medidas de fase a cada segundo, totalizando 3.000 medidas para determinar o desvio-padrão, além da aplicação do método de filtragem Butterworth para realizar o *detrending*. Já no Ion\_Index a amostragem é 0,067 Hz – 1 observação a cada 15 segundos – o que proporciona apenas 5 medidas para o cálculo do desvio-padrão, e o *detrending* se resume em controlar o multicaminho dos sinais, através da aplicação de uma

máscara de elevação ( $35^\circ$ ), e detectar as perdas de ciclos. Isso justifica a baixa correlação obtida, para o período de alta variabilidade da densidade eletrônica, entre o índice  $\sigma_\phi$  verdadeiro e o  $\sigma_\phi$  estimado – em média de 0,55 considerando as seis estações –, bem como, para os índices  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$  em relação à  $\sigma_\phi$  verdadeiro, 0,38 e 0,25 respectivamente. Entretanto, para o dia de baixa variabilidade da densidade de elétrons, as correlações determinadas foram elevadas, em torno de 0,76, 0,65 e 0,60 entre  $\sigma_\phi$  verdadeiro com  $\sigma_\phi$  estimado,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ , respectivamente.

Assim, a possibilidade de identificar a ocorrência de cintilação ionosférica, a duração e uma estimativa da sua intensidade a partir da utilização de medidas de fase da onda portadora de arquivos de observações pôde ser analisada e avaliada positivamente, uma vez que há concordância entre os valores, sendo que para todas as situações em que a cintilação ionosférica foi classificada como forte pelo índice conhecido, o índice estimado também apresentou a mesma classificação.

A respeito dos índices  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ , observa-se pelas Figuras 47 a 64 que os comportamentos dos mesmos foram análogos ao do índice  $\sigma_\phi$ , indicando a possibilidade da utilização desses outros índices para análises das cintilações de fase dos sinais GNSS.

### **6.3 Análise da Variação Sazonal e Ascensão e Ápice do Ciclo Solar 24 Utilizando Índices de Irregularidades e de Cintilação da Ionosfera**

Uma vez avaliadas as estimativas dos índices de irregularidades da ionosfera e dos índices de cintilações de fase dos sinais GNSS, pode-se utilizar os mesmos para diversos fins, como, por exemplo, na análise da variação sazonal, onde se pode comparar a ocorrência e o nível de intensidade das irregularidades e cintilações ionosféricas nos períodos de mínima e máxima variabilidade da densidade de elétrons por meio do monitoramento dos índices e de mapas de geovisualização.

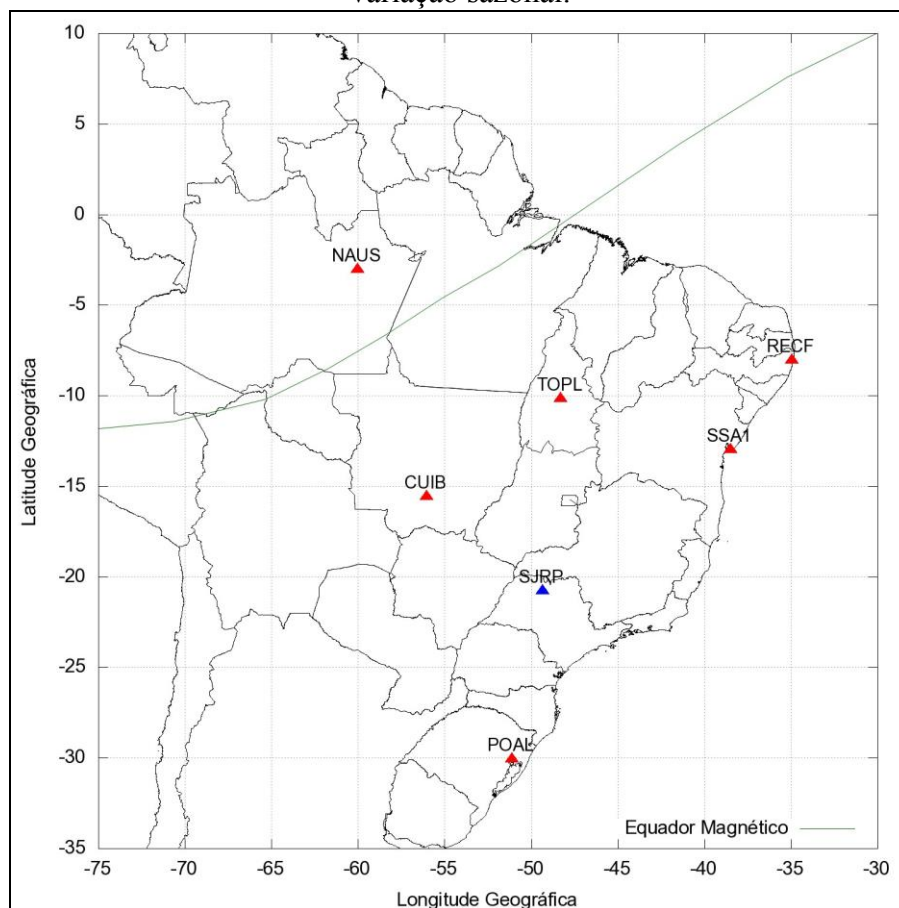
Sendo assim, foram estimados índices de irregularidades ( $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ ) e de cintilação ( $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ ) para os mesmos períodos considerados no experimento anterior, para todas as estações disponíveis das redes GNSS-SP, CALIBRA e RBMC, com ângulo de elevação de corte de  $35^\circ$ . Para fins de exemplificação, são apresentados os valores dos índices de sete estações distribuídas pelo território, sendo seis pertencentes à RBMC e uma a rede GNSS-SP (Tabela 9). A localização das estações selecionadas é apresentada na Figura 65, onde, comparando a distribuição das estações com as

regiões geográficas da ionosfera (Figura 19) verifica-se que visou contemplar a região equatorial, a região de baixas latitudes e a zona de transição entre as duas regiões.

Tabela 9 – Estações RBMC e GNSS-SP selecionadas para a análise da variação sazonal.

<b>Sigla da Estação</b>	<b>Rede</b>	<b>Município</b>	<b>UF</b>
CUIB	RBMC	Cuiabá	MT
NAUS	RBMC	Manaus	AM
POAL	RBMC	Porte Alegre	RS
RECF	RBMC	Recife	PE
SJRP	GNSS-SP	São José do Rio Preto	SP
SSA1	RBMC	Salvador	BA
TOPL	RBMC	Palmas	TO

Figura 65 – Localização das estações RBMC e GNSS-SP selecionadas para a análise da variação sazonal.



As Figuras 66 e 67 mostram os resultados dos índices para o período de máxima variabilidade da densidade de elétrons da ionosfera, 28 de fevereiro e 1 de março de 2014, e a Figura 68 os índices para o dia de baixa variação da densidade de elétrons, 7 de



junho de 2014. Ressalta-se que apenas os índices de cintilação para a portadora L1 são apresentados.

Figura 66 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$ , d)  $ROTI$ , e)  $\sigma_\phi$ , f)  $S_\phi$  e g)  $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 28/02/2014.

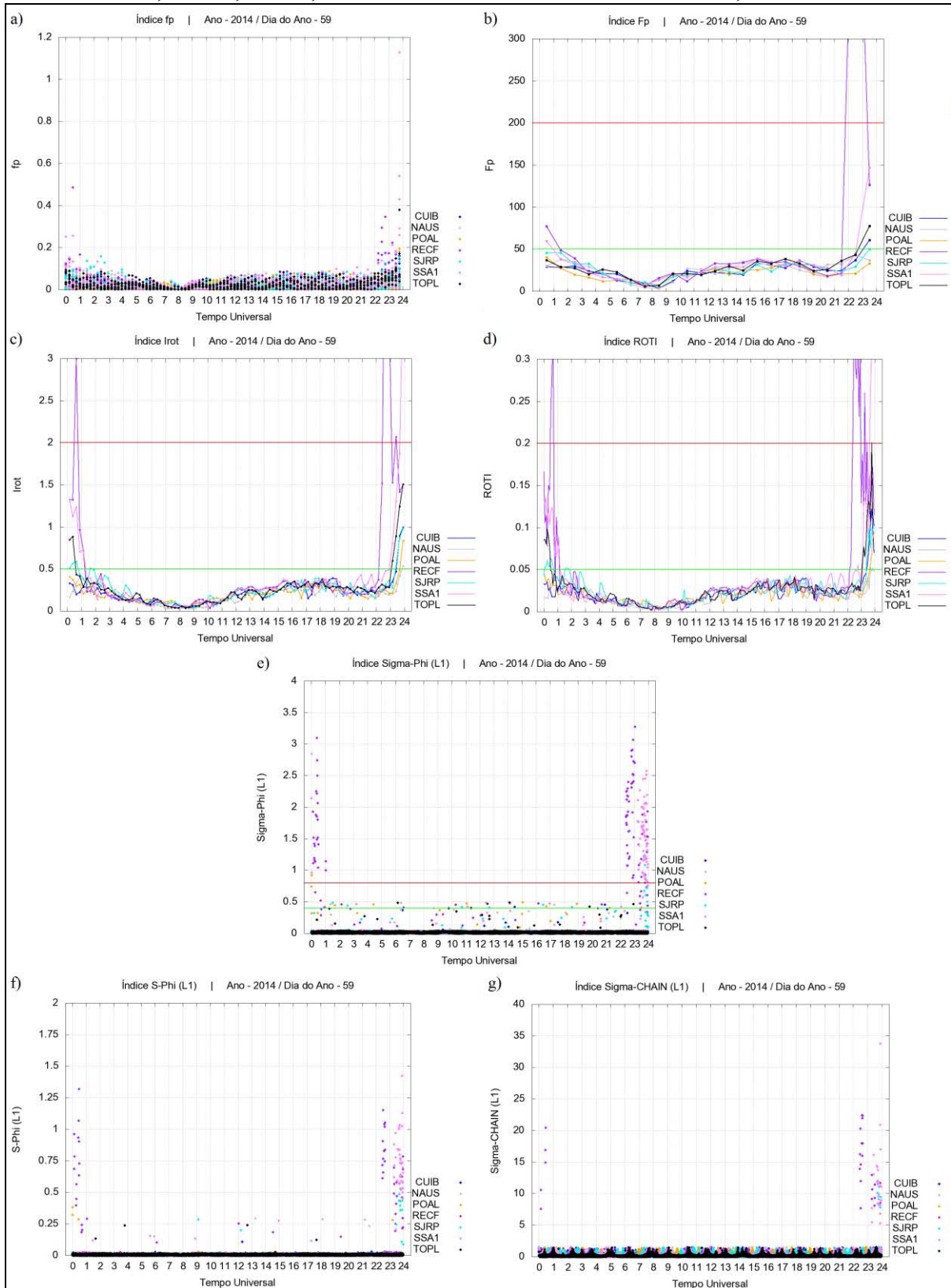


Figura 67 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$ , d)  $ROTI$ , e)  $\sigma_\phi$ , f)  $S_\phi$  e g)  $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 01/03/2014.

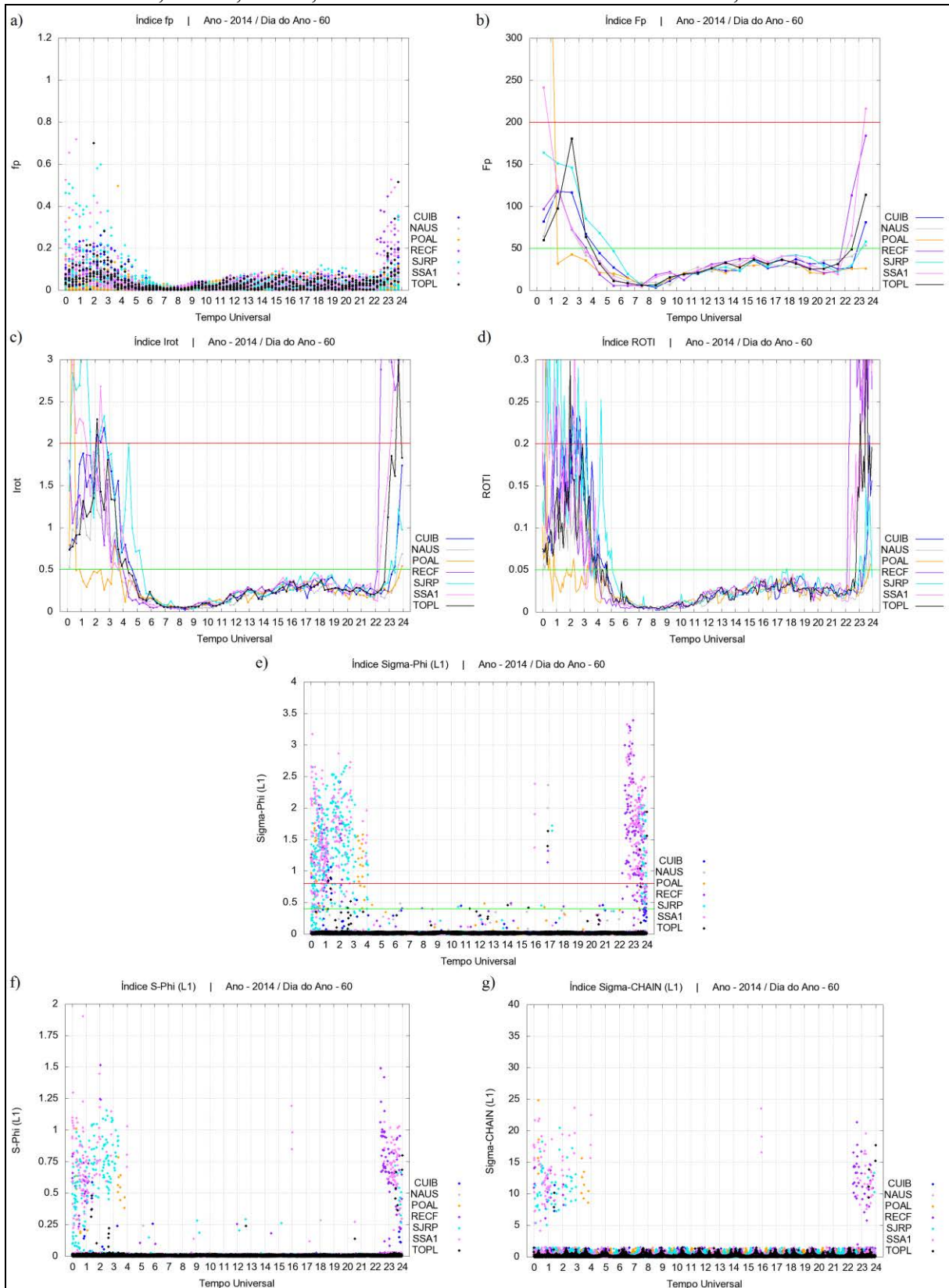
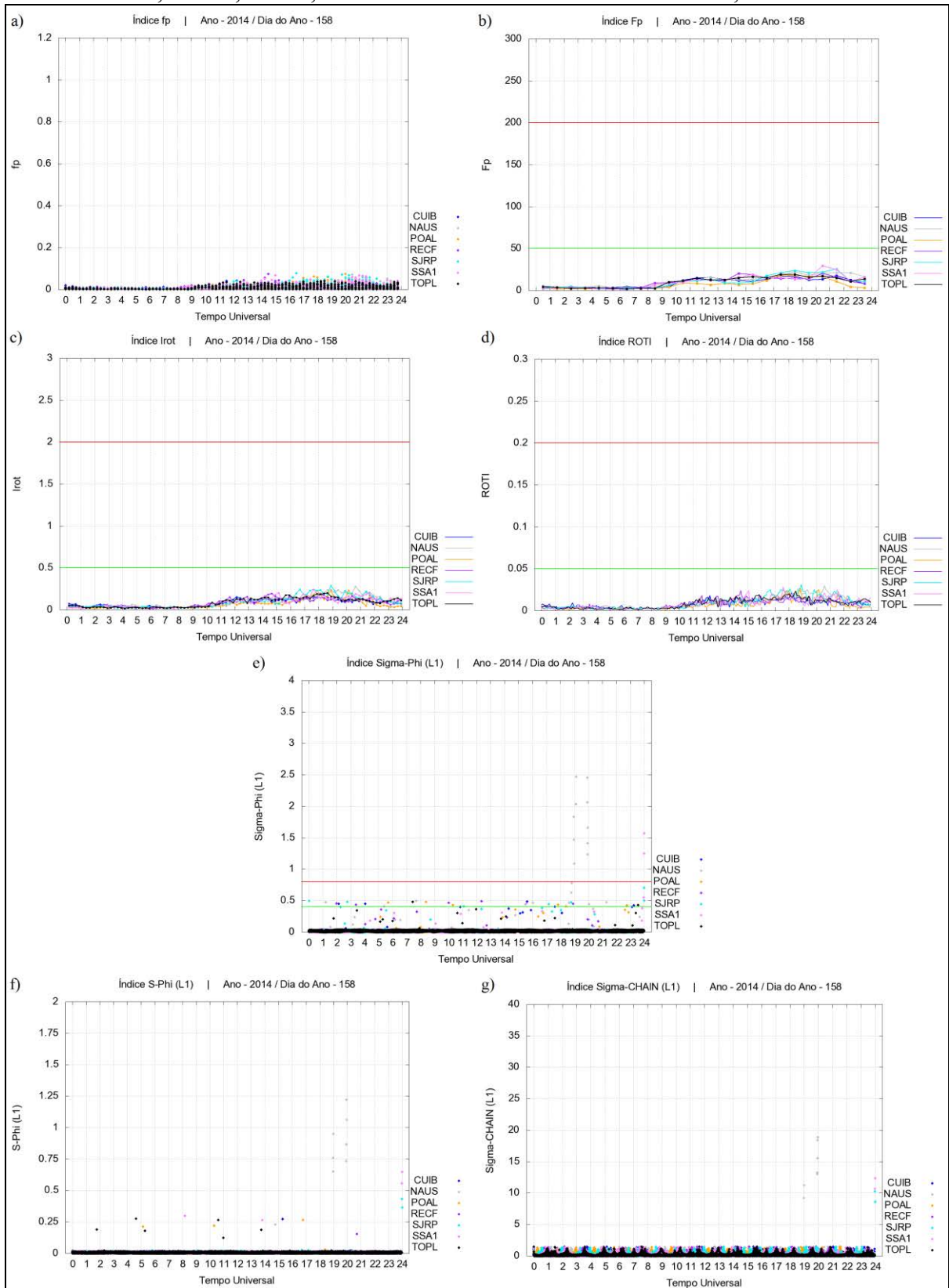


Figura 68 – Índices a)  $f_p$ , b)  $F_p$ , c)  $I_{ROT}$ , d)  $ROTI$ , e)  $\sigma_\phi$ , f)  $S_\phi$  e g)  $\sigma_{CHAIN}$ , estações CUIB, NAUS, POAL, RECF, SSA1 e TOPL/RBMC e SJRP/GNSS-SP, 07/06/2014.



De uma forma geral, observa-se pelas Figuras 66, 67 e 68 que os índices de irregularidades e de cintilação apresentaram maiores valores para o período de máxima variabilidade da densidade de elétrons (próximo ao equinócio de outono) do que para o dia de baixa variabilidade (próximo ao solstício de inverno), o que caracteriza a variação sazonal.

Durante os dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2014 os índices de irregularidades (gráficos a, b, c e d das Figuras 66 a 67) atingiram valores que classificam o nível das irregularidades de moderada a forte, com destaque para o dia 1 de março (gráficos a, b, c e d da Figura 67), onde os resultados foram mais acentuados. Em relação às cintilações ionosféricas, verifica-se que na ocorrência de moderadas e fortes irregularidades na camada ionosférica, os índices de cintilações de fase se elevaram, indicando fortes cintilações em fase nos sinais GNSS quando os mesmos se propagam através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons.

Analisando estação a estação para o dia 1 de março de 2014 (Figura 67) observa-se que RECF, SJRP e SSA1 apresentaram valores de índices, tanto de irregularidades quanto de cintilação, mais elevados que as estações CUIB, NAUS e TOPL. Isso se deve aos efeitos e comportamento geográfico da AIE, pois as estações RECF, SJRP e SSA1 estão localizadas próximas à crista sul da anomalia, entre as latitudes geomagnéticas de  $-10^\circ$  e  $-20^\circ$ , caracterizada por uma alta densidade de elétrons, ao passo que as estações CUIB, NAUS e TOPL estão próximas ao equador magnético, onde a ionização é menos intensa. A respeito da estação POAL, apesar de apresentar indícios de irregularidades e cintilação ionosférica durante as primeiras horas do dia, no geral os valores foram inferiores as demais estações, haja vista por estar localizada na região de latitudes médias e livre dos efeitos da AIE.

Em termos quantitativos do índice  $F_p$  para o dia do ano 60 observa-se que nenhuma das estações, com exceção de POAL e SSA1, apresentou valor maior que 200, o que classifica o nível das irregularidades de fraco a moderado. Entretanto, analisando os demais índices verifica-se que as irregularidades foram mais intensas, sendo classificadas em algumas regiões como fortes. Assim, deve-se novamente fazer menção as observações apresentadas na seção 6.1, onde o índice  $F_p$  retrata o nível geral de irregularidades, ao passo que os índices  $I_{ROT}$  e ROTI identificam as flutuações no sinal em pequena escala. O fato do índice  $F_p$  apresentar um valor maior que 300 para a primeira hora da estação POAL (Figura 67) se deve a um valor extrapolado de  $f_p$  durante os instantes de 15 e 20 minutos; devido o índice  $f_p$  ser baseado na mediana dos ROT's para um determinado período, o mesmo está sujeito à valores que não condizem com a realidade. Caso o valor fosse correto, provavelmente os índices  $\sigma_\phi$ ,

$S_{\Phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  acusariam uma forte cintilação para o período, com valores superiores aos índices das demais estações, sendo que, no entanto, isso não ocorreu.

Para o dia 7 de junho de 2014 todas as estações apresentaram índices de irregularidades que a classificam como fraca (gráficos a, b, c e d da Figura 68), sendo os valores de  $F_p$  menores que 50,  $I_{\text{ROT}}$  menor que 0,5 e ROTI inferior a 0,05. No entanto, para a estação NAUS, durante o período 19-20h TU, os resultados dos índices  $\sigma_{\Phi}$ ,  $S_{\Phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  indicaram a ocorrência de forte cintilação ionosférica, o que pode concluir que irregularidades ionosféricas de pequena escala e de intensidade fraca também podem provocar cintilações nos sinais GNSS.

Sobre os índices de cintilação propostos por Forte (2007) e Mushini et al. (2012) observa-se que, na ocorrência de cintilações ionosféricas detectadas a partir dos valores de  $\sigma_{\Phi}$ , os valores de  $S_{\Phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  também as identificam, no mesmo instante de ocorrência e com a mesma duração, podendo, portanto, também serem utilizados para as análises de cintilações ionosféricas. A maior consistência do índice  $S_{\Phi}$  ao se utilizar diferentes métodos de *detrending* nas observações frente ao índice  $\sigma_{\Phi}$  não pode ser analisada, uma vez que os métodos de *detrending* conhecidos não puderam ser aplicados devido à baixa amostragem das observações. Em relação ao índice  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  também não se pode analisar os seus benefícios, uma vez que o mesmo é bem aplicado para o estudo de cintilações de fase para medidas realizadas em regiões de altas latitudes.

Com o intuito de visualizar o comportamento espacial e temporal das irregularidades ionosféricas, as Figuras 70 e 71 apresentam os mapas de geovisualização do índice horário  $F_p$  para o período de alta variabilidade da densidade eletrônica (28 de fevereiro e 1 de março de 2014), e a Figura 72 para o período de baixa variabilidade (7 de junho de 2014). A sequência de apresentação dos mapas é da esquerda para a direita, de cima para baixo. Para o auxílio na interpretação do leiaute e do título dos mapas de geovisualização é apresentado na Figura 69 um mapa do índice  $F_p$ . Para a geração dos mapas foram utilizadas todas as estações disponíveis das redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC.

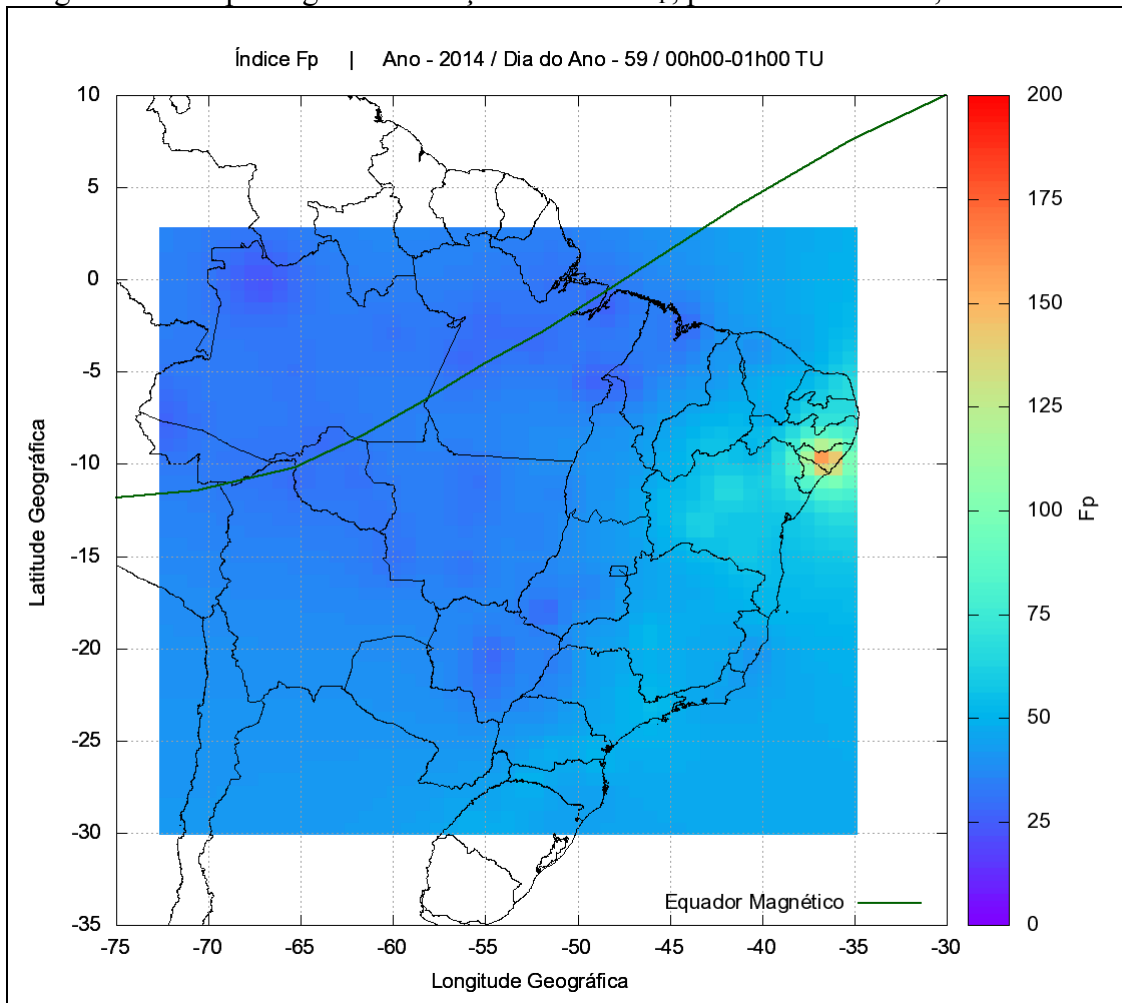
Figura 69 – Mapa de geovisualização do índice  $F_p$ , período 00-01h TU, 28/02/2014.

Figura 70 – Mapas de geovisualização do índice  $F_p$ , 28/02/2014.

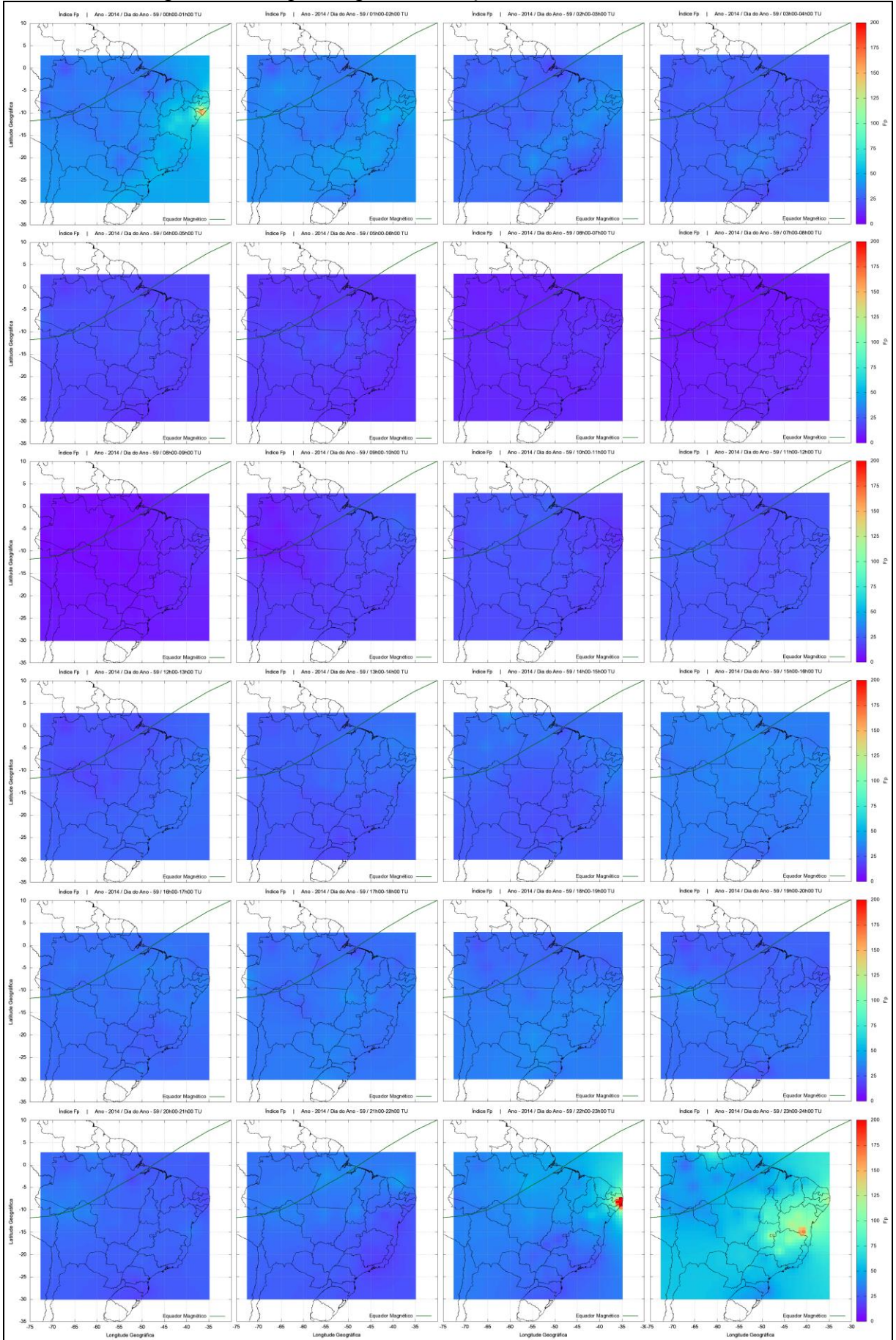


Figura 71 – Mapas de geovisualização do índice  $F_p$ , 01/03/2014.

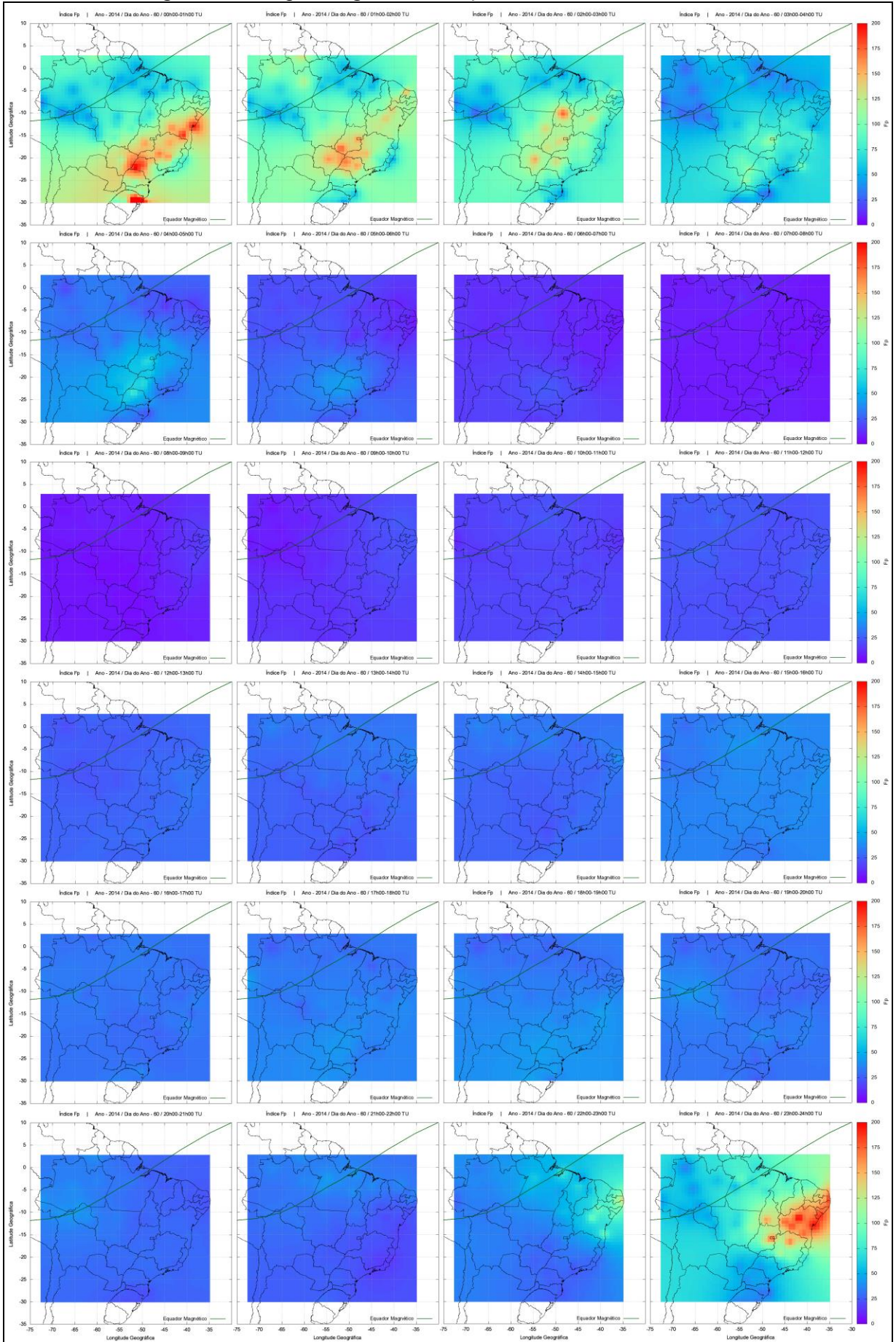
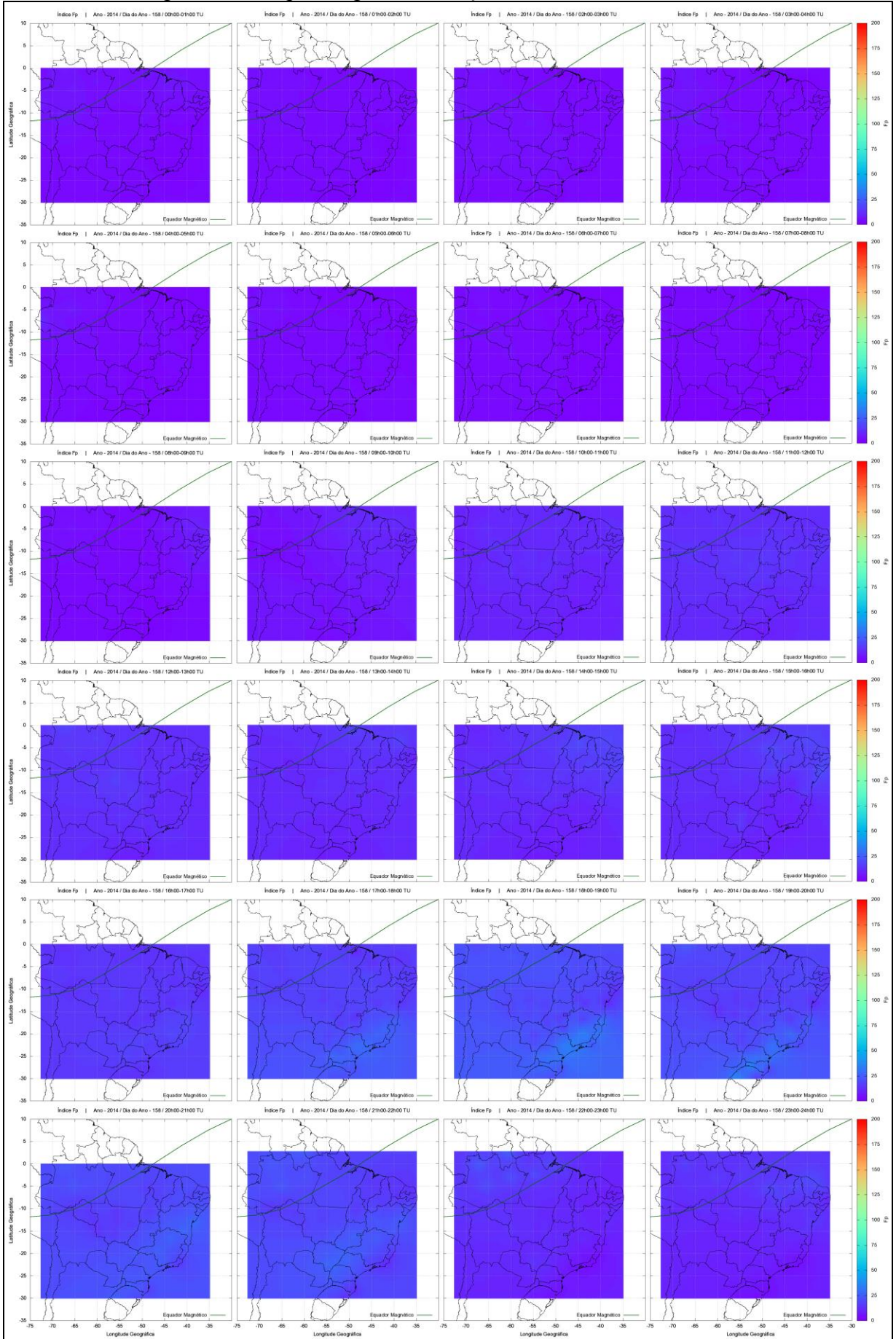




Figura 72 – Mapas de geovisualização do índice  $F_p$ , 07/06/2014.



Pela sequência de mapas horários do índice  $F_p$  para os dias do ano 59 (Figura 70) e 60 (Figura 71) observa-se o deslocamento espacial e temporal das gerações das irregularidades ionosféricas sobre o território brasileiro, tendo início após o por do Sol, por volta das 22h TU (19h hora local) e término às 5h TU (2h hora local), deslocando-se de leste para oeste, ao sul do equador magnético, atingindo principalmente os estados das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. A ocorrência das irregularidades ionosféricas para esse período de dias está estritamente relacionada ao comportamento da AIE.

Por meio da Figura 72 não se observa a presença de irregularidades da ionosfera sobre o Brasil, pois, conforme já salientado, deve-se a um período de baixa densidade de elétrons. Estes dois cenários distintos de ocorrência e não ocorrência de irregularidades da ionosfera para um período próximo ao equinócio de outono e outro próximo ao solstício de inverno é uma das formas de se caracterizar a variação sazonal.

Uma das desvantagens em relação ao uso do índice  $F_p$  no monitoramento das irregularidades da ionosfera se dá pela resolução temporal do mesmo, uma hora, impossibilitando um acompanhamento mais acurado das irregularidades. Utilizando os índices  $f_p$ , ROTI e  $I_{ROT}$  pode-se obter uma melhor compreensão da evolução das irregularidades devido ao menor intervalo de tempo para obtenções dos índices (15 minutos para o  $f_p$  e  $I_{ROT}$  e 5 minutos para o ROTI). Nesse sentido são apresentados nas Figuras 73, 74 e 75 os mapas de geovisualização dos índices supracitados para o período 22-24h TU do dia 1 de março de 2014, caracterizado pela ocorrência dos maiores níveis de irregularidades da ionosfera. O leiaute e a sequência de apresentação dos mapas são análogos ao do índice  $F_p$ .

Figura 73 – Mapas de geovisualização do índice  $f_p$ , período 22-24h TU, 01/03/2014.

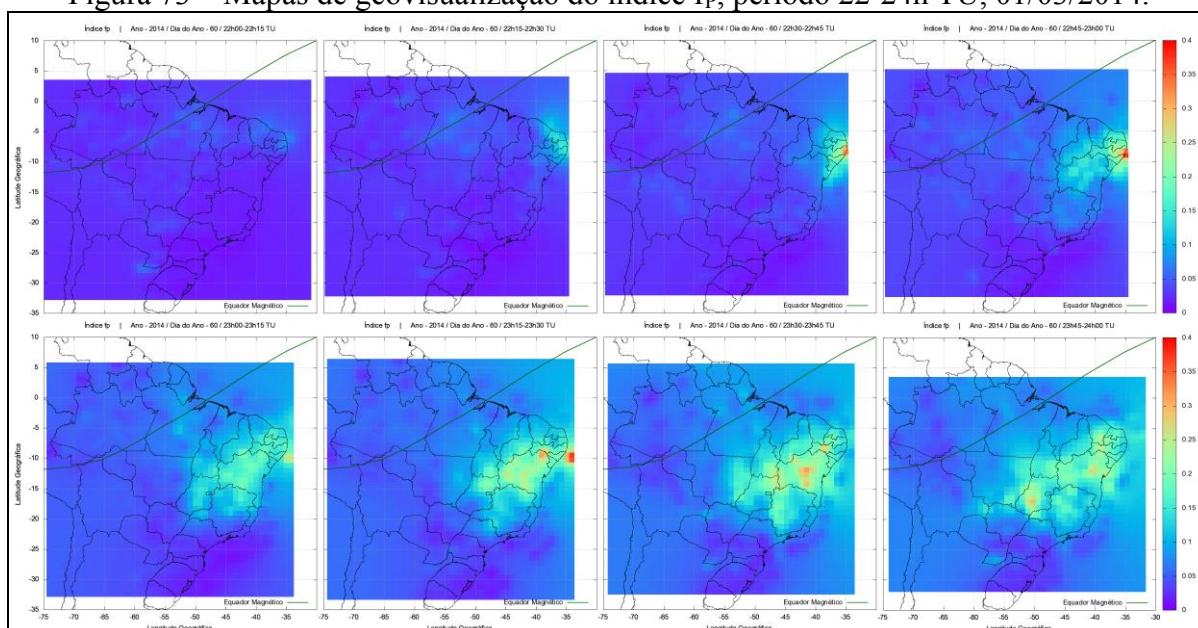


Figura 74 – Mapas de geovisualização do índice ROTI, período 22-24h TU, 01/03/2014.

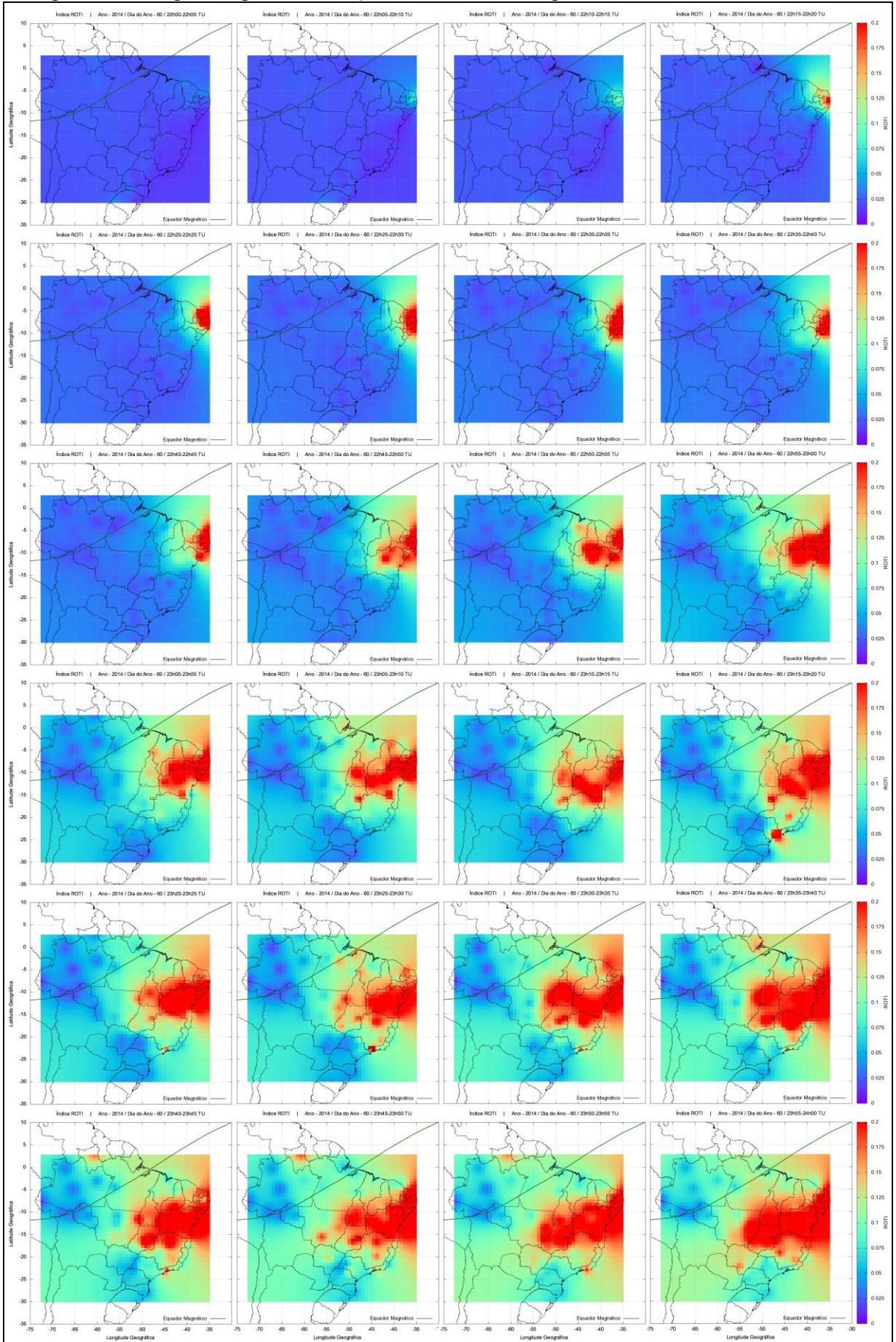
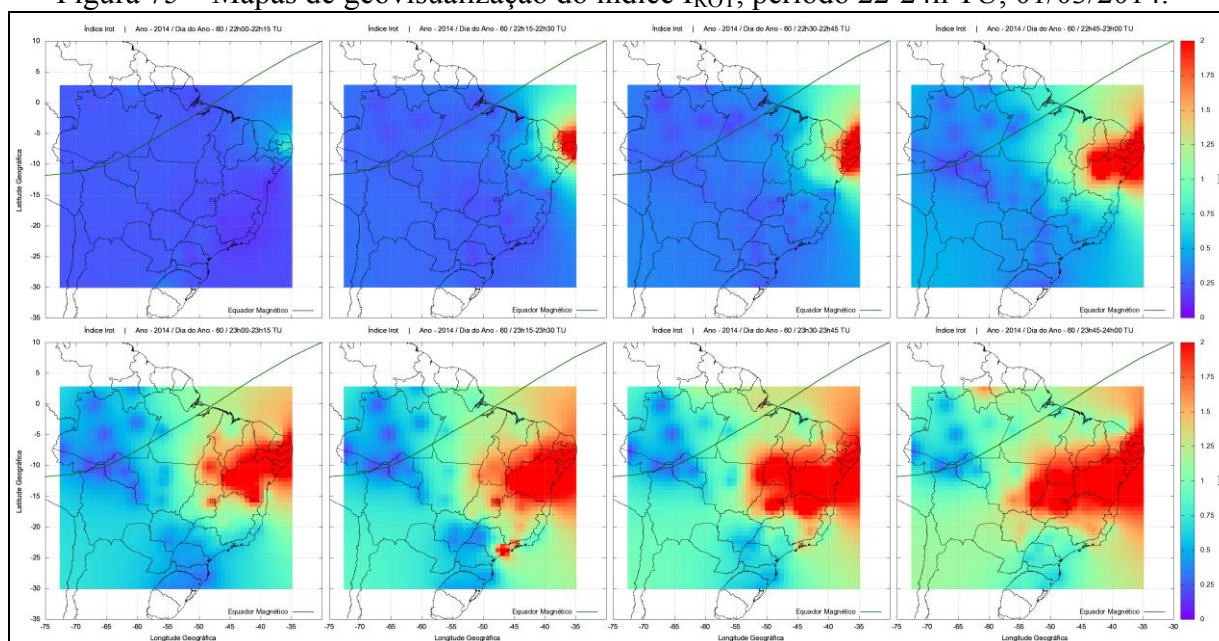


Figura 75 – Mapas de geovisualização do índice  $I_{ROT}$ , período 22-24h TU, 01/03/2014.

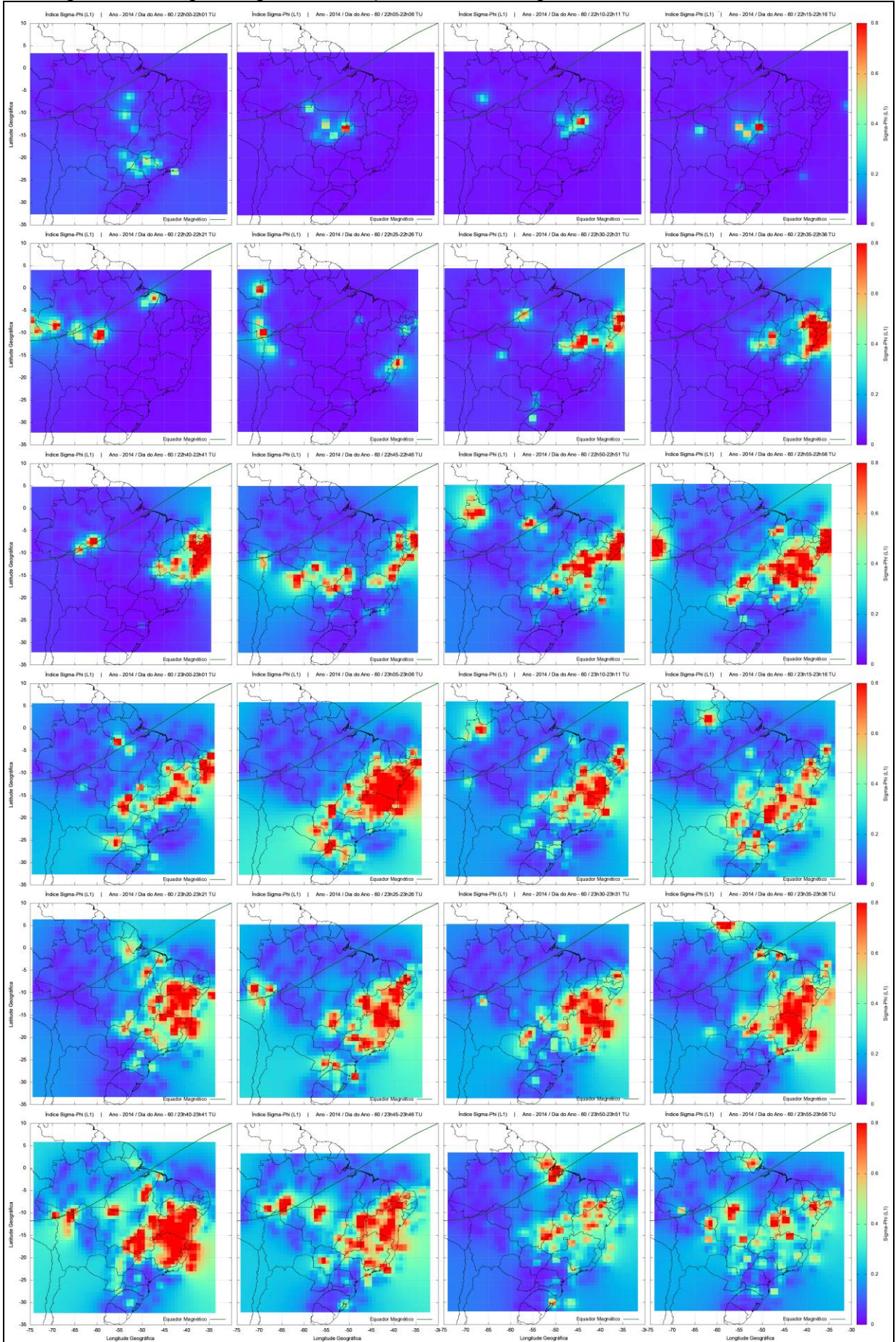


Os mapas do índice  $f_p$  (Figura 73), de 15 em 15 minutos, possibilitam uma melhor compreensão geográfica das irregularidades da ionosfera pois, diferentemente dos índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  cujos valores são mapeados para a localização da estação, os valores de  $f_p$  são determinados nas posições dos IPP's, o que permite a identificação da área de abrangência das irregularidades da ionosfera. Dependendo do ângulo da máscara de elevação dos satélites, pode-se mostrar a ocorrência das irregularidades ionosféricas tanto ao sul do equador magnético quanto ao norte do mesmo, bem como, sobre a costa oceânica brasileira, região essa pouco explorada em termos ionosféricos devido à escassez de dados. Analisando a Figura 73 para o período 23h45min a 24h TU observa-se que as irregularidades atingiram uma área ao sul do equador magnético de, aproximadamente, quatro milhões de quilômetros quadrados, com uma extensão longitudinal máxima de 2.350 km e latitudinal de 1.800 km.

Já os mapas do índice  $ROTI$  (Figura 74) possibilitam uma melhor compreensão temporal das irregularidades, devido a resolução temporal ser de apenas cinco minutos. Assim, cada mapa dos índices de irregularidades da ionosfera possui as suas peculiaridades, sendo o uso de cada um deles recomendado de acordo com os objetivos que se pretendem atingir.

Em relação às cintilações ionosféricas de fase foram elaborados mapas de geovisualização do índice  $\sigma_\phi$  para período em que os níveis de irregularidades foram elevados, ou seja, 22-24h TU do dia 1 de março de 2014, utilizando todas as estações disponíveis das redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC. A Figura 76 apresenta os mapas para a portadora L1, onde foi considerada uma máscara de elevação de  $35^\circ$ .

Figura 76 – Mapas de geovisualização do índice  $\sigma_{\Phi}$ , período 22-24h TU, 01/03/2014.



Cada mapa da Figura 76 possui uma resolução temporal de um minuto, sendo o intervalo entre os mapas de cinco minutos. Comparando a Figura 76 com as Figuras 73, 74 e 75 se nota a correspondência entre as ocorrências das irregularidades com os eventos de cintilação ionosférica. É possível identificar os locais em que as cintilações foram mais fortes, tanto sobre o território quanto sobre a região costeira. Não foram mostrados os mapas de geovisualização dos índices  $S_{\Phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  devido à semelhança com os mapas de  $\sigma_{\Phi}$ .

O monitoramento das irregularidades e cintilações da ionosfera a partir de índices e mapas de geovisualização se mostrou uma ferramenta válida, que por sua vez pode ser utilizada no desenvolvimento de modelos/algoritmos para minimizar os efeitos da ionosfera, principalmente em técnicas de posicionamento, seja em tempo real ou pós-processado.

Além da análise da variação sazonal foi realizado, também, um experimento visando identificar as influências de dois períodos distintos do ciclo solar 24 sobre as irregularidades ionosféricas. Trata-se dos momentos de ascensão e ápice do ciclo solar.

Com base na Figura 14 tem-se o número de manchas solares do final do ciclo 23 e início do ciclo 24. Observa-se que o ciclo 24 iniciou-se na virada de 2008 para 2009, onde o número de manchas foi extremamente baixo, tendo uma ascensão entre os anos de 2010 e 2012 e atingindo o ápice em 2013-2014-2015. De acordo com modelos de previsões, nos próximos anos haverá o declínio do ciclo. Sendo assim, foram gerados pelo aplicativo índices de irregularidades da ionosfera para todas as estações da RBMC disponíveis para os dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2010, período esse sob os efeitos da ascensão do ciclo solar 24. Não foram consideradas as estações das redes CALIBRA e GNSS-SP devido a não disponibilidade dos arquivos RINEX de observações das estações da rede paulista no FTP e a não implantação das estações CALIBRA no presente período.

Todos os valores dos índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{\text{ROT}}$  e  $\text{ROTI}$  obtidos para o período foram inferiores aos limiares de classificação de baixo níveis de irregularidades, mesmo sendo um período próximo ao equinócio de outono, onde há uma maior densidade de elétrons na ionosfera devido a variação sazonal. Para fins de exemplificação as Figuras 77 e 78 apresentam os mapas de geovisualização do índice  $F_p$  para os dias em questão.

Figura 77 – Mapas de geovisualização do índice  $F_p$ , 28/02/2010.

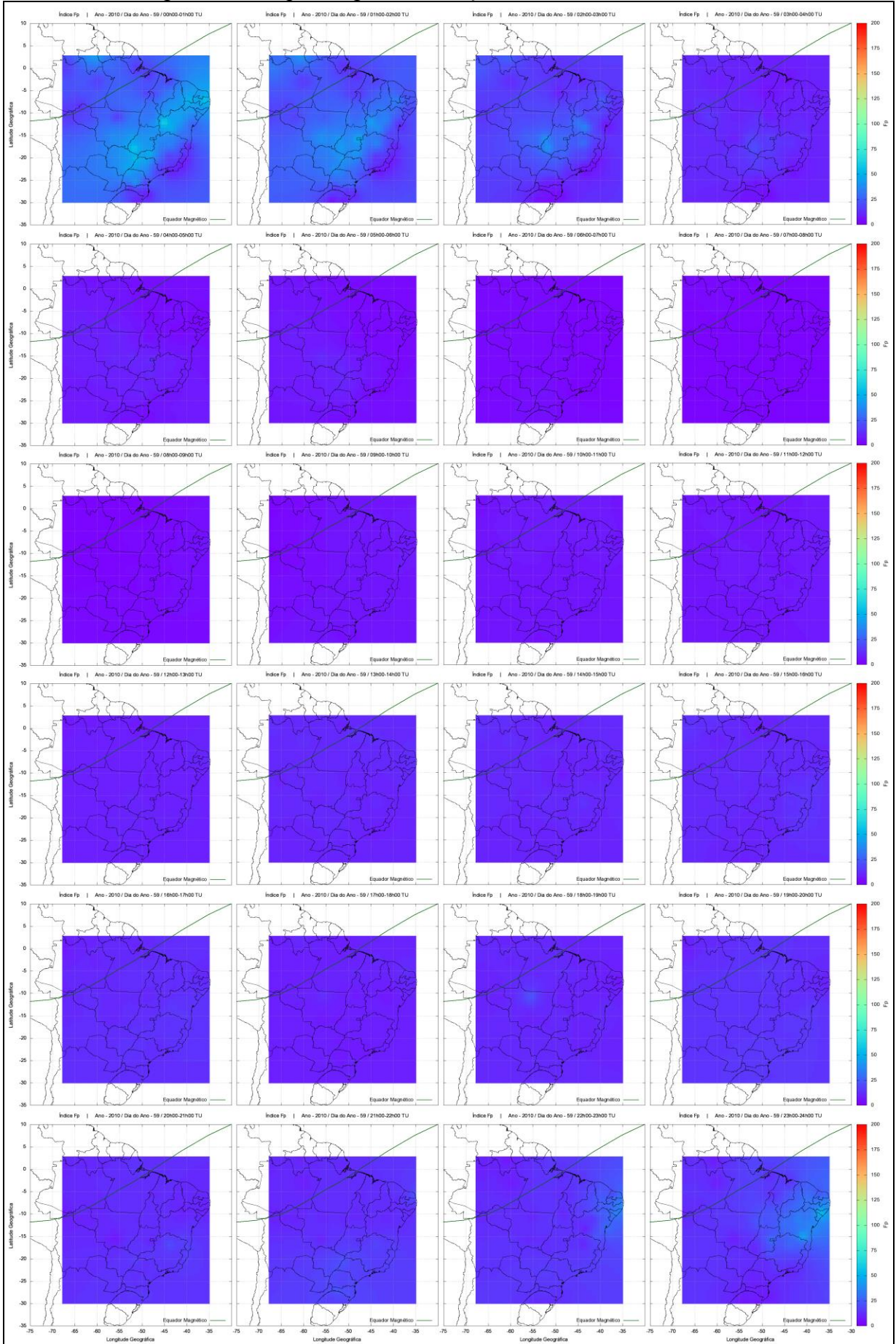
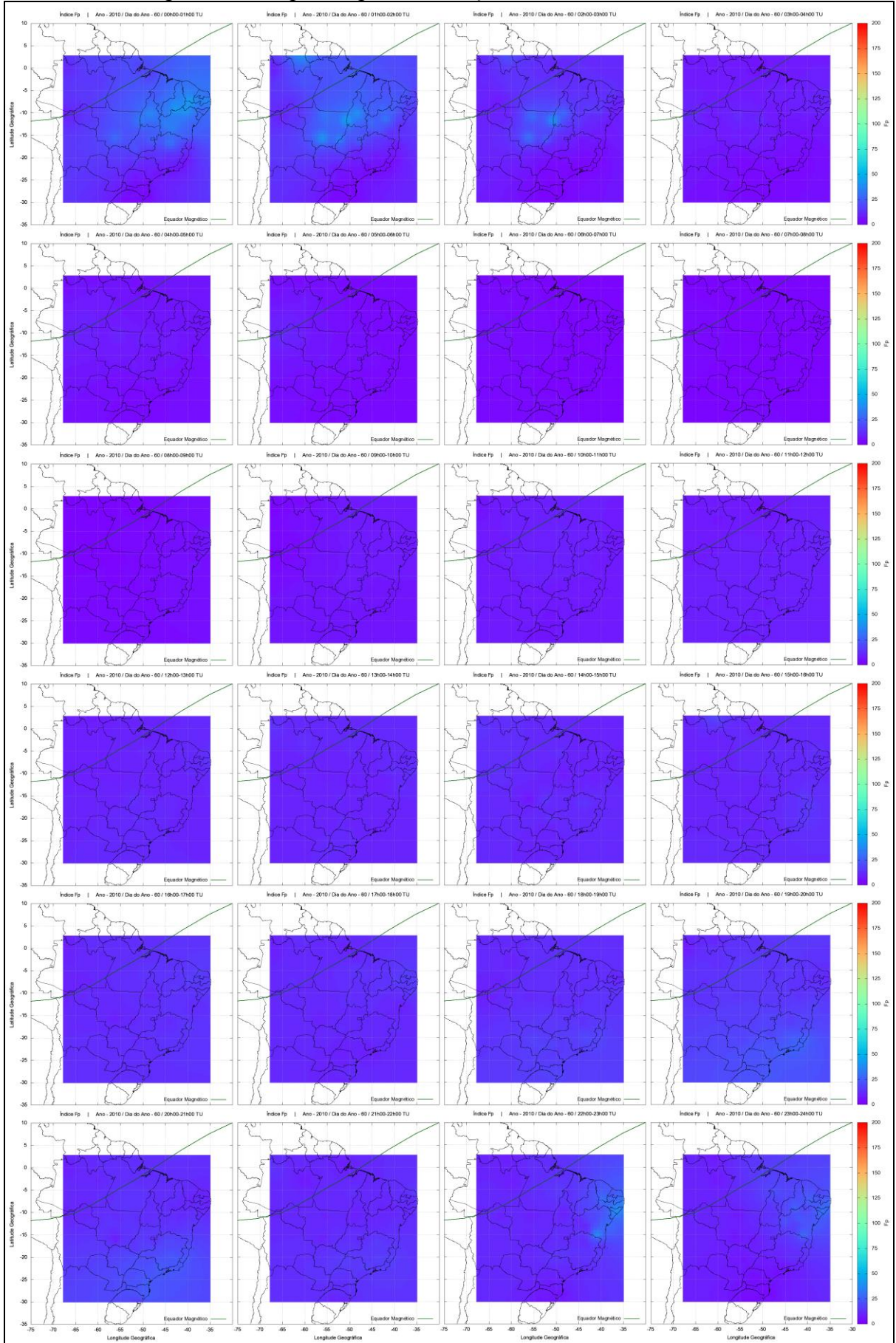


Figura 78 – Mapas de geovisualização do índice  $F_p$ , 01/03/2010.





Comparando os mapas das Figuras 77 e 78 com os mapas dos dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2014 (Figuras 70 e 71) repara-se que os níveis de irregularidades da ionosfera foram mais elevados no ano de 2014, devido ser o período de ápice do ciclo, onde as atividades solares são mais intensas, o que reflete numa maior ionização da camada ionosférica. O comportamento distinto entre esses dois períodos caracteriza os efeitos dos momentos de ascensão e ápice do ciclo solar 24.

#### 6.4 Monitoramento das Irregularidades e Cintilação da Ionosfera em Tempo Real

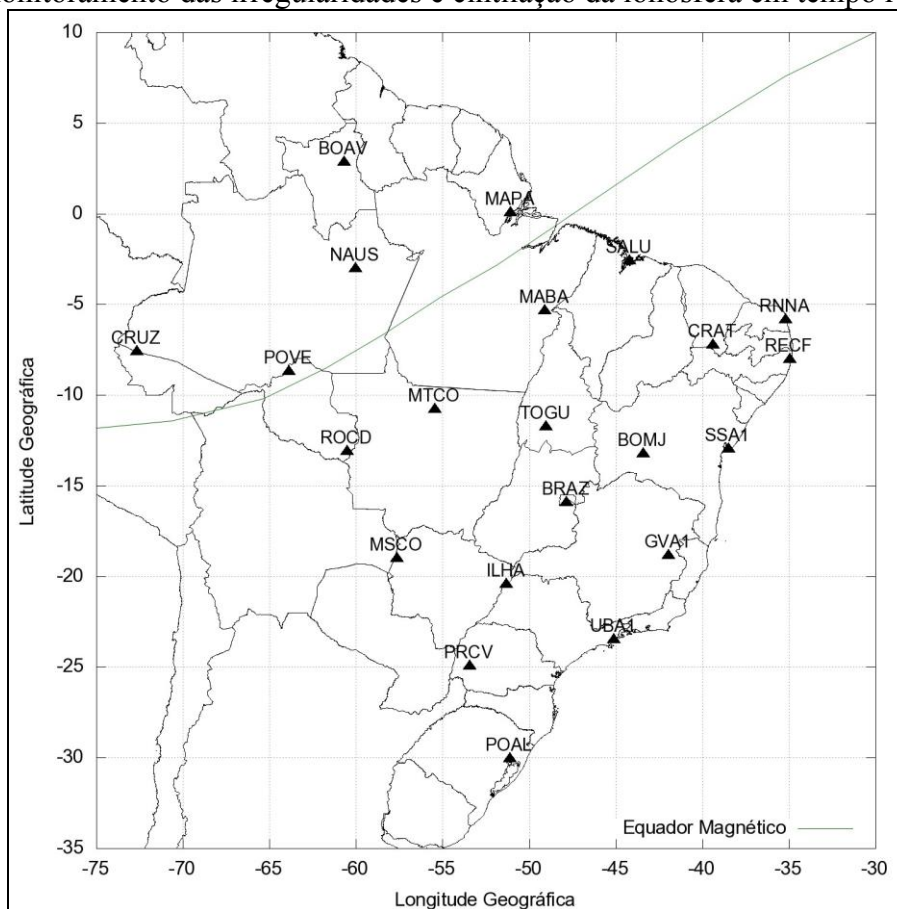
O monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real foi realizado utilizando o executável Ion\_Index\_TR, para o período de 20 a 26 de dezembro de 2014, período esse caracterizado por altas taxas de variabilidade da densidade de elétrons devido ao solstício de verão no hemisfério sul.

No experimento foram utilizadas 22 estações, sendo as mesmas estrategicamente selecionadas de modo a cobrir todo o território brasileiro, conforme podem ser consultadas na Tabela 10 e visualizadas na Figura 79.

Tabela 10 – Estações RBMC-IP e GNSS-SP-IP selecionadas para o monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real.

<b>Sigla da Estação</b>	<b>Rede</b>	<b>Município</b>	<b>UF</b>
BOAV	RBMC-IP	Boa Vista	RR
BOMJ	RBMC-IP	Bom Jesus da Lapa	BA
BRAZ	RBMC-IP	Brasília	DF
CRAT	RBMC-IP	Crato	CE
CRUZ	RBMC-IP	Cruzeiro do Sul	AC
GVA1	RBMC-IP	Governador Valadares	MG
ILHA	GNSS-SP-IP	Ilha Solteira	SP
MABA	RBMC-IP	Marabá	PA
MAPA	RBMC-IP	Macapá	AP
MSCO	RBMC-IP	Corumbá	MS
MTCO	RBMC-IP	Colider	MT
NAUS	RBMC-IP	Manaus	AM
POAL	RBMC-IP	Porto Alegre	RS
POVE	RBMC-IP	Porto Velho	RO
PRCV	RBMC-IP	Cascavel	PR
RECF	RBMC-IP	Recife	PE
RNNA	RBMC-IP	Natal	RN
ROCD	RBMC-IP	Colorado d'Oeste	RO
SALU	RBMC-IP	São Luís	MA
SSA1	RBMC-IP	Salvador	BA
TOGU	RBMC-IP	Gurupi	TO
UBA1	GNSS-SP-IP	Ubatuba	SP

Figura 79 – Localização das estações RBMC-IP e GNSS-SP-IP selecionadas para o monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real.



As irregularidades ionosféricas foram monitoradas por meio dos índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ , e as cintilações pelos índices  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ . Como o aplicativo permite o processamento de apenas um índice por vez, foi estabelecida a seguinte ordem de execução:

- 20 de dezembro de 2014 (dia do ano 354): índice  $f_p$ ;
- 21 de dezembro de 2014 (dia do ano 355): índice  $F_p$ ;
- 22 de dezembro de 2014 (dia do ano 356): índice  $I_{ROT}$ ;
- 23 de dezembro de 2014 (dia do ano 357): índice  $ROTI$ ;
- 24 de dezembro de 2014 (dia do ano 358): índice  $\sigma_\phi$ ;
- 25 de dezembro de 2014 (dia do ano 359): índice  $S_\phi$ ; e
- 26 de dezembro de 2014 (dia do ano 360): índice  $\sigma_{CHAIN}$ .

Para cada um dos índices foram gravados vídeos de execução do aplicativo, que se encontram disponíveis no *website* do GEGE ([gege.fct.unesp.br](http://gege.fct.unesp.br)), aba “Softwares – Download”. Geralmente as gravações se iniciaram em torno das 22h TU (20h hora local –

horário brasileiro de verão) e tiveram um tempo de duração em torno de 1 hora e 30 minutos. Salienta-se a utilização de uma máscara de elevação de 35°.

Para fins de exemplificação são apresentados nas Figuras 80 a 86, letra a, instantes da visualização em tempo real em que ocorreram fortes irregularidades e cintilações ionosféricas a partir dos índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$ ,  $ROTI$ ,  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ , respectivamente. Com intuito de analisar a eficiência do modo tempo real do aplicativo, foram estimados para cada um dos índices e seus respectivos dias os valores e mapas de geovisualização no modo pós-processado, considerando as mesmas estações da Tabela 10 e máscara de elevação de 35°. As Figuras 80 a 86, letra b, apresentam os mapas de geovisualização dos índices relacionados aos instantes selecionados nas Figuras 80 a 86, letra a.

Figura 80 – Geovisualização do índice  $f_p$ , 20/12/2014, a) tempo real (22h42min12s TU) e b) pós-processado (período 22h30min-22h45min TU).

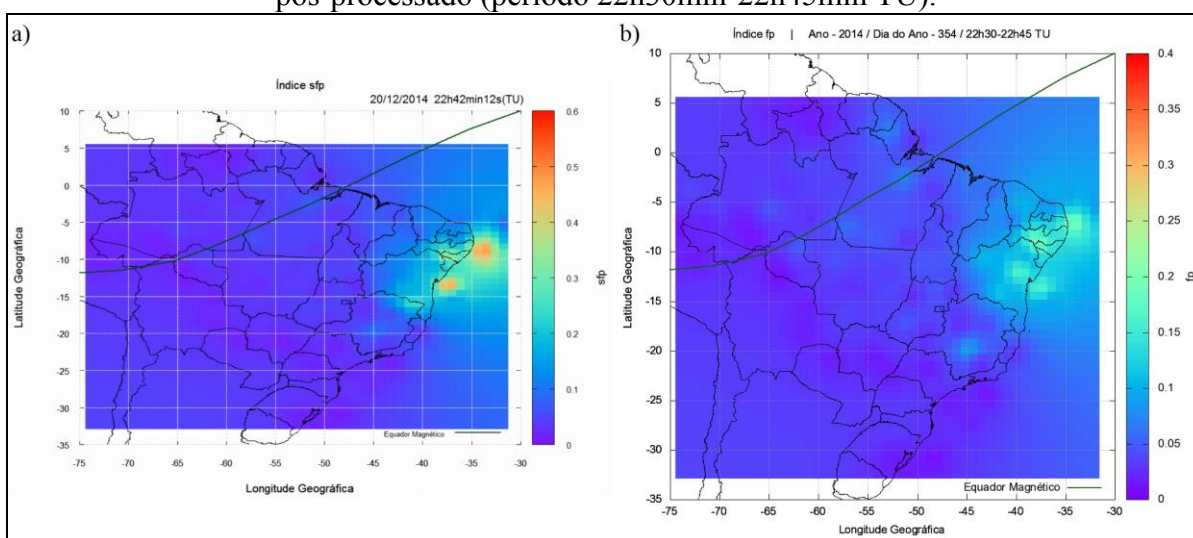


Figura 81 – Geovisualização do índice  $F_p$ , 21/12/2014, a) tempo real (23h29min55s TU) e b) pós-processado (período 23-24h TU).

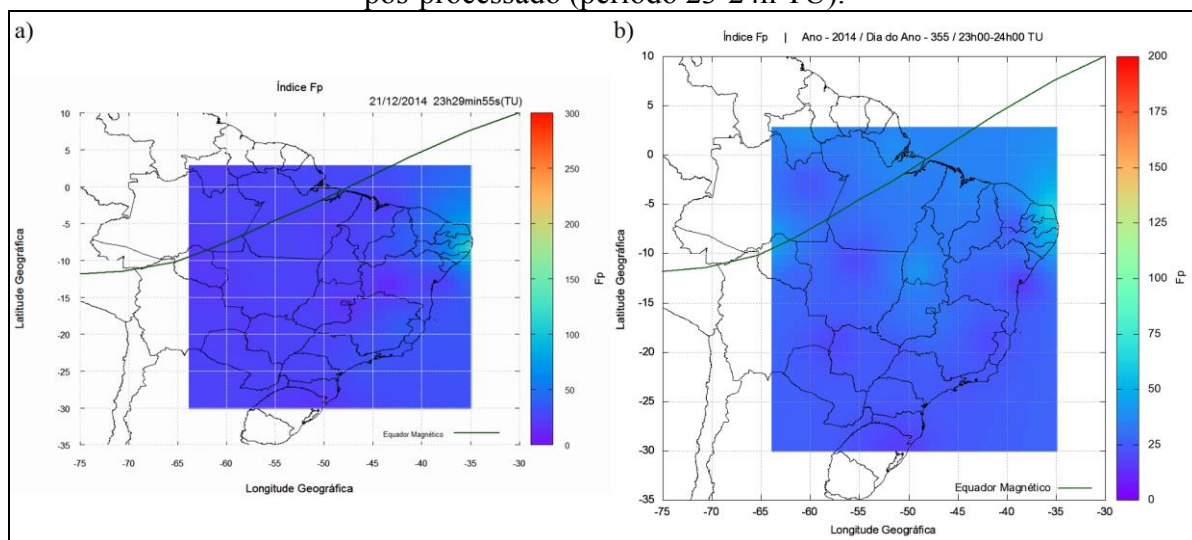


Figura 82 – Geovisualização do índice  $I_{ROT}$ , 22/12/2014, a) tempo real (23h45min26s TU) e b) pós-processado (período 23h30min-23h45min TU).

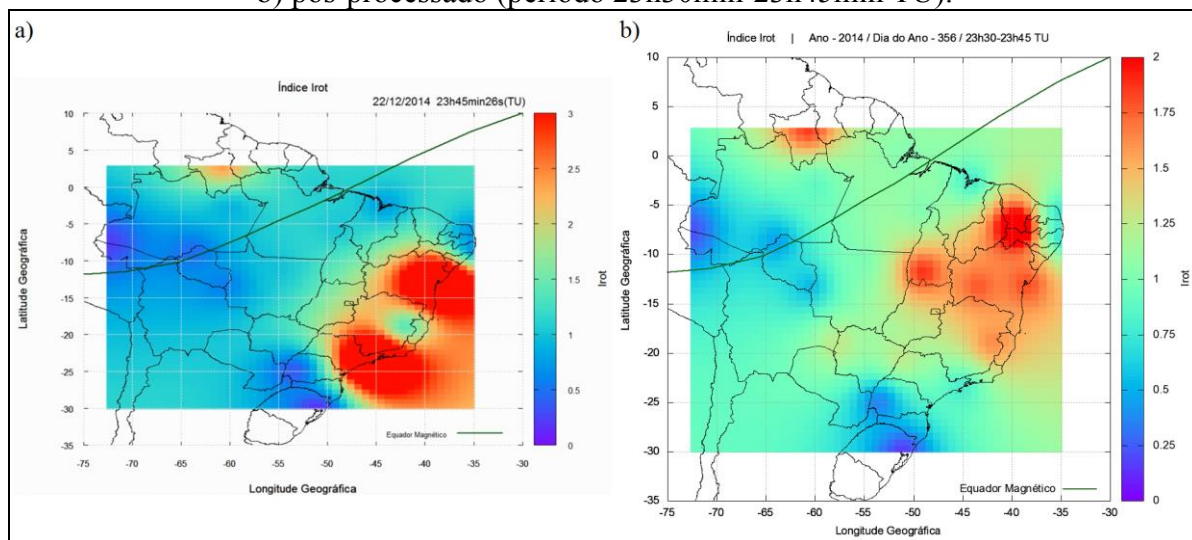


Figura 83 – Geovisualização do índice ROTI, 23/12/2014, a) tempo real (22h58min07s TU) e b) pós-processado (período 22h55min-23h00min TU).

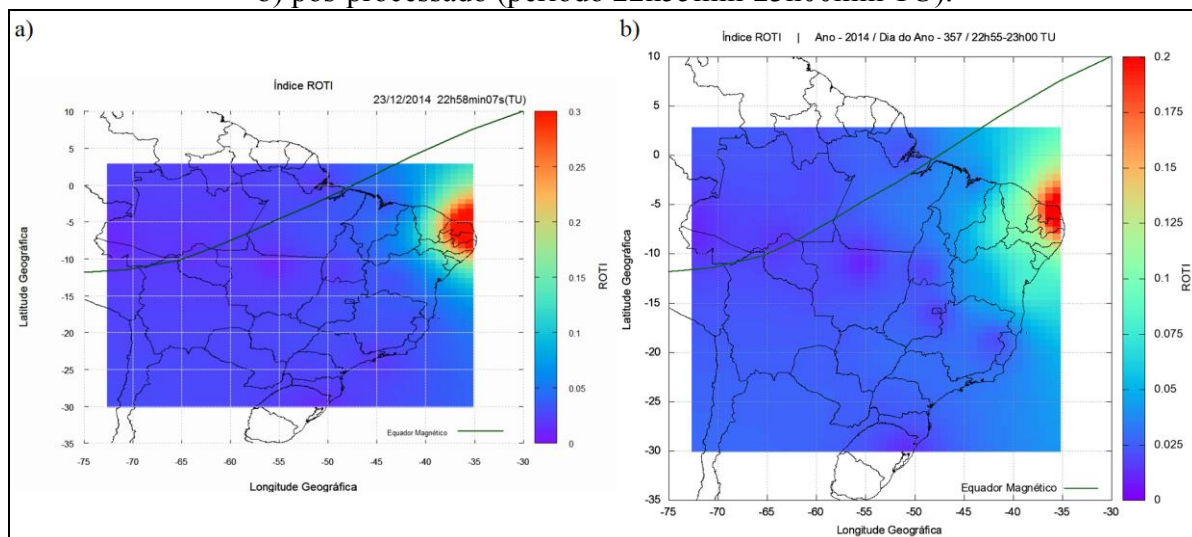


Figura 84 – Geovisualização do índice  $\sigma_{\Phi}$ , 24/12/2014, a) tempo real (22h55min33s TU) e b) pós-processado (período 22h55min-22h56min TU).

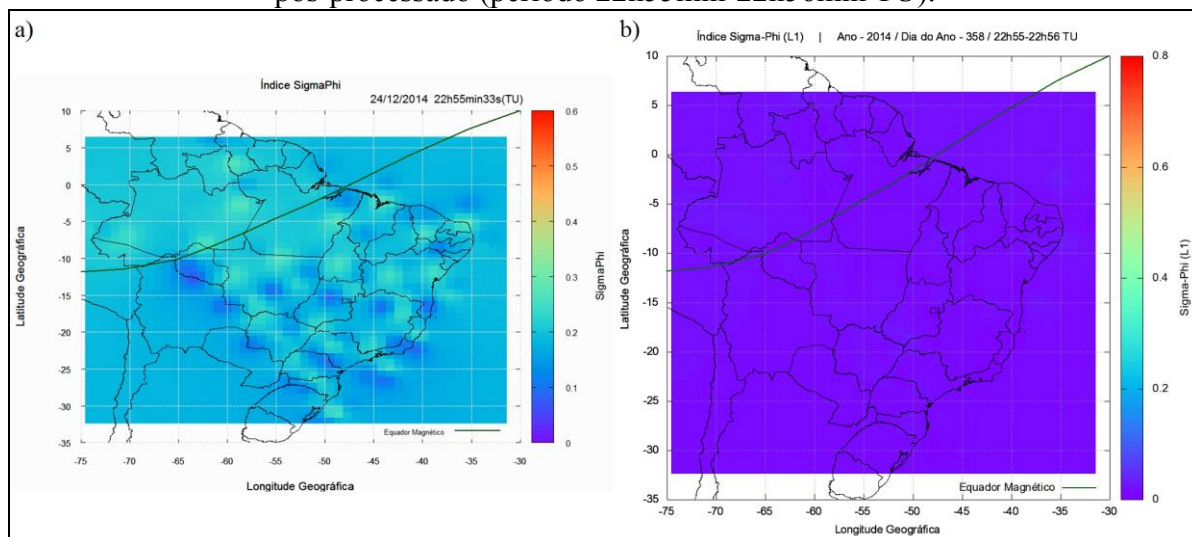


Figura 85 – Geovisualização do índice  $S_{\Phi}$ , 25/12/2014, a) tempo real (23h41min13s TU) e b) pós-processado (período 23h40min-23h41min TU).

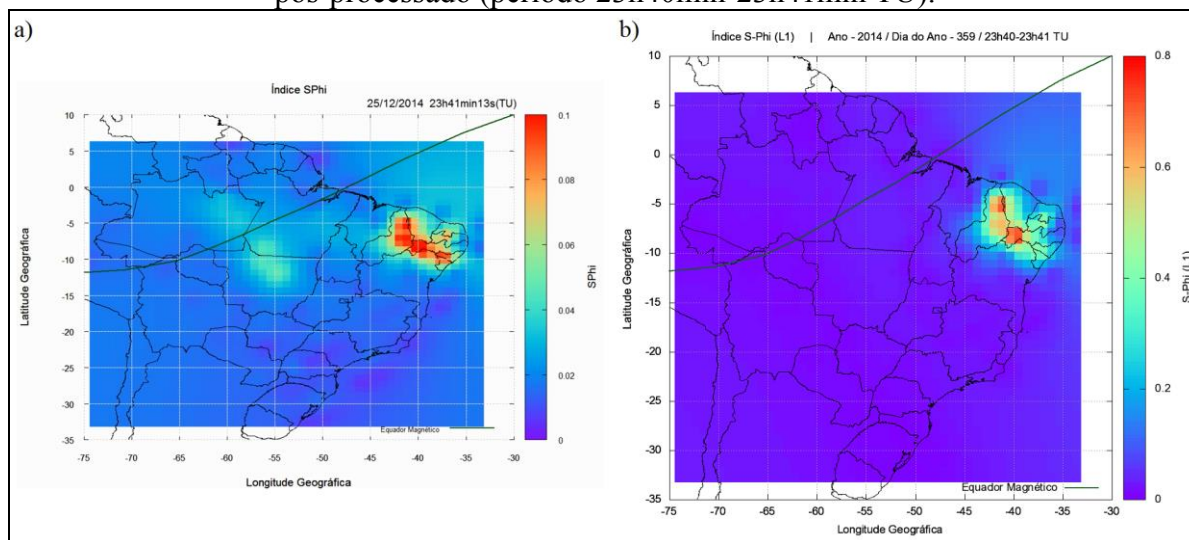
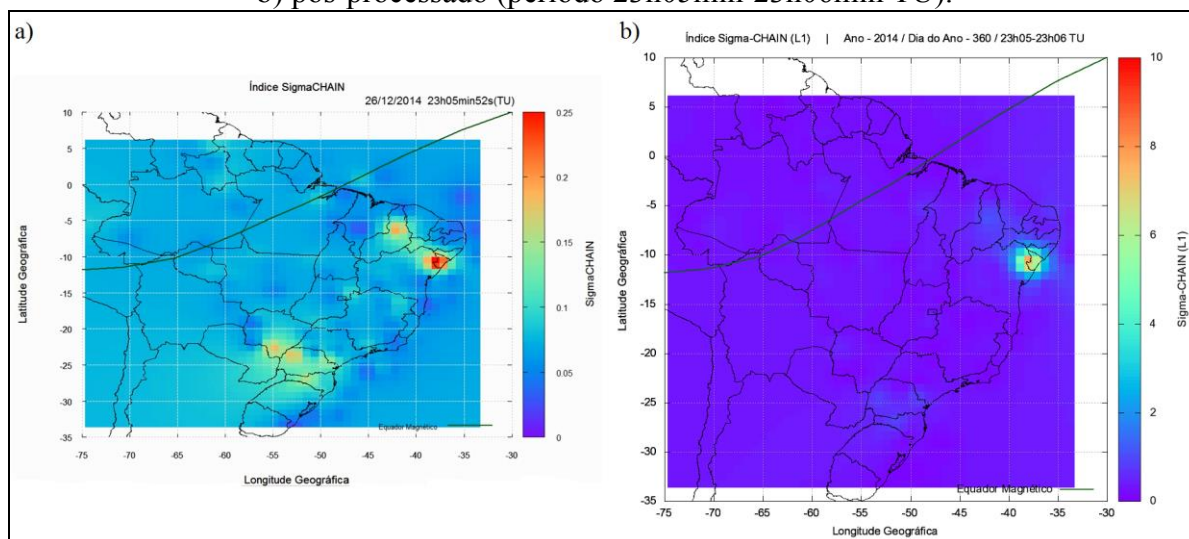


Figura 86 – Geovisualização do índice  $\sigma_{CHAIN}$ , 26/12/2014, a) tempo real (23h05min52s TU) e b) pós-processado (período 23h05min-23h06min TU).



De um modo geral, analisando os mapas de geovisualização (pós-processado) dos índices supracitados com os instantes mais próximos em tempo real pode-se verificar que as correspondências espacial e temporal das irregularidades ionosféricas e da cintilação dos sinais GNSS foram determinadas pelo aplicativo com um nível significativo de concordância.

O monitoramento das irregularidades da ionosfera apresentou melhores resultados a partir dos índices  $f_p$ ,  $F_p$  e ROTI, conforme pode ser visualizado nos exemplos das Figuras 80, 81 e 83. Em relação ao índice  $I_{ROT}$  (Figura 82) observa-se que as fortes irregularidades ionosféricas foram determinadas corretamente em tempo real, em comparação com o mapa pós-processado, no entanto foi determinada também uma região de ocorrência de

irregularidades na densidade eletrônica na região Sudeste, mais precisamente no sul de Minas Gerais, leste de São Paulo e o Estado do Rio de Janeiro, o que contradiz com os resultados pós-processados. Vários motivos podem justificar o fato ocorrido: *outliers* e/ou perdas de ciclos não detectados corretamente pelo algoritmo em tempo real, denegrindo assim a estimativa do índice; possíveis efeitos da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) nos sinais GNSS em tempo real; e/ou algum problema inerente a estação GNSS.

Em termos do monitoramento das cintilações ionosféricas, primeiramente em relação ao índice  $\sigma_{\phi}$ , não foi detectada nenhuma área de ocorrência de cintilação para o dia 24 de dezembro de 2014, tanto no modo tempo real quanto no modo pós-processado (Figura 84). Já para os dias 25 e 26 de dezembro as ocorrências de cintilações ionosféricas foram mapeadas analogamente pelos índices  $S_{\phi}$  e  $\sigma_{\text{CHAIN}}$  nos dois modos (Figuras 85 e 86, respectivamente).

## 6.5 Correspondência do Índice S4 com o Índice Proposto $S_{\text{SNR}}$

Diante da impossibilidade do cálculo do índice de cintilação de amplitude S4 devido ao não fornecimento da intensidade do sinal nos arquivos RINEX de observações, foi investigada uma forma de obter uma estimativa compatível ao índice utilizando os dados que se têm disponíveis nos arquivos.

Além das medidas de fase e pseudodistância para cada satélite, os arquivos RINEX de observações contêm medidas de SNR, valores esses utilizados no cálculo do índice S4 para a remoção de ruídos do ambiente.

As medidas originais de SNR são dadas em dBHz, entretanto, os arquivos RINEX disponibilizam valores padronizados dos mesmos. A obtenção das medidas de SNR padronizadas é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Obtenção das medidas padronizadas de SNR disponibilizadas pelo RINEX.

SNR [dBHz]	SNR (RINEX)
< 12	1
12 – 17	2
18 – 23	3
24 – 29	4
30 – 35	5
36 – 41	6
42 – 47	7
48 – 53	8
$\geq 54$	9

Fonte: Adaptado de Gurtner e Estey (2013).

Dessa forma, baseado na equação do índice S4T (equação (27)) foi proposto o índice  $S_{\text{SNR}}$  (equação (38)), o qual utiliza as medidas padronizadas de SNR disponibilizadas pelo RINEX e é estimado para cada satélite no respectivo IPP, considerando o mesmo intervalo de tempo utilizado pelo S4, um minuto:

$$S_{\text{SNR}} = \sqrt{\frac{\langle \text{SNR}^2 \rangle - \langle \text{SNR} \rangle^2}{\langle \text{SNR} \rangle^2}}. \quad (38)$$

Para a avaliação do índice proposto foram estimados valores de  $S_{\text{SNR}}$  para o mesmo período de alta variação da densidade de elétrons da ionosfera utilizado para a avaliação das irregularidades da ionosfera e cintilações de fase (28 de fevereiro e 1 de março de 2014), bem como, para o dia de baixa variabilidade (7 de junho de 2014), para as seguintes estações da rede CALIBRA: INCO, PALM, POAL, PRU1, SJCE e UFBA.

Da mesma forma que foi realizado para a avaliação dos índices de cintilações de fase, foram obtidos para essas mesmas estações e período de dias os gráficos do índice S4 a partir da ferramenta *web* ISMR Query Tool. Em ambos os processos foi considerada uma máscara de elevação de  $35^\circ$ . Por fim, os resultados foram comparados com o intuito de avaliar a estimativa do índice  $S_{\text{SNR}}$ , de modo a verificar a correspondência do mesmo com o S4.

As Figuras 87 a 92 apresentam os índices S4 e  $S_{\text{SNR}}$  das estações selecionadas para o dia 28 de fevereiro de 2014. Já as Figuras 93 a 98 apresentam os índices para o dia 1 de março de 2014 e as Figuras 99 a 104 os índices referentes ao dia 7 de junho de 2014. Destaca-se que nos gráficos o índice  $S_{\text{SNR}}$  é representado pela expressão “S-SNR”. São apresentados somente os valores para a portadora L1.

Figura 87 – Índices a)  $S_{\text{SNR}}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 28/02/2014.

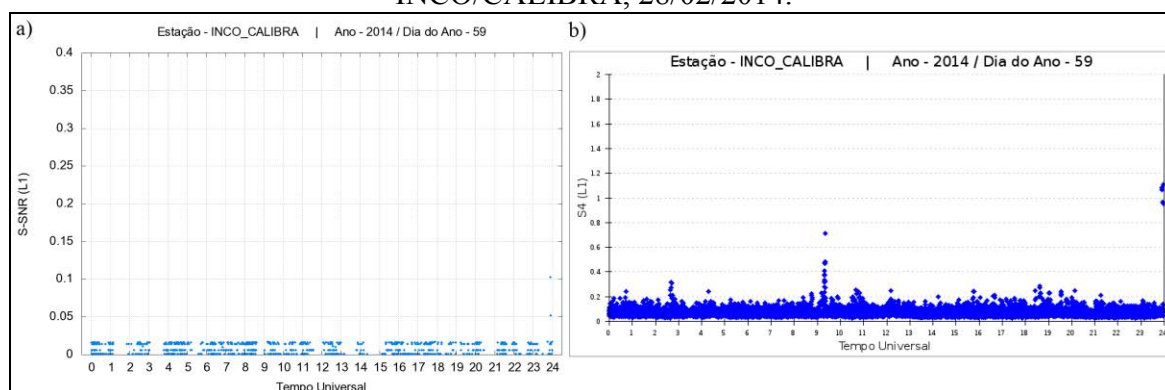


Figura 88 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 28/02/2014.

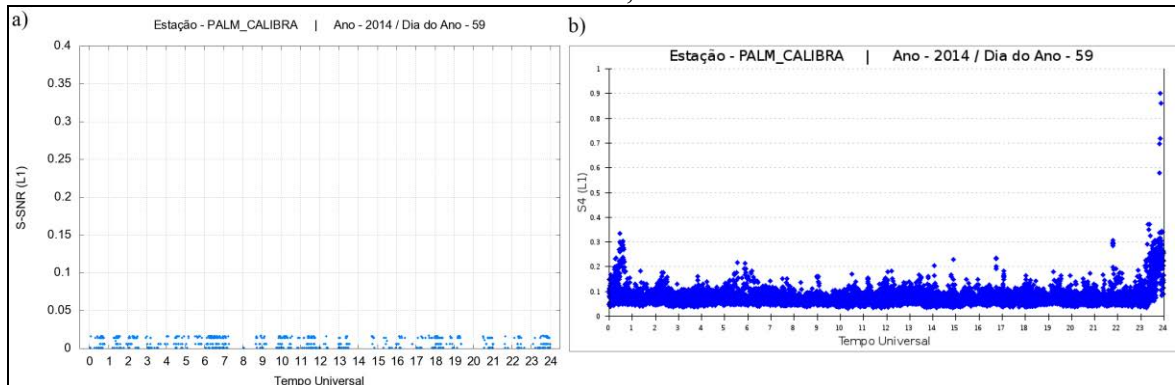


Figura 89 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 28/02/2014.

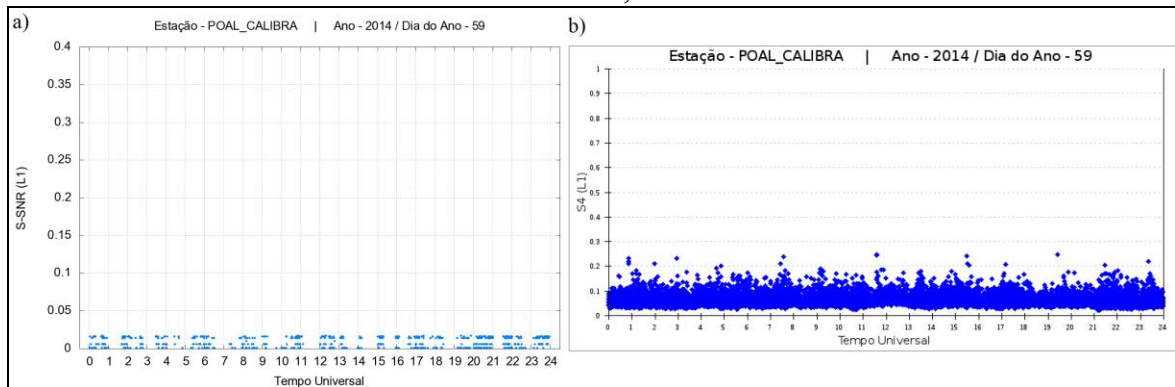


Figura 90 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 28/02/2014.

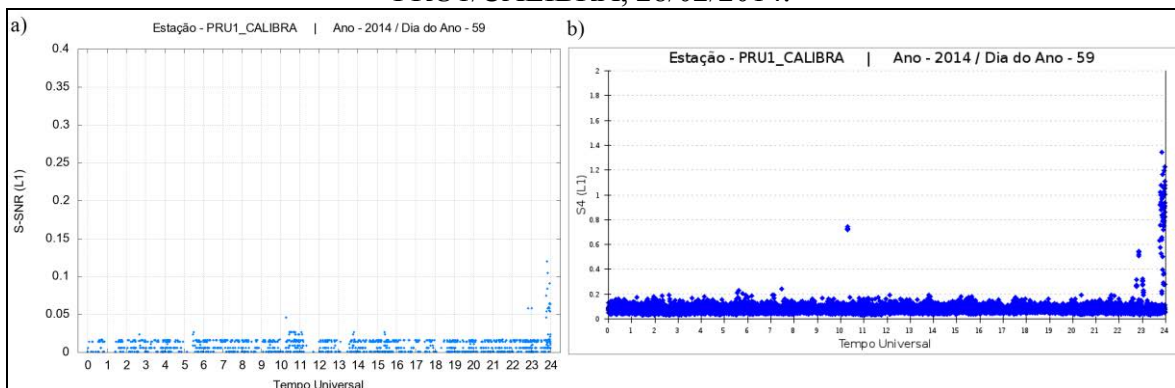




Figura 91 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 28/02/2014.

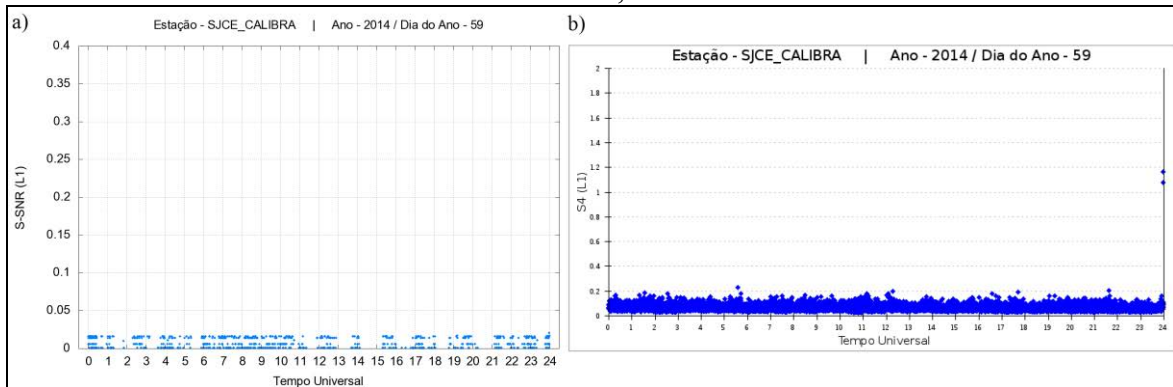


Figura 92 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 28/02/2014.

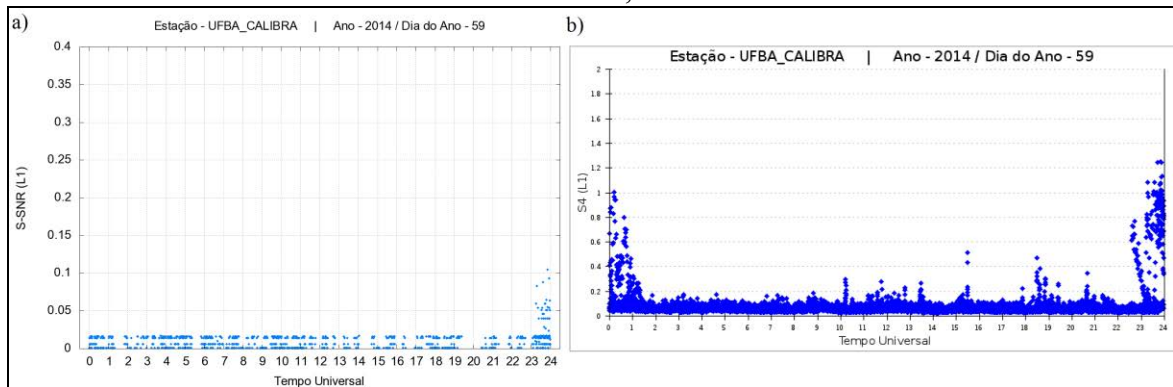


Figura 93 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 01/03/2014.

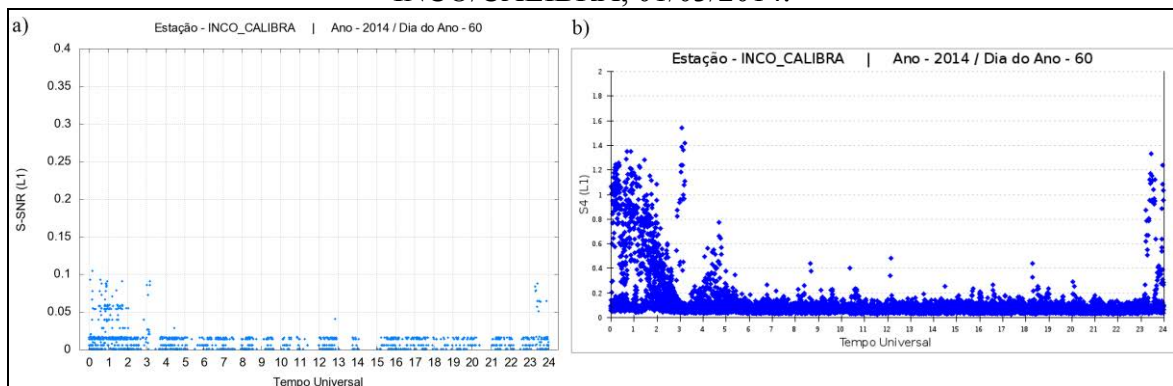


Figura 94 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 01/03/2014.

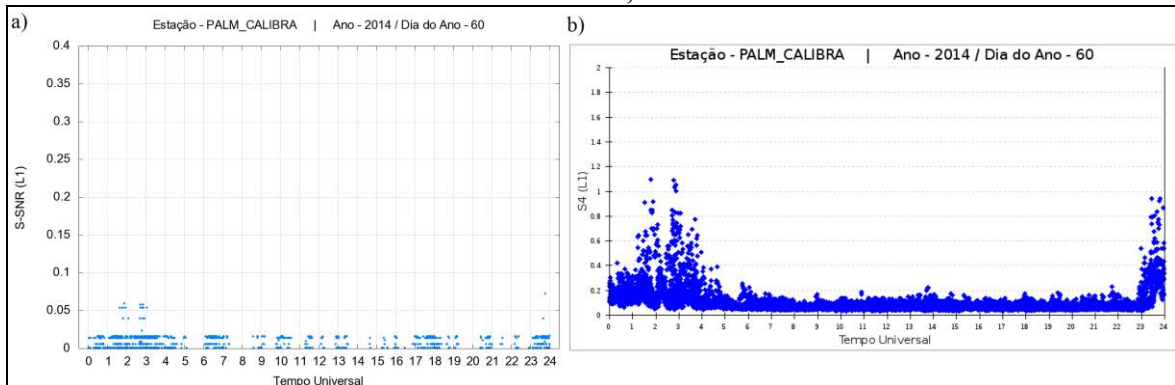


Figura 95 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 01/03/2014.

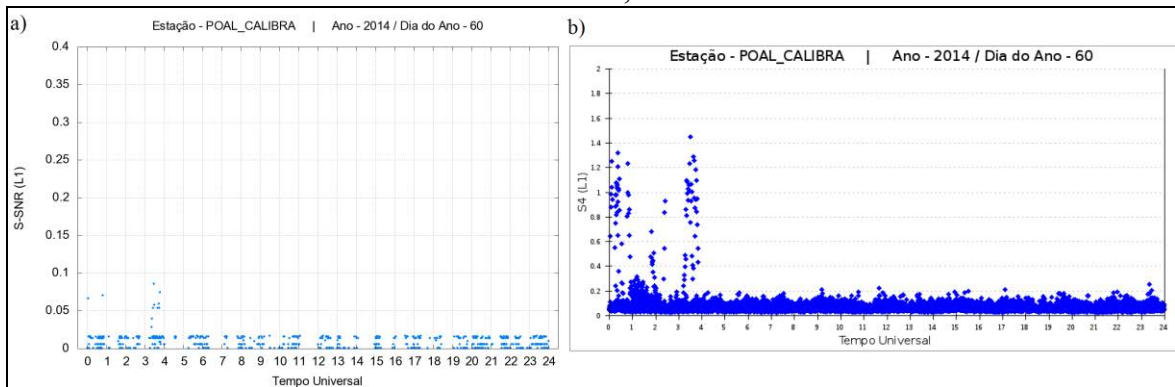


Figura 96 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b)  $S_4$  (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 01/03/2014.

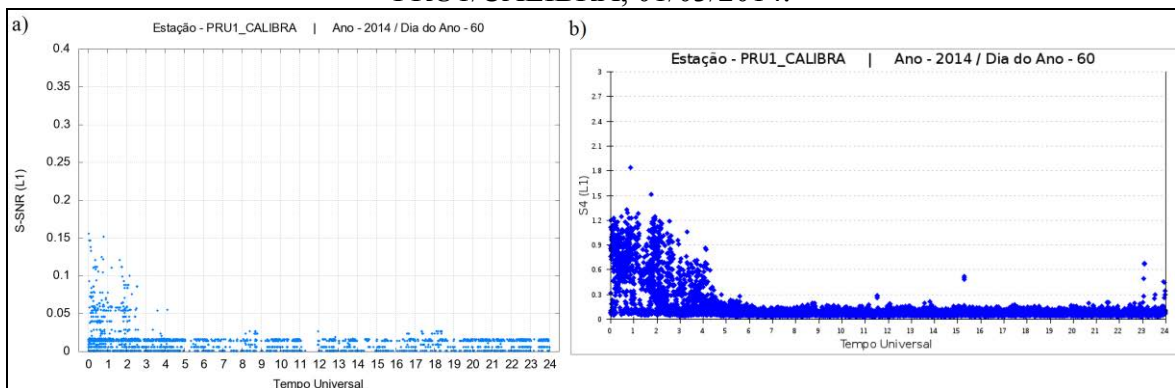


Figura 97 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 01/03/2014.

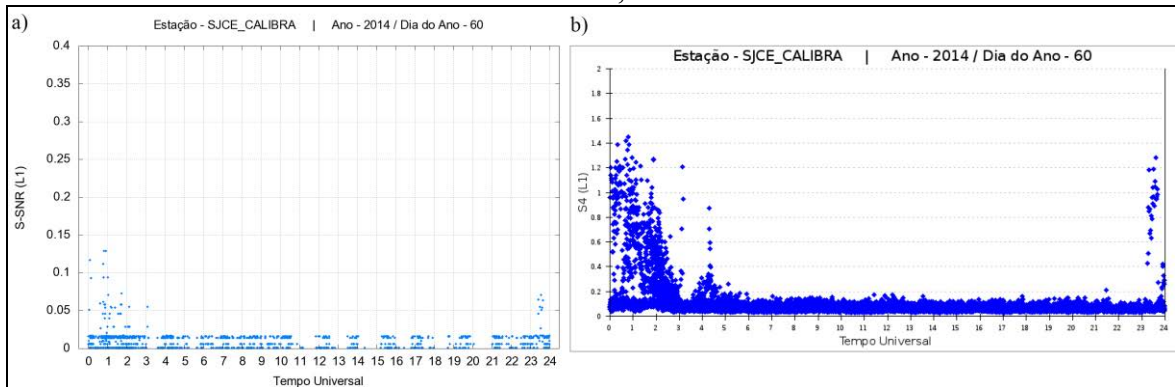


Figura 98 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 01/03/2014.

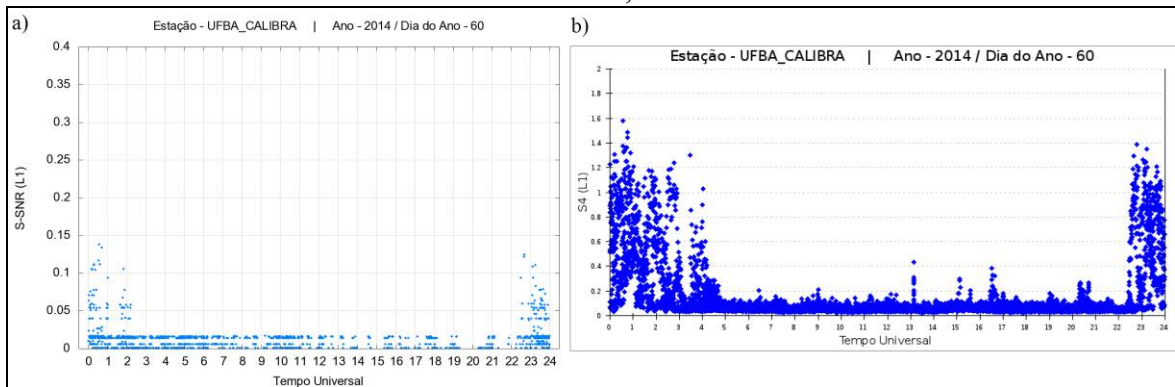


Figura 99 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação INCO/CALIBRA, 07/06/2014.

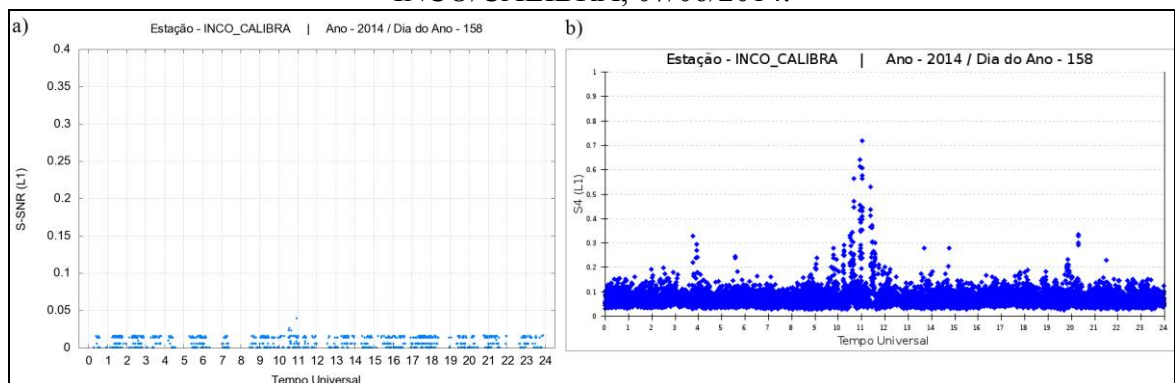


Figura 100 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PALM/CALIBRA, 07/06/2014.

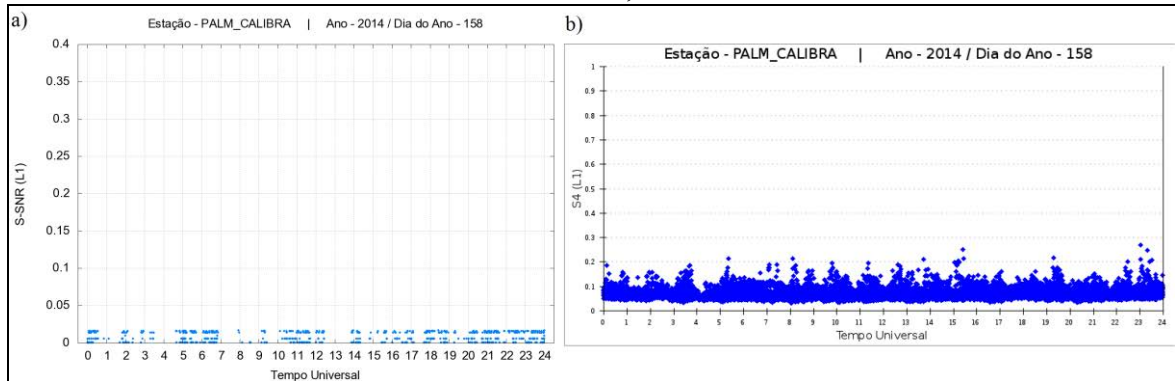


Figura 101 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação POAL/CALIBRA, 07/06/2014.

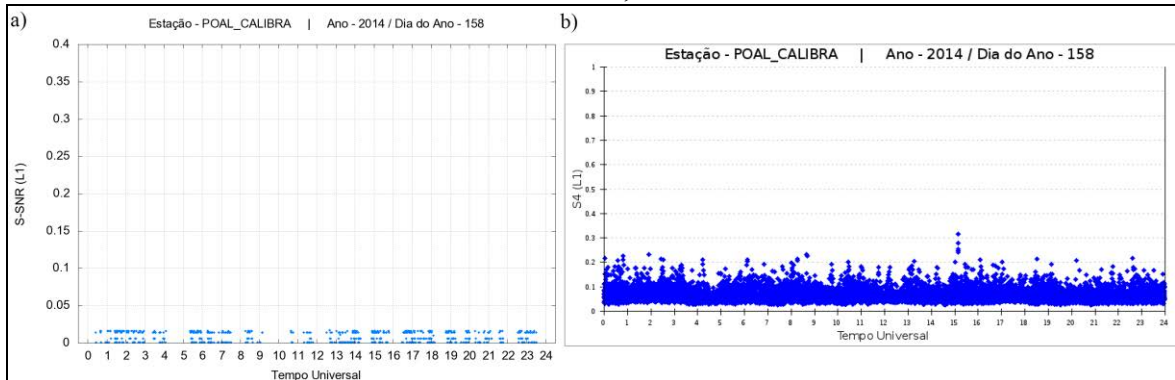


Figura 102 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação PRU1/CALIBRA, 07/06/2014.

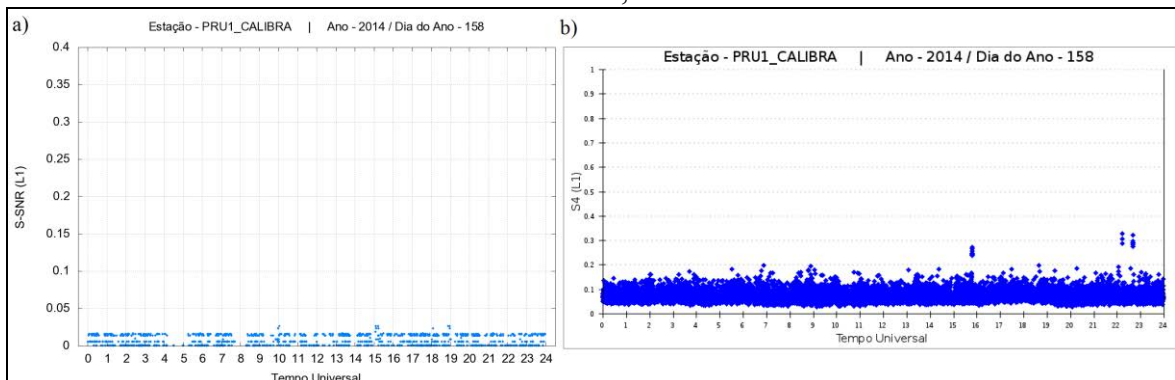


Figura 103 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação SJCE/CALIBRA, 07/06/2014.

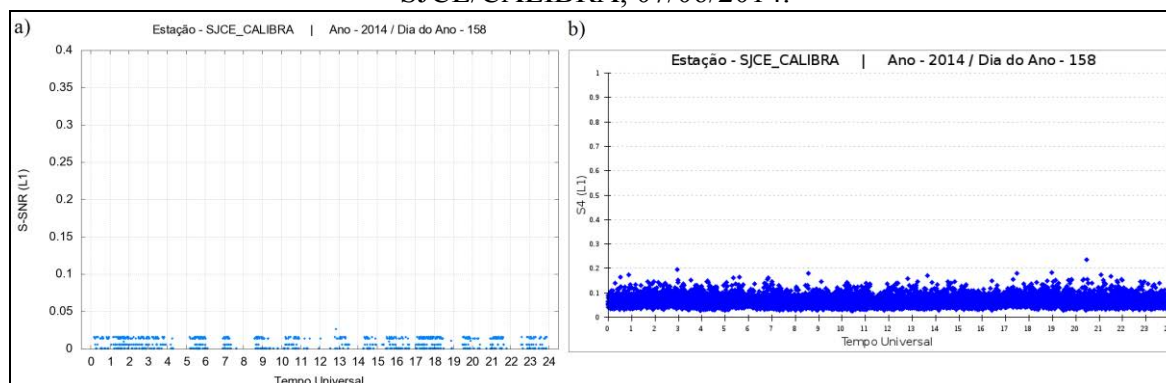
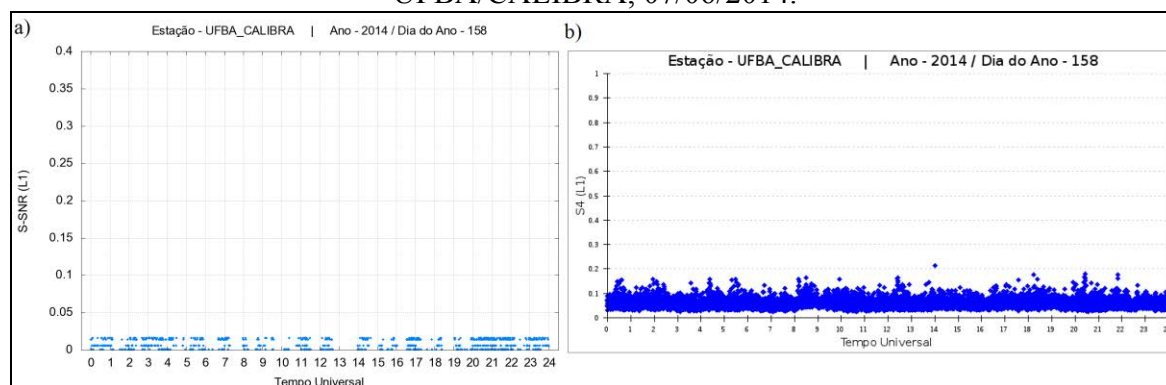


Figura 104 – Índices a)  $S_{SNR}$  (Ion\_Index) e b) S4 (ISMR Query Tool), estação UFBA/CALIBRA, 07/06/2014.



Comparando os gráficos dos índices  $S_{SNR}$  e S4 das estações selecionadas (Figuras 87 a 104) para todas as datas (dias 28 de fevereiro, 1 de março e 7 de junho de 2014), pôde-se observar a notória correspondência entre eles. Durante a ocorrência de cintilações de amplitude, o que por sua vez, elevaram os valores de S4, o índice  $S_{SNR}$  também apresentou uma ascendência nos mesmos instantes e com a mesma duração, obtendo uma correlação média de 0,56. Observando a estação PRU1 para o dia 28 de fevereiro de 2014 (Figura 90), por exemplo, tem-se que próximo às 10h TU e durante 23-24h TU o índice S4 apresentou saltos de cintilação, o que pode ser comprovado pelos valores do índice  $S_{SNR}$  para os mesmos períodos. Para o período de baixa variabilidade da densidade de elétrons o cenário não foi diferente. Os valores de S4 permaneceram inferiores a 0,2, que de acordo com Muella et al. (2009) é considerado fraca cintilação, e conseqüentemente os valores de  $S_{SNR}$  não apresentaram saltos, ficando abaixo de 0,05. Para esse período o coeficiente de correlação médio foi de aproximadamente 0,81. A única exceção se deve a estação INCO (Figura 99), que apresentou uma cintilação forte por volta das 11h TU, onde o S4 chegou a atingir o teto de 0,7, diferentemente de  $S_{SNR}$ , cujo valor permaneceu inferior a 0,05.

Entretanto, algumas incompatibilidades entre os índices ocorreram, como os casos das estações SJCE e UFBA para o dia 28 de fevereiro de 2014 (Figuras 91 e 92, respectivamente). Na primeira estação o índice S4 acusou cintilação nos últimos minutos do dia, ao passo que  $S_{SNR}$  permaneceu inalterado. O mesmo ocorreu para os primeiros minutos do dia para a estação UFBA.

De um modo geral se conclui que o índice proposto baseado no desvio-padrão de SNR normalizado pela média apresentou uma boa concordância com o índice S4, podendo ser utilizado como um indicador de cintilação de amplitude. No entanto, quando há disponibilidade do uso de S4, o mesmo deve ter prevalência sobre o proposto, haja vista que  $S_{SNR}$  trata-se de um índice adaptado, obtido de medidas de SNR, que por sua vez já sofreram uma padronização e perderam um pouco da sua variabilidade. Mais experimentações contemplando um maior período de dias e diferentes condições da ionosfera devem ser realizadas com intuito de se obter um índice mais confiável.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa proporcionou a estimativa, análise, representação e monitoramento de índices de irregularidades e cintilação da ionosfera a partir do aplicativo desenvolvido no projeto – o Ion\_Index – nos modos pós-processado e em tempo real, utilizando dados GNSS das redes ativas CALIBRA, GNSS-SP e RBMC.

Experimentos foram realizados visando a avaliação do método proposto para a estimativa dos índices  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$ ,  $ROTI$ ,  $\sigma_\phi$ ,  $S_\phi$  e  $\sigma_{CHAIN}$ , onde foram considerados dois diferentes cenários: um de alta variabilidade da densidade de elétrons da ionosfera (dias 28 de fevereiro e 1 de março de 2014) e outro de baixa variação (7 e 11 de junho de 2014). Os resultados obtidos foram comparados com dados provenientes de outras fontes, tais como ionossondas digitais e a ferramenta ISMR Query Tool, e se mostraram compatíveis, com correlações moderadas a altas, permitindo assim uma avaliação positiva.

Uma vez validado o método, experimentos utilizando os índices de irregularidades e de cintilação dos sinais GNSS foram realizados com o intuito de verificar os efeitos da variação sazonal e dos momentos de ascensão e ápice do ciclo solar 24 sobre o território brasileiro. Durante essa etapa mapas de geovisualização foram elaborados, permitindo a identificação, limitação e o deslocamento das gerações das irregularidades da ionosfera.

O monitoramento em tempo real das irregularidades e cintilação da ionosfera foi realizado para o período do solstício de verão (20 a 26 de dezembro de 2014), onde os resultados obtidos se mostraram compatíveis com os provenientes do modo pós-processado, sendo atendido o objetivo de monitorar o estado da ionosfera no âmbito brasileiro.

A proposta de um índice de cintilação baseado nas medidas de SNR contidas nos arquivos RINEX de observações foi investigada e apresentada. Trata-se de análises preliminares que precisam ser mais aprofundadas, mas que os resultados, num primeiro momento, se mostraram compatíveis com o índice S4 (coeficiente de correlação aproximado de 0,56 para o período de alta variabilidade da densidade de elétrons e de 0,81 para o período de baixa), permitindo assim a extração de uma estimativa para as cintilações de amplitude.

A disponibilidade do aplicativo a comunidade científica é efetivada no *website* do GEGE ([gege.fct.unesp.br](http://gege.fct.unesp.br)), aba “Softwares – Download”. Para facilitar o uso e

esclarecer qualquer dúvida quanto ao aplicativo, um tutorial foi elaborado, sendo o mesmo contido na pasta do aplicativo.

A transformação das estações das redes GNSS-SP e RBMC, amplamente utilizadas para fins de posicionamento, em sistemas de monitoramento da camada ionosférica, a partir do emprego do método apresentado, proporciona um maior conjunto de informações a respeito da ionosfera brasileira, que por sua vez servem para a alimentação de modelos de mitigação, bem como, o aumento da resolução espacial, uma vez que a quantidade de instrumentos dedicados ao monitoramento da ionosfera no Brasil é reduzida. Esse adensamento permite uma melhor compreensão da dinâmica dos principais efeitos ionosféricos no Brasil: AIE, irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS; onde se pode observar que as gerações das irregularidades ionosféricas se iniciam aproximadamente às 22h TU no extremo leste da região Nordeste e se deslocam sobre o território no sentido Nordeste-Sudoeste, ao longo do equador magnético, e as cintilações ionosféricas ocorrem nas regiões onde os níveis das irregularidades são mais elevados.

Em relação aos índices de irregularidades investigados conclui-se que, para o estudo temporal das irregularidades ionosféricas deve-se utilizar o ROTI, ao passo que o estudo espacial fica a cargo do  $f_p$ . O índice  $F_p$  é utilizado para fins gerais, isto é, quando necessita-se de um valor que represente o nível geral de irregularidades ionosféricas. Já a respeito das cintilações de fase, devido à baixa taxa de amostragem dos dados, o índice  $\sigma_\phi$  implementado permite identificar a ocorrência da cintilação ionosférica, a duração e uma estimativa da sua intensidade.

O estudo e monitoramento da ionosfera utilizando equipamentos especializados como ionossondas, imageadores, radares de espalhamento coerente, receptores geodésicos do tipo PolaRxS da Septentrio são as formas mais apropriadas que existem atualmente, no entanto os altos valores dos mesmos, associados aos custos de manutenção, inviabilizam a implantação de uma densa rede ao longo dos 8,5 milhões de  $\text{km}^2$  de território nacional. Assim o Ion\_Index serve como alternativa para o adensamento de informações sobre as irregularidades e cintilação da ionosfera, pois utiliza a infraestrutura de estações já implantadas pela RBMC, GNSS-SP e CALIBRA.

Com a experiência adquirida durante o desenvolvimento da pesquisa, a partir da análise dos resultados e das dificuldades defrontadas, e tendo em mente que ainda há muito que se desenvolver em termos computacionais e estudos sobre o tema no setor brasileiro, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:



- Implementar o método de krigagem ordinária (*ordinary kriging*) para a interpolação dos índices de irregularidades e de cintilação dos sinais GNSS durante o processo de geração dos mapas de geovisualização, haja vista que a krigagem ordinária é um dos métodos mais recomendados quando se utilizam dados ionosféricos;
- Adaptar o aplicativo para que estime os índices utilizando os dados GNSS de qualquer receptor geodésico de dupla frequência, o que viabilizaria, por exemplo, o estudo das irregularidades e cintilações da ionosfera nas áreas oceânicas e costeiras, uma vez que grande maioria das embarcações de grande porte possuem receptores geodésicos L1/L2;
- Direcionar o monitoramento das irregularidades e cintilação da ionosfera em tempo real para aplicações da navegação aérea brasileira, mais precisamente no desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS;
- Implementar uma versão *web* do aplicativo ou integrá-lo na ferramenta *web* ISMR Query Tool;
- Requisitar ao IBGE o aumento do número máximo de estações da RBMC-IP as quais o usuário pode ter acesso, bem como, fornecer arquivos RINEX de observações com taxa de amostragem dos dados superior a 1 Hz, o que permite uma estimativa mais acurada das cintilações de fase;
- Adaptar as estações da rede CALIBRA para que transmita os dados em tempo real via Ntrip;
- Implementar o método de *detrending* Butterworth e estimar os índices de cintilações de fase utilizando os dados brutos das estações da rede CALIBRA, as quais estão amostradas em 50 Hz, e por sua vez comparar com os valores dos índices fornecidos pela ferramenta ISMR Query Tool;
- Realizar pesquisa para a determinação de uma máscara de elevação padrão que mais se adeque à dinâmica ionosférica brasileira; e
- Estudar o impacto de explosões solares e tempestades geomagnéticas muito intensas na estimativa dos índices de irregularidades e de cintilação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. J. *Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais*. 2012. 193 f. Tese (Doutorado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos.

AGUIAR, C. R. *Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS*. 2010. 256 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

AQUINO, M.; SREEJA, V. Correlation of scintillation occurrence with interplanetary magnetic field reversals and impact on Global Navigation Satellite System receiver tracking performance. *Space Weather*, v. 11, n. 5, p. 219-224, May 2013.

AZPILICUETA, F.; BRUNINI, C.; RADICELLA, S. M. Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude. *Advances in Space Research*, v. 38, n. 11, p. 2324-2331, 2006.

BATISTA, I. S. *Notas de aula do curso introdução à ionosfera e a propagação de ondas*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2003.

BEIDOU. *Beidou Navigation Satellite System*. 2015. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/>>. Acesso em: 18 mar. 2015.

BÉNIGUEL, Y.; ROMANO, V.; ALFONSI, L.; AQUINO, M.; BOURDILLON, A.; CANNON, P.; DE FRANCESCHI, G.; DUBEY, S.; FORTE, B.; GHERM, V.; JAKOWSKI, N.; MATERASSI, M.; NOACK, T.; POZOGA, M.; ROGERS, N.; SPALLA, P.; STRANGWAYS, H. J.; WARRINGTON, E. M.; WERNIK, A.; WILKEN, V.; ZERNOV, N. Ionospheric scintillation monitoring and modelling. *Annals of Geophysics*, v. 52, n. 3/4, p. 391-416, June/Aug. 2009.

BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, v. 17, n. 3, p. 199-202, Mar. 1990.

BRUNINI, C. *Global ionospheric models from GPS measurements*. 1998. Dissertation (PhD in Astronomy) – Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

CALIBRA. *Countering GNSS High Accuracy Applications Limitations Due to Ionospheric Disturbances in Brazil*. Projeto de Pesquisa em Desenvolvimento, 2012.

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

\_\_\_\_\_. MONICO, J. F. G.; FERREIRA, L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth Planets Space*, v. 52, n. 11, p. 1083-1089, Sep. 2000.

CHATTERJEE, S.; CHAKRABORTY, S. K. Variability of ionospheric scintillation near the equatorial anomaly crest of the Indian zone. *Annales Geophysicae*, v. 31, p. 697-711, Apr. 2013.

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

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. *Radio Science*, v. 38, n. 1, p. 1-23, Feb. 2003.

COSTA, S. M. A.; LIMA, M. A. A.; MOURA JÚNIOR, N. J.; ABREU, M. A.; SILVA, A. L.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via Ntrip, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. *Anais eletrônicos...* Recife: UFPE, 2008. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII\\_CD/](https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII_CD/)>. Acesso em: 22 jun. 2014.

DAL POZ, W. R. *Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas*. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

\_\_\_\_\_. *Investigações preliminares sobre a influência do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS*. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

DAVIES, K. *Ionospheric radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580 p.

EL GIZAWY, M. L. *Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users*. 2003. 161 p. Thesis (MSc in Science) – Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary.

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

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

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

FORTE, B. On the relationship between the geometrical control of scintillation indices and data detrending problems observed at high latitudes. *Annals of Geophysics*, v. 50, n. 6, p. 699-706, Dec. 2007.

FORTES, L. P. S. *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. 1997. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Comunicação) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

FU, W. X.; HAN, S.; RIZOS, C.; KINGHT, M.; FINN, A. Some results on the nonparametric statistics of GPS signal scintillation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GPS: APPLICATION TO EARTH SCIENCES & INTERACTION WITH OTHER SPACE GEODETIC TECHNIQUES, 1999, Tsukuba. *Electronic proceedings...* Tsukuba, 1999. Disponível em: <[http://www.gmat.unsw.edu.au/Snap/publications/fu\\_2000.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/Snap/publications/fu_2000.pdf)>. Acesso em: 22 jun. 2014.

GALILEO. *Galileo implementation plan*. 2015. Disponível em: <<http://www.galileoic.org/node/149?language=en>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

GLONASS. *Russian Federal Space Agency: GLONASS constellation status*. 2015. Disponível em: <<https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, H.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, Apr. 1994.

\_\_\_\_\_. TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, A. L. C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, v. 88, p. 529-562, Mar. 1999.

GPS. *Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: current and future satellite generations*. 2015. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

GUIMARÃES, R. C.; SILVA, C. E. Anomalia magnética do atlântico sul: origem interna e visão espacial. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2003, Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...*

GURTNER, W.; ESTEY, L. *RINEX: the Receiver Independent Exchange Format, version 3.02*. 2013. Disponível em: <<ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2014.

HEGARTY, C.; EL-ARINI, M. B.; KIM, T.; ERICSON, S. Scintillation modeling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers. *Radio Science*, v. 36, n. 5, p. 1221-1231, Sep./Oct. 2001.

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

HSUEH, B.; FOTOPOULOS, G.; ADVE, R. A study on smearing due to ionospheric phase scintillation in SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 34, n. 5, p. 1823-1837, Mar. 2013.

IERS. *Transformation parameters from ITRF2008 to past ITRFs*. 2014. Disponível em: <[http://itrf.ensg.ign.fr/doc\\_ITRF/Transfo-ITRF2008\\_ITRFs.txt](http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt)>. Acesso em: 10 mar. 2014.

IGS. *Products*. 2015. Disponível em: <<http://igs.org/products>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M.; DE PAULA, E. R. GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather*, v. 5, n. 9, p. 1-23, Sep. 2007.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149 p.

KLOBUCHAR, J. *A first-order, worldwide ionosphere time-delay algorithm Rep. AFCRL-TR-75-0502 (NTIS ADA 018862) US Air Force Cambridge Res. Lab., Bedford, Mass, 1975.*

\_\_\_\_\_. Ionospheric effects on GPS. *Global Positioning System: theory and applications*, v. 1, p. 485-515, 1996.

LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560 p.

LI, G.; NING, B.; YUAN, H. Analysis of ionospheric scintillation spectra and TEC in the Chinese low latitude region. *Earth Planets Space*, v. 59, n. 4, p. 279-285, May 2007.

LIN, L. S. A novel approach to improving the accuracy of real-time ionospheric delay estimation using GPS. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 10., 1997, Kansas City. *Proceedings...* Kansas City: ION-GPS, 1997. p. 169-178.

LIU, Z. *Ionosphere tomographic modelling and applications using global positioning system GPS measurements*. 2004. 304 p. Dissertation (PhD in Science) – Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 56, n. 1, p. 14-27, jul. 2004.

\_\_\_\_\_. *Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira*. 2007. 263 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

\_\_\_\_\_. 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, p. 14-33, jan./mar. 2013.

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

MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. *Radio Science*, v. 35, n. 3, p. 885-904, May/Jun. 2000.

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

MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; SMORIGO, P. F. Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions. *Advances in Space Research*, v. 43, n. 12, p. 1957-1973, June 2009.

\_\_\_\_\_. DE PAULA, E. R.; MONTEIRO, A. A. Ionospheric scintillation and dynamics of Fresnel-scale irregularities in the inner region of the equatorial ionization anomaly. *Surveys in Geophysics*, v. 34, n. 2, p. 233-251, Mar. 2013.

MUSHINI, S. C.; JAYACHANDRAN, P. T.; LANGLEY, R. B.; MACDOUGALL, J. W.; POKHOTILOV, D. Improved amplitude and phase scintillation indices derived from wavelet detrended high latitude GPS data. *GPS Solutions*, v. 16, n. 3, p. 363-373, Jul. 2012.

NIU, F. *Performances of GPS signal observables detrending methods for ionosphere scintillation studies*. 2012. 58 p. Thesis (MSc in Science) – Department of Electrical and Computer Engineering, Miami University, Oxford.

NTRIP. *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), version 1.0*. 2014. Disponível em: <<http://epsagss.usal.es/documentos/ntripdocumentation.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2014.

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

OLIVEIRA FILHO, K. S. O.; SARAIVA, M. F. O. *Astronomia e astrofísica*. Porto Alegre: Departamento de Astronomia – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 708 p.

ON. *Observatório Nacional: cálculo da declinação magnética (modelo da IGRF)*. 2014. Disponível em: <<http://www.on.br/conteudo/modelo.php?endereco=servicos/servicos.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

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

\_\_\_\_\_. CAMARGO, P. O. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera: I<sub>ROT</sub> e ROTI. In: *Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 12-14 nov. 2014.

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

PIMENTA, A. A. *Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical*. 2002. 194 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RODRIGUES, F. S. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS*. 2003. 175 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RUVIARO, J. S.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Análise global dos efeitos provocados pela explosão solar de 28 de outubro de 2003 no TEC e no posicionamento por ponto. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 65, n. 1, p. 211-226, 2013.

SANTOS, M. C.; FERREIRA, L. D. D.; LAGO, I. F. Integração entre GPS e GLONASS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 6, n. 2, p. 15-24, 2001.

SANTOS, P. M. T. *Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira*. 2001. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

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

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

SHARMA, S.; DASHORA, N.; GALAV, P.; PANDEY, R. Cycle slip detection, correction and phase leveling of RINEX formatted GPS observables. *Current Science*, v. 100, n. 2, p. 205-212, Jan. 2011.

SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANSCESCHI, G.; DODSON, A. Stochastic modeling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positioning. *Advances in Space Research*, v. 45, n. 9, p. 1113-1121, May 2010.

SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region*. 1998. 198 p. Dissertation (PhD in Science) – Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary.

\_\_\_\_\_. LACHAPELLE, G.; YAO, D.; YU, W.; WATSON, R. Investigation the impact of ionospheric scintillation using a GPS software receiver. In: ION GNSS 2005 CONFERENCE, 2005, Long Beach. *Electronic Proceedings...* Long Beach, 2005. p. 1-12. Disponível em: <[http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/05GNSS\\_Skone%20etal.pdf](http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/05GNSS_Skone%20etal.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2014.

SOJKA, J. J. Ionospheric induced scintillation: a space weather enigma. *Space Weather*, v. 11, n. 4, p. 134-137, Apr. 2013.

TANNA, H. J.; KARIA, S. P.; PATHAK, K. N. A study of L band scintillations during the initial phase of rising solar activity at an Indian low latitude station. *Advances in Space Research*, v. 52, n. 3, p. 412-421, Aug. 2013.

UNAVCO. *TEQC tutorial: basics of TEQC use and TEQC products*. 2013. Disponível em: <<http://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

VAN DIERENDONCK, A. J.; KLOBUCHAR, J.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1993, Alexandria. *Proceedings...* Alexandria: [s.n.], 1993. p. 1324-1333.

VANI, B. C. *Análise da cintilação ionosférica no Brasil empregando GNSS e técnicas de mineração e visualização de dados*. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

WALTER, T. et al. Effect of ionospheric scintillations on GNSS: a white paper. In: SBAS IONOSPHERIC WORKING GROUP, 2010. *Electronic Proceedings...* 2010. p. 1-22. Disponível em: <[http://waas.stanford.edu/papers/IWG/sbas\\_iono\\_scintillations\\_white\\_paper.pdf](http://waas.stanford.edu/papers/IWG/sbas_iono_scintillations_white_paper.pdf)>. Acesso em: 2 jul. 2014.

WANNINGER, L. Ionospheric monitoring using IGS data. In: 1993 IGS WORKSHOP, 1993, Berne. *Proceedings...* Berne: Beuther, G.; Brockmann, E., 1993. p. 351-360.

\_\_\_\_\_. Monitoring ionospheric disturbances using IGS network. In: IGS: SPECIAL TOPICS AND NEW DIRECTIONS – WORKSHOP PROCEEDINGS, 1995, Potsdam. *Proceedings...* Potsdam: GeoForschungsZentrum, 1995. p. 57-66.

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

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.